

Análisis de árboles de fusiones en simulaciones numéricas

Víctor Rufo, Yuan Bernete y Luis Abalo*

Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Astrofísica, Madrid, España

(Dated: November 24, 2020)

En el presente artículo se estudia la evolución de los halos de materia oscura utilizando la **simulación del Milenio** como base de datos. Dicho análisis se divide en dos partes: una primera parte en la que se realiza el estudio de la evolución y las fusiones en halos de rangos de masas diferentes para su posterior comparación y pequeño estudio estadístico. En la segunda parte, con el objetivo de poder estudiar la evolución de las galaxias albergadas en los subhalos, se tiene en cuenta tanto la materia oscura como la materia bariónica y se estudian los excesos de color en las distintas bandas fotométricas. El objetivo principal del artículo que se presenta es comprobar si el comportamiento de los halos y la descripción de los mecanismos y eventos que conciernen se pueden explicar a través de la simulación

Keywords: evolución: galaxias, halos: materia oscura y bariónica, color: excesos, formación: galaxias y estrellas

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de la evolución de los halos de materia oscura se ha realizado a partir de la base de datos en la aplicación web de **Virgo - Millennium**[6], anunciada en (*G. Lemson & the Virgo Consortium, 2006*[5]), usando *Structured Query Language* (SQL). De esta manera, se accede a todas las propiedades de las galaxias y halos así como a la relación espacial y temporal entre ellos y su entorno. El estudio esta basado en el modelo de *Springel et al., 2005*[1], el cual hace predicciones sobre el crecimiento jerárquico de las estructuras a través de la inestabilidad gravitatoria.

Los **parámetros y condiciones iniciales** de la simulación Λ CDM, se establecen en la *Tabla I*:

Ω_m	Ω_b	Ω_Λ	h	n	σ_8
0.25	0.0045	0.75	0.73	1	0.9

Tabla I: Parámetros y condiciones iniciales: $\Omega_m = \Omega_{dm} + \Omega_b$ es la densidad total de materia, Ω_b es la densidad de bariones y Ω_Λ es la densidad de materia oscura, las tres en unidades de la densidad crítica para un universo cerrado, h es la constante de Hubble, n es el índice del espectro de perturbaciones iniciales, y σ_8 es la amplitud de las perturbaciones (*Springel et al., 2005*[1])

El volumen de la simulación es una caja de $500 h^{-1} \text{Mpc}$ de lado, con $N = 2160^3$ partículas de masa $8.6 \times 10^8 h^{-1} M_\odot$ (*Springel et al., 2005*[1] [7]).

Después de que se haya realizado la simulación, se construyen los árboles de fusión mediante la determinación del descendiente de cada subhalo a partir de los grupos de partículas *friends to friends* (FoF).

En la *Sección II* se estudian los árboles de fusión en halos de rangos de masas diferentes. Se utilizan los datos de la $m_{crit200}$ (la masa dentro del radio donde FoF tiene una sobredensidad 200 veces mayor que la densidad crítica de la simulación) y el *redshift* ($z = 0$ implica un *StepNum = 63*). Se obtienen los árboles de fusión de 10 subhalos dentro de los 5 rangos de masa analizados.

En la *Sección III* se realiza un análisis general del subhalo escogido, representando la masa y el exceso de color B-V de las galaxias que contiene.

II. EVOLUCIÓN DE HALOS PARA DISTINTAS MASAS

A. Procedimiento

Rango 1	$M_{crit} > 10^{13} M_\odot$
Rango 2	$10^{12} M_\odot < M_{crit} < 10^{13} M_\odot$
Rango 3	$10^{11} M_\odot < M_{crit} < 10^{12} M_\odot$
Rango 4	$10^{10} M_\odot < M_{crit} < 10^{11} M_\odot$
Rango 5	$10^{10} M_\odot > M_{crit}$

Tabla II: Rangos de masas a tiempo actual con redshift nulo

En esta primera parte, se lleva a cabo el estudio de la evolución de los árboles de fusión de halos

* Víctor Rufo, Yuan Bernete y Luis Abalo: labalo@ucm.es, labalo@ucm.es y labalo@ucm.es

de materia oscura para cinco rangos de masa (ver *Tabla II*) a lo largo de su historia. Posteriormente, se analiza el promedio de la evolución de los halos para cada rango de masas. Así, para cada rango se analiza la evolución de 10 halos, representando su historia de fusiones y su crecimiento en masa respecto al *redshift*.

Para obtener la evolución de los halos, se trabaja con los modos H1 y H2 de la base de datos del *Millennium* [6]. El modo H1 se emplea para situar los halos con una masa crítica determinada en el rango correspondiente. Posteriormente, con el modo H2, se obtiene la historia de formación completa.

Utilizando el modo H1, se establece un *redshift* 0 mediante un $Snapnum = 63$. La determinación de los intervalos para la masa se lleva a cabo variando el número de partículas np y el tamaño de la caja (x, y, z) . Se ha de tener en cuenta que la masa viene dada en unidades de $10^{10} M_{\odot}$.

Seguidamente, se introduce el *HaloID* utilizando el modo H2. Los datos obtenidos contienen la evolución del halo en cuestión, junto a sus fusiones correspondientes. Estos datos se guardan en un fichero *.csv* y se almacenan en una carpeta para su posterior tratamiento. El estudio se centra en el halo principal, al cual otros halos menores se le han ido fusionando a lo largo de la historia.

Se representa gráficamente cada rango de masa de la *Tabla II* de la siguiente manera. Se dispone la masa crítica de cada halo normalizada con la masa a *redshift* nulo en frente del inverso del factor de escala, ambos ejes en escala logarítmica decimal.

B. Resultados: Materia oscura

En primer lugar, cabe señalar que el crecimiento de los halos se realizan mediante fusiones. Por tanto, el crecimiento ocurre en un instante de tiempo, es decir, en un *snapNum* determinado, y no tiene un crecimiento continuo. Sin embargo, debido a que la representación escalonada de los subhalos dificulta la visualización, en la *Figura 3* no se añade.

De manera previa a estudiar la evolución de los subhalos para cada rango de masa en la *Figura 3*, y con el objetivo de evidenciar la influencia de la masa en la verificación de la evolución según la simulación, se presenta en la *Figura 1* una comparación general entre los cinco rangos de masas. Se calcula la media de las masas de los subhalos de cada rango y para cada *redshift*. Las escalas de los ejes son logarítmicas, luego cada intervalo representa la

variación en órdenes de magnitud.

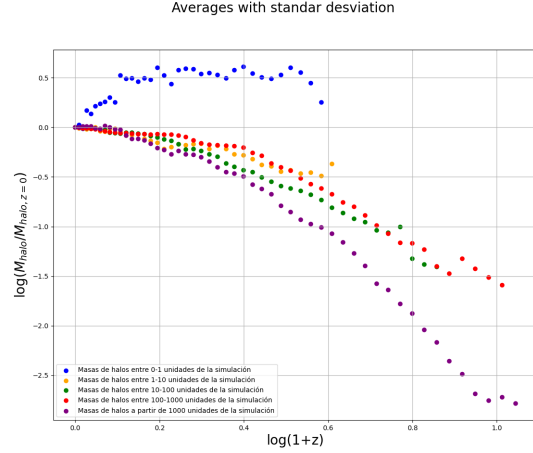


Figura 1: Evolución de los halos promedio de los rangos de la *Tabla II* para el caso de materia oscura. Código de colores: morado-Rango 1, rojo-Rango 2, verde-Rango 3, amarillo-Rango 4 y azul-Rango 5

Se observa claramente que los halos más masivos tienen una historia más antigua al llegar a *redshifts* más elevados. Hay un crecimiento inicial considerable y más homogéneos en los tres primeros rangos (morado, rojo y verde) y un aplanamiento de su curva en *redshift* más cercanos a cero. Además, el rango que representa la curva amarilla no llega a un *redshift* muy avanzado. Las limitaciones del modelo se observan claramente en el rango representado por la curva azul, el menos masivo, el cual pone en evidencia la validez de la simulación para rangos de masa tan pequeños. Se hablará de las limitaciones de la simulación del *Milenio*[6] en la *Sección IV*.

La *Figura 1* representa la evolución de los halos para cada rango de la *Tabla II*. En general, se observan intervalos de crecimiento negativo, lo cual no tiene una explicación física congruente. Estos decrecimientos son una consecuencia de las limitaciones del modelo y se explican entendiendo que, para un *SnapNum* determinado, halos más pequeños salen fuera del radio del virial del halo principal, dejando de ser considerados, sustrayendo así la masa correspondiente. Posteriormente, este decrecimiento se recupera gracias al colapso gravitacional. Los halos que habían salido vuelven a incluirse en el espacio que abarca el radio del virial del halo principal.

Si uno se detiene en cada gráfica dentro de la *Figura 3*, se pueden hacer los siguientes comentarios. En (a), se aprecia un crecimiento inicial a alto *redshift* con un número considerable de fusiones entre los distintos subhalos, visualizando un aplanamiento

de la curva con una disminución del número de fusiones a medida que se avanza hacia redshifts más pequeños. En (b) y en (c), uno verifica que el crecimiento inicial es menor fijándose en el eje de abscisas, cuyos intervalos se han reducido, por lo que la curva tiene un aplanamiento más temprano. La principal diferencia entre (b) y (c) es que en el tercer rango de masas, no se llega a un redshift tan elevado. En (d), fijándose de nuevo en el eje de abscisas, el crecimiento es mucho más tardío y menos acentuado. Finalmente, en (e), se pone en evidencia las limitaciones de la simulación fuertemente. La mayoría de los subhalos que se representan, tienen intervalos donde sus valores durante su crecimiento son mucho mayores a sus valores finales, lo cual no tiene consistencia física.

C. Resultados: Materia bariónica

De la misma manera que en la Sección IIB, el crecimiento es instantáneo pero, para una mejor visualización, la Figura 5 no se representa de manera escalonada.

Análogamente, antes de analizar la Figura 5 en la que se recogen la evolución de cada conjunto de subhalos para cada rango de masas de la Tabla II, se presenta en la Figura 2 un promedio de las masas para cada rango y para cada redshift. Igualmente, las esalas son logarítmicas, con lo que la variación entre cada intervalo corresponde a un cambio en el orden de magnitud.

El crecimiento de los halos más masivos se prolonga hacia redshift más grandes, por lo tanto su historia de fusiones es más antigua. El aplanamiento de la curva de crecimiento según se avanza hacia redshift más pequeños también es visible en la

gráfica. Y, de la misma manera que en la Figura 1, las limitaciones del modelo se hacen visible en la curva azul, correspondiente al promedio del grupo de subhalos del rango más pequeño de masa. Sin embargo, la principal diferencia con el caso de la materia bariónica de la Sección IIB, es que el crecimiento no es igual de homogéneo. La explicación se contará en detalle con la explicación relativa a la Figura 5.

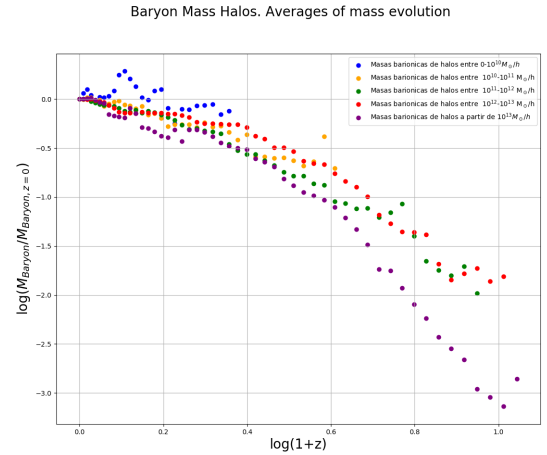


Figura 2: **Evolución de los halos** promedio de los rangos de la Tabla II para el caso de materia bariónica. Código de colores: morado-Rango 1, rojo-Rango 2, verde-Rango 3, amarillo-Rango 4 y azul-Rango 5

III. ÁRBOL DE FUSIONES

IV. CONCLUSIONES

-
- [1] V. Springel et al., **The Millennium Simulation** *Simulation of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars* (Nature Publishing Group, 435-629, 2005).
 - [2] G. De Lucia and J. Blaizot, *The hierarchical formation of the brightest cluster galaxies*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 375, (2007).
 - [3] M. Boylan-Kolchin et al. **The Millennium-II Simulation** *Resolving cosmic structure formation with the Millennium-II Simulation* (MNRAS, 398-1150, 2009).
 - [4] Guo et al. **The Millennium-WMAP7 Simulation** *Galaxy formation in WMAP1 and WMAP7 cosmologies* (MNRAS, 428-1351, 2013).
 - [5] G. Lemson and the Virgo Consortium **Database Halo and Galaxy Formation Histories from the Millennium Simulation: Public release of a VO-oriented and SQL-queryable database for studying the evolution of galaxies in the LambdaCDM cosmogony** (2006)
 - [6] Web: Virgo - Millennium Database
 - [7] Cole et al. *The statistical properties of Λ cold dark matter halo information* (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 546-556, 2008).
 - [8] Springel et al. *Population a cluster of galaxies - I. Results at [formmu2]/z=0* (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 726-750, 2001).

APÉNDICE

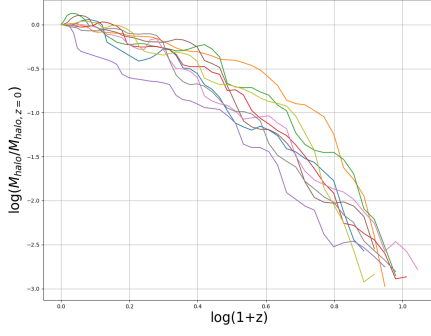
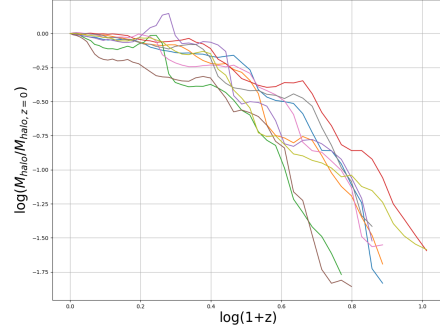
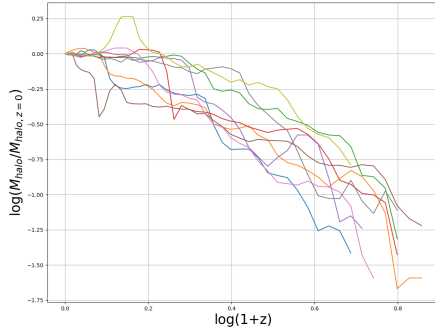
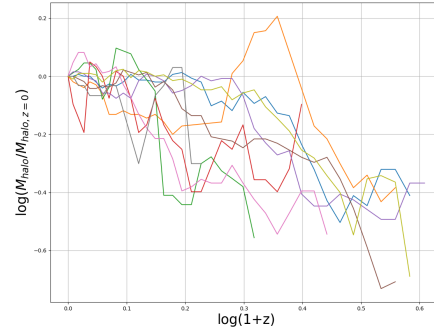
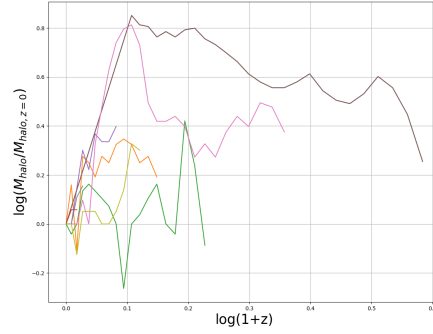
Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 1000(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 100(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 10(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 1(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*Halo Tree. Lower limit of $m_{\text{Crit}200}$ in simulation units: 0(e) Evolución de los 10 halos del *Rango 5*

Figura 3: Evolución de los halos referentes a los rangos de la *Tabla II* para el caso de materia oscura. Se explica en la *Sección IIB*

Averages with standar desviation

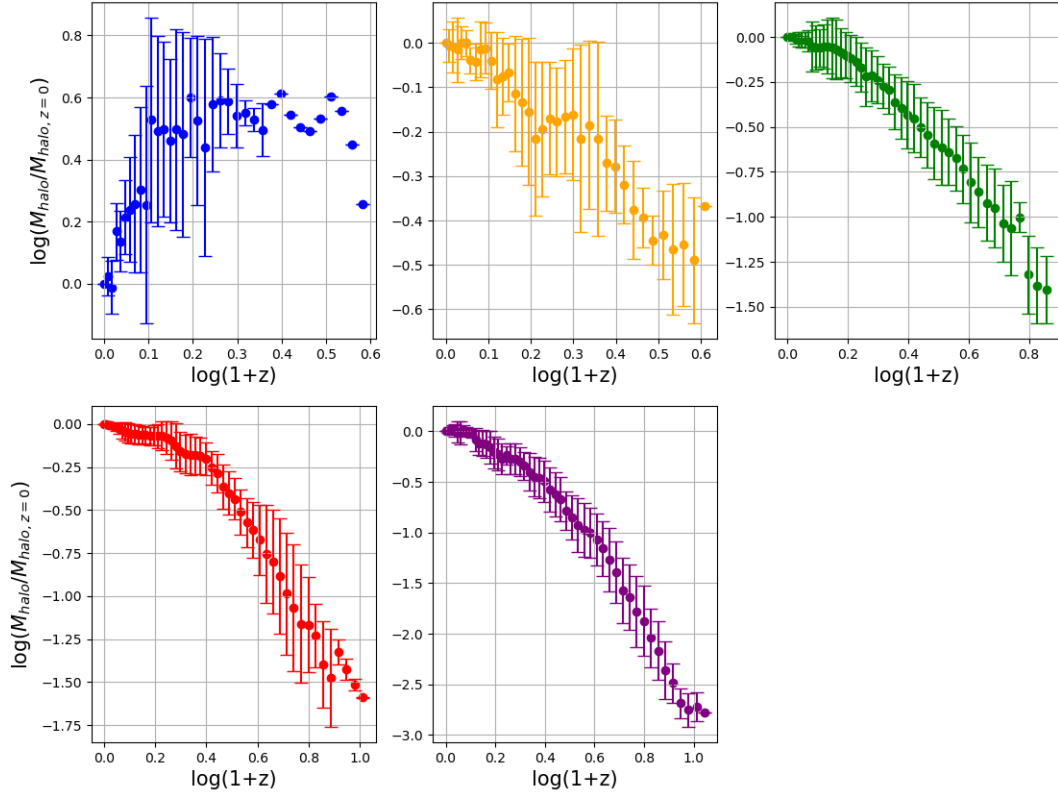


Figura 4: Desviación típica para el mismo tiempo en la evolución de los halos de la Figura 1 para la materia oscura. Se explica en la Sección IIB

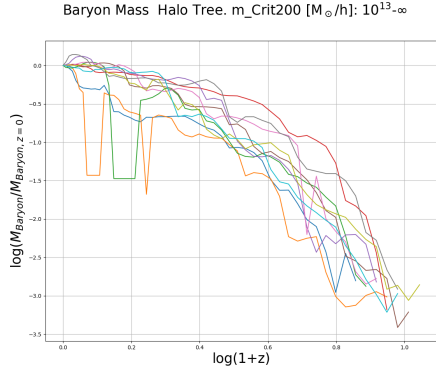
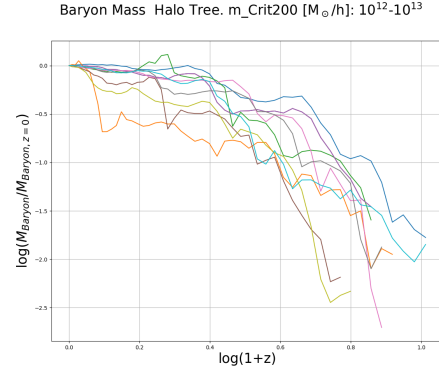
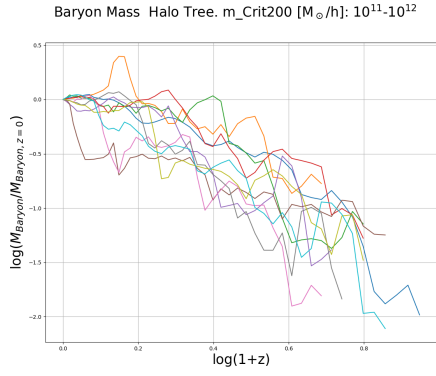
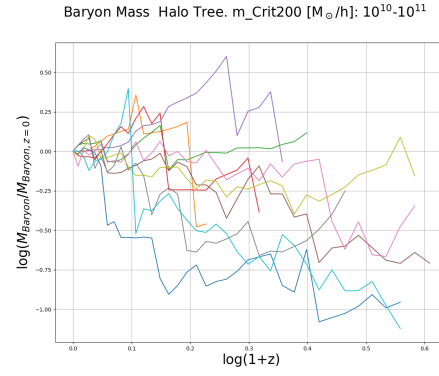
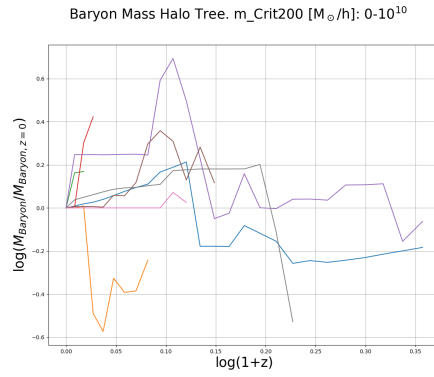
(a) Evolución de los 10 halos del *Rango 1*(b) Evolución de los 10 halos del *Rango 2*(c) Evolución de los 10 halos del *Rango 3*(d) Evolución de los 10 halos del *Rango 4*(e) Evolución de los 10 halos del *Rango 5*

Figura 5: Evolución de los halos referentes a los rangos de la *Tabla II* para el caso de materia bariónica. Se explica en la *Sección II C*

Baryon Mass Halos. Averages of mass evolution & standar desviation.

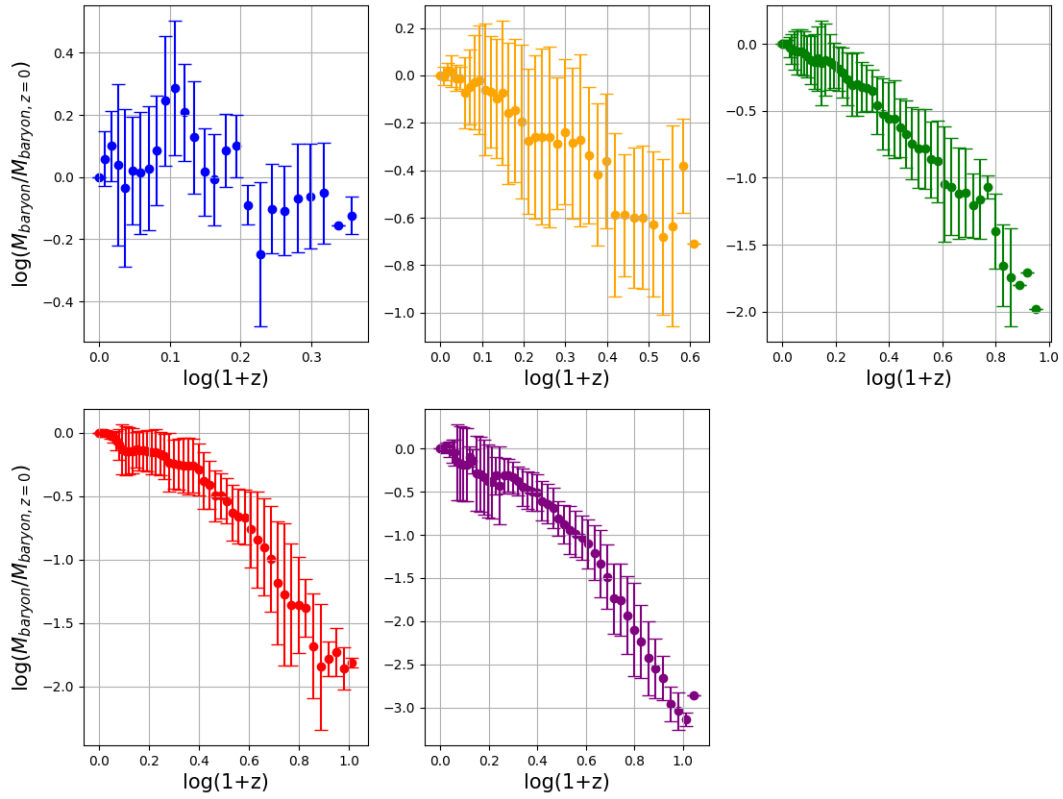


Figura 6: **Desviación típica** para el mismo tiempo en la evolución de los halos de la Figura 2 para la materia bariónica. Se explica en la Sección II C