



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y
ASTROFÍSICA

ESTUDIO DE GALAXIAS BARRADAS EN LA
SIMULACIÓN COSMOLÓGICA ILLUSTRIS TNG100:

EL CASO DE LAS GALAXIAS DE BAJO BRILLO
SUPERFICIAL

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA

KAROL ANGÉLICA CHIM RAMÍREZ

TUTORES

DR. BERNARDO CERVANTES SODI, INSTITUTO DE
RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

DRA. YETLI ROSAS GUEVARA, DONOSTIA
INTERNATIONAL PHYSICS CENTER

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO. ENERO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Abstract

Fifty percent of the disk galaxies in the universe have star bars. These bars have an important influence on the evolution of galaxies. The importance of these structures motivates the development of new studies that help us analyze and understand their nature and evolution. Specifically, we focus on the study of bars in galaxies with low surface brightness (LSBs) because a significant fraction of the population of galaxies belongs to this type, which makes them the major recipients of baryonic matter in the universe. In this work we study the presence of stellar bars in LSBs in contrast with high surface brightness galaxies (HSBs), using the TNG100 magnetohydrodynamic cosmological simulation of the project IllustrisTNG. The sample is limited to galaxies with a stellar mass above $10^{10} M_{\odot}$ and is composed of 4,244 disc galaxies with a redshift $z = 0$, from which 652 are LSBs and the rest 3,572 are HSBs. We find that the bar fraction in LSBs is $24 \pm 1.73\%$, statistically lower than the $28 \pm 0.79\%$ founded for HSBs, consistent with observational studies. At masses lower than $10^{11} M_{\odot}$ we found that the barred galaxy fraction (f_{bar}) is always superior for the HSBs sample than the LSBs one, while this trend reverses at the high mass end. Analyzing different parameters that could be generating this difference in bar fraction, we explore the effect of the dark matter halo spin parameter, the gas mass fraction and the bulge-to-total mass ratio (B/T). For this we build different control samples where the LSB and HSB galaxies with the same chosen parameters distribution are compared. From this comparison we find for low masses ($< 10^{11} M_{\odot}$) the difference in the barred galaxies fraction between LSBs and HSBs is due to the LSBs systematically have higher values in the spin parameter and a greater gas fraction than HSBs, being both parameters suppressors in the formation/growth of stellar bars. At high masses, the barred galaxy fraction is greater for LSBs due to, in this case, the low B/T fraction when compared with HSBs. This suggests that small bulges stimulate the presence of bars in this kind of galaxies.

Resumen

El $\sim 50\%$ de las galaxias disco en el universo presentan barras estelares. Estas barras tienen una importante influencia en la evolución de las galaxias. La importancia de estas estructuras motiva el desarrollo de nuevos estudios que busquen analizar y comprender su naturaleza y evolución. En específico, nos enfocamos en el estudio de barras en galaxias de bajo brillo superficial (LSBs por sus siglas en inglés) debido a que una fracción significativa de la población galaxias son de este tipo, lo que las convierte en los mayores recipientes de materia bariónica en el universo. En este trabajo estudiamos la presencia de barras estelares en galaxias de bajo brillo superficial en contraposición de galaxias de alto brillo superficial (HSBs), empleando la simulación cosmológica magneto hidrodinámica TNG100 del proyecto IllustrisTNG. La muestra está limitada a galaxias con masa estelar mayor a $10^{10} M_{\odot}$ y se compone de 4,224 galaxias de disco a un corrimiento al rojo $z = 0$, de las cuales 652 son LSBs y las restantes 3,572 son HSBs. La fracción de galaxias barradas en las LSBs es de $24 \pm 1.73\%$, estadísticamente menor al $28 \pm 0.79\%$ encontrado para el caso de HSBs, tal como se reporta en estudios observacionales. A masas menores de $10^{11} M_{\odot}$ encontramos que la fracción de galaxias barradas (f_{bar}) es siempre superior para la muestra HSBs que para la muestra de LSBs, con una inversión en la tendencia a altas masas. Analizando diferentes parámetros que pudieran estar provocando esta diferencia en la fracción de galaxias barradas, exploramos el efecto que tiene el parámetro de espín del halo de materia oscura, la fracción de masa en gas y la fracción en masa bulbo-total (B/T). Para ello construimos diferentes muestras de control donde se hizo la comparación de la muestra de galaxias LSBs con galaxias HSBs que poseen las mismas distribuciones de los parámetros elegidos. A partir de estas comparaciones encontramos que a bajas masas ($< 10^{11} M_{\odot}$) la diferencia de la fracción de galaxias barradas entre LSBs y HSBs se debe a que las LSBs tienen sistemáticamente valores mayores del parámetro de espín y una fracción de gas mayor que las HSBs, siendo ambos parámetros supresores de la formación/crecimiento de barras estelares. A

altas masas, la fracción de galaxias barradas es mayor para el caso de LSBs debido a que éstas presentan fracción de B/T menor con respecto a las HSBs. Esto sugiere que bulbos pequeños favorecen la presencia de barras en este tipo de galaxias.

Índice general

Índice general	iv
Índice de figuras	vi
1 Introducción	1
1.1 Galaxias y parámetros de caracterización.	2
1.2 Galaxias de Disco.	7
1.3 Barras estelares	10
1.3.1 Estabilidad del disco: Criterio ELN.	19
1.3.2 Efecto de las barras en las galaxias.	20
1.3.3 Métodos para determinar propiedades de las barras.	22
1.4 Galaxias LSB	26
1.4.1 Características generales.	26
1.4.2 Barras en LSBs	29
2 La simulación Ilustris TNG	32
2.1 Cosmología empleada	34
2.2 Identificación de halos y galaxias.	36
2.3 La simulación TNG100	37

3 Metodología	40
3.1 Catálogo TNG100	40
3.2 Catálogos suplementarios	41
3.2.1 Catálogo de Rosas-Guevara et al. [2020]	42
3.2.2 Catálogo de Zhao et al. [2020]	47
3.2.3 Catálogo de Pérez-Montaña et al. [2022]	51
3.2.4 Catálogo de Genel et al. [2015]	54
3.3 Construcción y descripción de la muestra	58
3.3.1 Parámetros de la muestra	60
4 Resultados	70
4.1 Dependencia de la f_{bar} con diferentes parámetros estructurales de la muestra. . .	75
4.1.1 f_{bar} vs fracción de gas f_{gas}	75
4.1.2 f_{bar} vs parámetro de espín λ	77
4.1.3 f_{bar} vs fracción de masa bulbo-total B/T	79
4.2 Muestras de control	83
4.2.1 Primera muestra de control	84
4.2.2 Segunda muestra de control	86
4.2.3 Tercera muestra de control	88
5 Discusión y conclusiones.	93
6 Trabajo Futuro.	102
Referencias	104

Índice de figuras

1.1	Imagen del Quinteto de Stephan tomada por el <i>JWST</i>	3
1.2	Representación esquemática de la secuencia de Hubble.	4
1.3	Comparación de funciones de luminosidad entre cúmulos y vacíos.	6
1.4	Representación artística de la Vía Láctea.	8
1.5	Ejemplo de galaxia espiral barrada NGC 4394	11
1.6	Alineación de órbitas que forman los brazos espirales y la barra estelar.	12
1.7	Fracción de barras como función de la masa estelar para diferentes simulaciones y observaciones.	13
1.8	Evolución de la amplitud de la barra y su patrón de velocidades para modelos con diferente parámetro de espín.	15
1.9	Efecto de la fracción de gas de la galaxia en la evolución temporal de la barra y el halo.	16
1.10	Fracción de barras en función de la fracción de masa de gas de galaxias observadas.	17
1.11	Distribuciones de los seis principales parámetros de las galaxias segregadas en LSBs y HSBs.	29
2.1	Representación de las simulaciones TNG50, TN100 y TNG300.	33
2.2	Representación y comparación visual de TNG100 y TNG300.	35
2.3	Valores típicos de la longitud de la barra.	39

3.1	Ejemplos de evolución de una galaxia fuertemente barrada y una no barrada. . .	44
3.2	Comparación de la fracción de barras como función de la masa estelar para galaxias en la simulación Illustris TNG100 en la muestra de Rosas-Guevara et al. [2020]	46
3.3	Edad de la barra en función de la masa estelar (Rosas-Guevara et al. [2020]). . .	47
3.4	Comparación de elipticidad, ángulo de posición y densidad superficial de galaxias barradas y no barrada.	49
3.5	Fracción de galaxias barras como función de la masa estelar para la muestra de Zhao et al. [2020]	50
3.6	Distribución del parámetro k_{rot}	51
3.7	Comparación de galaxia LSB y HSB.	53
3.8	Brillo superficial como función de la masa estelar.	54
3.9	Fracción de LSBs como función de la masa estelar.	55
3.10	Relación entre el momento angular estelar específico y la masa estelar.	57
3.11	Ejemplos de galaxias LSBs y HSBs barradas y no barradas para nuestra muestra. . .	61
3.12	Distribución de la fracción de gas.	62
3.13	Distribución del parámetro adimensional de espín λ	65
3.14	Parámetro de espín como función de la masa estelar.	66
3.15	Transferencia de momento angular entre la componente estelar y de materia oscura como función de la masa estelar.	67
3.16	Distribución de la fracción de masa bulbo-total B/T	68
3.17	Distribución del parámetro k_{rot}	69
4.1	Fracción de galaxias barradas y no barradas de la muestra total.	71
4.2	Fracción de galaxias barradas y no barradas para las submuestras LSB y HSB. .	72

4.3	f_{bar} como función del brillo superficial.	72
4.4	Fracción de galaxias barradas como función de M_{\star} para la muestra total.	73
4.5	Fracción de galaxias barradas como función de M_{\star} para la segregación LSB y HSB.	74
4.6	Dependencia de f_{bar} con la fracción de gas.	76
4.7	Dependencia de f_{bar} con el parámetro adimensional de espín.	78
4.8	Fuerza de la barra como función de la fuerza fraccional del bulbo.	80
4.9	Izquierda: fracción de galaxias barradas como función de fracción de masa del bulbo-total para la muestra total de centrales y satélites. Derecha: Fracción de bulbo como función de la masa estelar para la las submuestras LSBs y HSBs, los valores de B/T se obtuvieron de Genel et al. [2015].	80
4.10	Dependencia de f_{bar} con B/T usando los datos de Du et al. [2019].	82
4.11	Distribuciones de masa de gas y parámetro de espín obtenidas para MC1.	85
4.12	Fracción de galaxias barradas para MC1.	87
4.13	Distribución de B/T obtenida para MC2.	88
4.14	Fracción de galaxias barradas para MC2.	89
4.15	Distribuciones obtenidas de M_{gas} y B/T en MC3.	90
4.16	Fracción de galaxias barradas para MC3.	91

Introducción

En el contexto de la astrofísica moderna, el estudio de la formación y evolución de galaxias es uno de los temas más activos en la actualidad y tiene como objetivo entender y estudiar los procesos físicos que empujan la evolución del Universo como un todo. Gracias a los avances tecnológicos actuales, los nuevos telescopios y detectores a lo largo del espectro electromagnético, hemos podido mejorar nuestra comprensión teórica del universo mismo, permitiéndonos refinar modelos teóricos para poder predecir acontecimientos en el cosmos. Un ejemplo de esto es el telescopio espacial James Webb (*JWST*, por sus siglas en inglés), que ha empezado a generar datos e información valiosa de las galaxias en épocas tempranas del universo. *JWST* será capaz de encontrar galaxias con un corrimiento al rojo de $z = 15$ para un estudio de campo ultraprofundo. Con los nuevos datos obtenidos a partir de las nuevas facilidades astronómicas, se podrán poner nuevas restricciones a los modelos de la formación y la evolución de galaxias, especialmente para galaxias tempranas y masivas.

Una de las herramientas más relevantes y que ha avanzado en los últimos años en el estudio de la formación y evolución de galaxias ha sido las simulaciones hidrodinámicas cosmológicas.

Estas simulaciones fueron diseñada para reproducir propiedades de las galaxias en el universo local y actualmente existen diversos proyectos encargados del desarrollo de estas simulaciones. Un ejemplo de esto es el proyecto EAGLE ¹ cuyo principal objetivo es examinar la formación de galaxias y su evolución en entornos gaseosos. También tenemos el proyecto Illustris ² y su sucesor, IllustrisTNG ³, el cual será una pieza clave en este estudio. Illustris es un conjunto de simulaciones cosmológicas de formación de galaxias completadas a finales de 2013; aunque su sucesor (IllustrisTNG, la cual será detallada más adelante), sigue las mismas motivaciones. Ésta presenta mejoras en los procesos físicos incluidos en los códigos, lo que mejora los resultados de las simulaciones.

Al comparar los resultados de las simulaciones con las observaciones del Universo actual, es posible entender e identificar los procesos físicos que moldean a las galaxias que observamos actualmente. El caso específico que nos interesa en este trabajo es el estudio de galaxias barradas dentro de la simulación IllustrisTNG y su comparación con el Universo observable. Antes de adentrarnos en la metodología y los resultados obtenidos que acometen este estudio, es importante sentar las bases sobre las cuales se trabajará a lo largo de este trabajo de tesis.

1.1 Galaxias y parámetros de caracterización.

Las galaxias son sistemas masivos ligados gravitacionalmente con una amplia gama de morfologías y propiedades. Están compuestas de estrellas, materia interestelar (compuesta de gas y polvo), un agujero negro supermasivo en el centro y una gran cantidad de materia oscura (DM, por sus siglas en inglés). La formación y evolución de las galaxias es un proceso complejo que puede conducir a diferentes estructuras debido a interacciones (colisiones o fusiones) con otras galaxias.

¹<https://eagle.strw.leidenuniv.nl/>

²<https://www.illustris-project.org/>

³<https://www.tng-project.org/>

En la figura 1.1 observamos la reciente imagen revelada por el *JWST* donde apreciamos el grupo de galaxias conocido como "Quinteto de Stephan". Estas galaxias se encuentran interaccionando gravitacionalmente entre sí y podemos apreciar regiones de brotes de formación estelar, colas de marea de gas, polvo y estrellas.



Figura 1.1: Imagen tomada por el James Webb Space Telescope del grupo galáctico conocido como “El quinteto de Stephan”, el cual muestra galaxias en interacción gravitatoria y donde se pueden observar colas de marea, brotes estelares y caminos de gas y polvo. Créditos: NASA, ESA, CSA, and STScI.

Para poder caracterizar a las galaxias es necesario estudiar un gran número de parámetros mencionados a continuación y que son profundizados, por ejemplo en [Binney and Tremaine \[2011\]](#) y [Mo et al. \[2010\]](#).

- **Morfología:** A grandes rasgos, las galaxias se pueden clasificar entre *elípticas* y *espirales*. Una clasificación general se puede encontrar en el diagrama de Hubble de la figura 1.2, en

donde tenemos las galaxias de tipo temprano (elípticas) a la izquierda y las de tipo tardío a la derecha (espirales). Las galaxias elípticas se caracterizan por ser sistemas elipsoidales ligeramente aplanados y que contienen poca presencia (o ausencia) de gas y polvo. Las estrellas en este tipo de galaxias son por lo general viejas, con edades que se pueden comparar con la edad del universo. Estos sistemas están soportados por dispersión de velocidades de las estrellas; en regiones poco densas del universo sólo el 10 % son elípticas mientras que en cúmulos galácticos esta cantidad aumenta hasta el 40 % (Finkelstein [2014]). Por otro lado, las galaxias espirales presentan discos aplanados prominentes con brazos espirales, el disco es sostenido por rotación y se conforma de estrellas, gas y polvo; el ejemplo claro de este tipo de galaxias es la Vía Láctea. En regiones del universo de baja densidad, el 60 % de las galaxias luminosas son espirales, mientras que en los cúmulos solo el 10 % son de este tipo (Binney and Tremaine [2011]). Dentro de este tipo de galaxias existen dos subtipos: espirales no barradas (denotadas como Sa, Sb, Sc) y espirales barradas (SBa, SBb, SBc), estas últimas presentan una estructura rígida larga que atraviesa su centro y de la cual parecen salir los brazos espirales. En el extremo derecho del diagrama de Hubble encontramos también galaxias irregulares que no tienen una estructura geométrica definida.

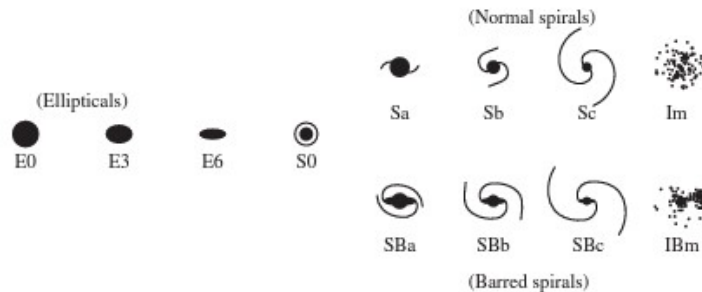


Figura 1.2: Representación esquemática de la secuencia de Hubble para la morfología de las galaxias (Mo et al. [2010]).

- **Luminosidad:** con respecto a este parámetro, las galaxias se pueden encontrar en un gran rango de luminosidades, desde $1000 L_{\odot}$ hasta $10^{12} L_{\odot}$. La luminosidad está directamente relacionada con la cantidad de estrellas que contenga la galaxia y así, con su masa estelar M_{\star} . Para describir el número de galaxias dentro de cierto rango de luminosidades se usa la función de luminosidad $\phi(L)$, una aproximación para esta función es dada por la ley de Schechter en la Ecuación 1.1, donde $\phi_{\star} = 4.9 \times 10^{-3} h_7^3 Mpc^{-3}$, $\alpha = -1.1$ y $L_{\star} = 2.9 \times 10^{10} h_7^{-2} L_{\odot}$.

$$\phi(L)dL = \phi_{\star} \left(\frac{L}{L_{\star}} \right)^{\alpha} \exp(-L/L_{\star}) \frac{dL}{L_{\star}}. \quad (1.1)$$

La figura 1.3 tomada de Croton et al. [2005], muestra la dependencia de la función de luminosidad en la banda bJ para una muestra de galaxias tomadas del 2dF Galaxy Redshift Survey. Notamos que $\phi(L)$ decrece sistemáticamente hacia galaxias más brillantes. También se observan las distribuciones de galaxias de tipo temprano y tardío separando las regiones vacías (curvas inferiores) y de cúmulos (curvas superiores). La imagen nos confirma lo mencionado en el primer punto de esta lista, una población poco densa o “vacía” está conformada principalmente por galaxias de tipo tardío, mientras que en los cúmulos predominan los tipos tempranos.

- **Tamaño:** Dado que las galaxias no tienen límites definidos, hay diferentes métodos para definir el tamaño de una galaxia, uno de ellos es tomar el radio que encierra la mitad de la luminosidad total de la galaxia, conocido como el radio efectivo R_e así las galaxias más luminosas serían las más grandes.
- **Brillo superficial:** Es por definición, la luminosidad recibida por unidad de área, sus unidades son mag arcsec^{-2} y su valor va a depender de la banda en la que se esté observando aunque por lo general se usa la banda B o r . Un brillo superficial (μ) típico de las galaxias

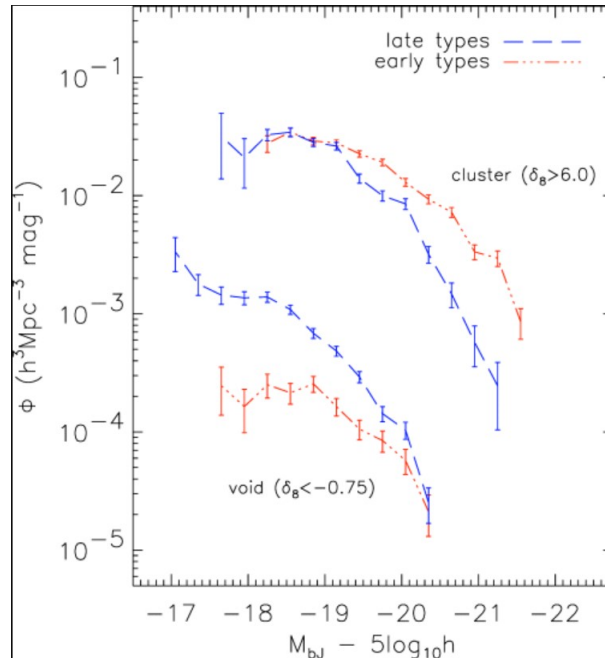


Figura 1.3: Comparación entre funciones de luminosidad $\phi(L)$ de galaxias en ambientes vacíos (curvas inferiores) y cúmulos (curvas superiores). Como se aprecia, en ambientes vacíos dominan las galaxias tenues de tipo tardío (curvas azules) mientras que en los cúmulos predominan galaxias más brillantes (Croton et al. [2005]).

es de $18 \text{ mag arsec}^{-2}$, aunque existen galaxias por encima y por debajo de este valor. (μ) puede usarse para clasificar galaxias según su brillo superficial, en la banda r se puede usar como valor límite de $22 \text{ mag arsec}^{-2}$ (Pérez-Montaño et al. [2022]). Galaxias que tienen valores por debajo de este límite se consideran galaxias de alto brillo superficial, y por encima se toman como galaxias de bajo brillo superficial.

- **Fracción de gas:** Este es otro parámetro útil para describir a las galaxias según su contenido de gas frío (cold). Se define como $f_{\text{gas}} = M_{\text{cold}}/[M_{\text{cold}} + M_{\star}]$, donde M_{cold} y M_{\star} es la masa del gas frío y de estrellas, respectivamente. Esta relación nos indica con qué eficiencia el gas frío se ha convertido en estrellas. Para galaxias elípticas, f_{gas} es muy pequeña mientras que para galaxias de disco la fracción aumenta significativamente con la disminución del brillo superficial (Mo et al. [2010]).

- **Actividad nuclear:** Una fracción pequeña de todas las galaxias, denominadas galaxias activas, muestran una componente no estelar adicional en su distribución de energía espectral. Esta emisión es originada en una pequeña región central llamada Núcleo Galáctico Activo (AGN, por sus siglas en inglés) y está asociada con la acreción de materia en el agujero negro supermasivo central. Considerando la actividad nuclear podemos segregar las galaxias entre activas y normales. En el trabajo de [Véron-Cetty and Véron \[2010\]](#) se clasificaron diferentes tipos de AGNs del Sloan Digital Sky Survey (SDSS), entre los que se encuentran los quásares, clasificados como tal de acuerdo al brillo de su núcleo estelar. Otros tipos de AGNs se clasificaron de acuerdo a su espectro.

1.2 Galaxias de Disco.

Los parámetros anteriores nos sirven para poder caracterizar una galaxia y analizar sus propiedades. Con respecto a su morfología vimos que podemos segregar a las galaxias en dos submuestras principales: elípticas o espirales; para el caso particular de este estudio se analizarán principalmente las galaxias de disco dentro de las cuales se encuentran las espirales. Por ello vale la pena una concepción resumida de las galaxias de disco.

Las galaxias de disco, dentro de las cuales se encuentran las espirales, nacen y se desarrollan dentro de los halos de materia oscura (al igual que el resto de las galaxias). Estos halos juegan un papel importante en la evolución de las componentes de las galaxias como se planteará más adelante. Este tipo de galaxias consisten en un disco estelar delgado con soporte rotacional, brazos en espiral formados de estrellas y gas; y a menudo, una barra estelar, más una protuberancia central (bulbo). Un ejemplo de galaxia espiral es nuestra propia galaxia, la Vía Láctea (Figura 1.4), la cual contiene los elementos antes mencionados. Idealmente, para observar la estructura espiral es mejor ver la galaxia frontalmente (face-on), así se pueden apreciar estrellas jóvenes,

contenido de polvo, gas, entre otros. El gas presente en las galaxias espirales es principalmente hidrógeno neutro (HI) e hidrógeno molecular (H₂). Mapas de distribuciones de estas componentes (así como de CO) se pueden encontrar en [Young and Scoville \[1991\]](#). La fracción de gas decrece del 80 % para galaxias de disco de baja masa y bajo brillo superficial hasta 5 % en espirales masivas de tipo temprano como Sa/SBa ([McGaugh and De Blok \[1997\]](#)). Para determinar la abundancia de metales en estas galaxias se analiza la emisión de las regiones HII donde se encuentra que la metalicidad disminuye con el radio ([Mo et al. \[2010\]](#)).



Figura 1.4: Representación visual de la Vía Láctea obtenida por NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech).

Respecto a la coloración de estas galaxias, tenemos que tienden a ser más azules que las elípticas de la misma luminosidad. Esto se debe a que las galaxias de disco se encuentran formando estrellas activamente, así que tienen poblaciones estelares jóvenes que son azules. En [de Jong \[1996\]](#) se menciona que dentro de este tipo de galaxias de disco se presentan gradientes de color, siendo las regiones exteriores más azules que las interiores como también se puede apreciar en la [figura 1.4](#) con el centro más amarillento y los brazos más azulados, lo que nos

indica un proceso de formación de adentro hacia afuera, con las poblaciones estelares más viejas en las partes centrales de las galaxias y las generaciones más jóvenes en las regiones externas.

Como se vio con anterioridad, las galaxias de disco presentan numerosas estructuras morfológicas internas, siendo las principales la barra estelar y los brazos espirales. Por un lado, más de la mitad de todas las galaxias espirales presentan una estructura en forma de barra en sus regiones internas (Sheth et al. [2008]). Las barras tienen isofotas de forma cuadrada-rectangular debido a que son bastante alargadas, la manera ideal de observar una barra es teniendo una vista face-on (de frente) de la galaxia. El grosor de las barras estelares no está bien determinado sin embargo se pueden establecer límites que sugieren que son tan delgadas como el disco galáctico. Profundizaremos en estas estructuras que son nuestro tema central un poco más adelante. Por otro lado, tenemos los brazos espirales que se forman por ondas de densidad (Lin and Shu [1987]), que se propagan por el disco. Como las estrellas y gas en el disco perturbado tienen velocidades angulares (Ω) diferentes a la del patrón se van moviendo dentro y fuera de la espiral así, el material que conforma el brazo en una galaxia cambia constantemente. Los brazos espirales en las galaxias de disco pueden tener una amplia gama de radios; se clasifican como delanteros o traseros según el sentido en el que la espiral se enrolla en relación con el sentido de rotación del disco (Mo et al. [2010]). Galaxias de disco de tipo temprano tienen brazos espirales fuertemente enrollados mientras que las de tipo tardío presentan brazos más extendidos y abiertos.

Las estrellas y gas frío en los discos de estas galaxias se mueven en órbitas circulares por lo que la cinemática de las galaxias de disco se especifica por su curva de rotación $V_{rot}(r)$ que nos indica la velocidad de rotación como función de la distancia al centro de la galaxia. A partir de esto, la masa total encerrada dentro de un determinado radio se puede obtener como:

$$M(r) = rV_{rot}^2(r)/G \quad (1.2)$$

Esto indicaría que $M(r) \propto r$, sin embargo la masa calculada de las galaxias no parece explicarse con la masa estelar, el hecho de que las curvas de rotación de estas galaxias sean planas a grandes rasgos es una evidencia indirecta de la presencia de halos de materia oscura (Bertone and Hooper [2018]).

1.3 Barras estelares

Las galaxias barradas conforman alrededor del $\sim 50\%$ de las galaxias disco en el universo (Sellwood and Wilkinson [1993], Masters et al. [2011], Vera et al. [2016]). Presentan una estructura rígida formada de estrellas que rota rápidamente alrededor del eje normal al plano del disco (Sellwood and Wilkinson [1993]). Las barras tienen una influencia importante en la evolución de las galaxias y están involucradas con la existencia de brazos espirales (Schwarz [1981]) y/o pseudobulbos (Athanasoula [2005]). La importancia de estas estructuras motiva al desarrollo de nuevos estudios que busquen analizar y comprender su naturaleza y evolución.

En una galaxia barrada se distingue la barra como una estructura elongada que atraviesa la galaxia y de la cual se extienden los brazos espirales, un ejemplo de este tipo de galaxias es NGC 4394 (figura 1.5).

Siguiendo el modelo presentado en Kormendy et al. [2013], una barra estelar es una onda de densidad en el disco galáctico por lo que el patrón de barra gira a una velocidad angular específica (Ω_p) de manera rígida a diferencia del material del disco, el cual tiene una variación con el radio, $\Omega(r)$. Las barras y los brazos espirales tienen ciertas similitudes y la clave para entenderlas es a través de las resonancias orbitales presentes en galaxias de disco. Se tienen tres resonancias principales conocidas como la resonancia interna y externa de Lindblad (llamadas de ahora en adelante ILR y OLR, respectivamente) y la resonancia de corrotación. Una estrella en la resonancia de corrotación, $\Omega = \Omega_p$, girará con una velocidad igual a la de la barra mientras gira

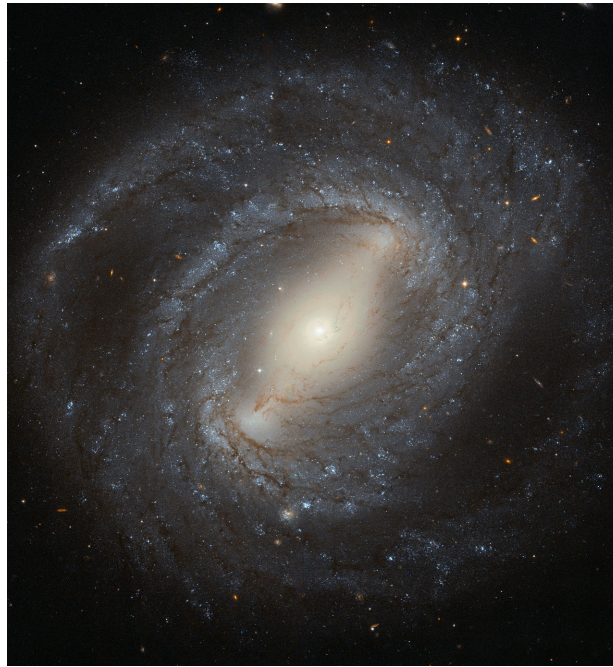


Figura 1.5: Galaxia espiral barrada NGC 4394. Créditos: ESA/Hubble & NASA.

alrededor del centro de la galaxia, por lo que en el marco giratorio parecerá no moverse (Ceverino and Klypin [2007]), su movimiento se describe por un armónico simple en sentido contrario a las manecillas del reloj de una elipse cerrada, esto es a lo que se le llama *aproximación epicíclica*. En la parte externa de la galaxia tenemos la OLR donde $\Omega_p = \Omega + \kappa/2$ siendo κ la frecuencia epicíclica, es decir, la frecuencia a la cual un objeto oscila en movimiento circular. En esta resonancia la estrella gira más lento que la barra; por otro lado, en la región interna está la ILR ($\Omega_p = \Omega - \kappa/2$), aquí la estrella gira más rápido que el patrón de barra y es en esta resonancia donde la estrella interactúa más fuertemente con el patrón global que en cualquier otra parte del disco, así, la ILR es clave para el entendimiento de la dinámica de barras; si las órbitas cerradas de la resonancia interna de Lindblad se acomodan de tal manera que producen un aumento de densidad pueden producir como se muestra en la figura 1.6 una espiral (izquierda) o una barra (derecha) cuyas órbitas precesionarán juntas al mismo valor de $\Omega - \kappa/2$ conservando así la espiral o barra. Aunque esto es meramente teórico, en realidad para conservar estas estructuras

de ondas de densidad se necesita que la gravedad mantenga las órbitas en precesión juntas (Kormendy et al. [2013]).

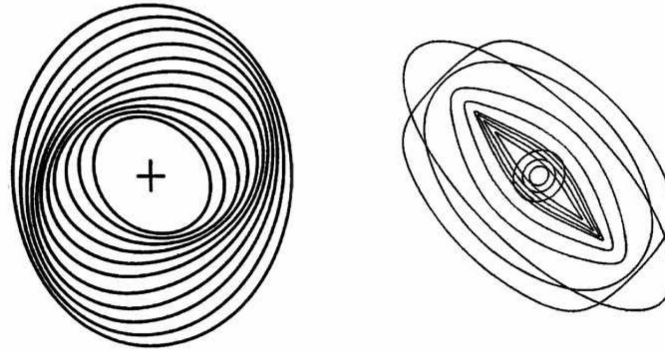


Figura 1.6: En la imagen de la izquierda se observan la alineación de órbitas ILR elípticas las cuales producen una onda de densidad en espiral que da lugar a los brazos espirales de una galaxia disco (Kalnajs [1973]). En el panel derecho vemos las órbitas de las familias principales que conforman una barra orientada en este caso a 45° (Englmaier and Gerhard [1997]).

Las barras estelares son los conductores más importantes de la evolución secular (Kormendy et al. [2013]) ya que durante su tiempo de vida pueden redistribuir el momento angular de los bariones y la materia oscura de una galaxia (Sellwood [1980], Holley-Bockelmann et al. [2005]). El momento angular emitido es debido principalmente al material estelar que será absorbido por el halo, bulbo (componentes esferoidales) y el disco (Athanassoula [2003]). Este intercambio de momento es el principal impulsor de la barra y su eficiencia depende de la distribución de masa y dispersión de velocidades. Una distribución de masa alta y una baja dispersión de velocidades (baja temperatura) favorecen la redistribución de momento angular (Sheth et al. [2012]). Esta redistribución también permite a las barras impulsar gas y estrellas a la región central de la galaxia teniendo como consecuencia la formación de pseudobulbos (Athanassoula [2005]) y la formación estelar en la región galactocéntrica (Pierre [1995], Khoperskov et al. [2018]).

La cantidad de barras encontrada en una muestra tiene una dependencia con la masa estelar, la cual es la propiedad física principal de las galaxias. Nair and Abraham [2010b], usando el catálogo presentado en Nair and Abraham [2010a] de ~ 14000 galaxias del SDSS Data Release

4 (DR4), encontró que el número de barras es una fuerte función de la masa estelar, con un aumento en la fracción de barras al incrementar la masa estelar de la galaxia. Esta fracción de barras también resulta muy sensible a la concentración central de las galaxias. El incremento de barras con la masa es también encontrada en diferentes trabajos como [Díaz-García et al. \[2016\]](#), [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#), [Zhao et al. \[2020\]](#). El comportamiento anterior se puede apreciar en la figura 1.7 tomada de [Roshan et al. \[2021\]](#), muestra la fracción de barras f_{bar} (definida en la expresión 1.3), como función de la masa estelar M_* para diferentes simulaciones de los proyectos IllustrisTNG y EAGLE, también muestra resultados observacionales del SDSS.

$$f_{\text{bar}} = \frac{\text{Número de galaxias barradas en la muestra}}{\text{Total de la muestra}}. \quad (1.3)$$

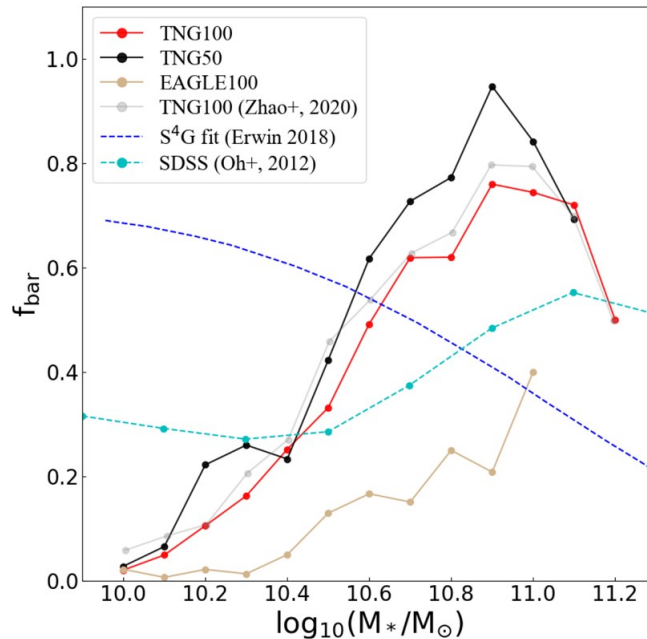


Figura 1.7: Evolución de barras como función de la masa estelar para diferentes simulaciones (IllustrisTNG y EAGLE) y datos observacionales del Sloan Digital Sky Survey ([Roshan et al. \[2021\]](#)).

Otro parámetro importante en las galaxias con barras es el espín del halo de materia oscura (λ). [Long et al. \[2014\]](#) usando simulaciones numéricas de galaxias aisladas con diferente

parámetro de espín, concluyó que al ir aumentando λ , el crecimiento de la barra se suprime durante la evolución secular. Esto debido a que al aumentar el parámetro de espín del halo, reduce su habilidad para absorber el momento angular de la componente estelar y así permitir el ralentizamiento del patrón de rotación de la barra y aumentar su longitud.

Algunos de los resultados presentados por [Long et al. \[2014\]](#) se muestran en la figura 1.8. En el panel superior observamos la variación de la amplitud de la barra A_2 (arriba) y del patrón de velocidades ω_b con respecto al valor de λ (abajo). Como se ve, un valor alto de espín acelera la formación de la barra en su fase dinámica, sin embargo, durante la fase secular la barra ya no crece. Su mayor crecimiento en esta segunda fase se observa para valores de espín más pequeños e incluso nulo (modelo $\lambda = 0$). El patrón de velocidades de la barra es menor para valores bajos de espín lo que indica que la barra tiene un menor período que le permite crecer como se dijo anteriormente.

En el panel inferior se presenta la tasa de flujo de momento angular para partículas del halo (arriba) y para partículas del disco (abajo) para 3 halos de $\lambda = 0.0, 0.03$ y 0.06 , denotados como P00, P30 y P60, respectivamente. El código de colores indica tasas de ganancia/pérdida (rojo/azul) de momento angular. Notamos que para el modelo P00, el halo actúa como un buen sumidero de momento angular, favoreciendo el crecimiento de la barra. Por otro lado, en el modelo de mayor valor de espín la ganancia de momento del halo disminuye significativamente.

Existen además, varios factores dentro de la galaxia que pueden estar correlacionados con la presencia de barras estelares, entre estos factores se encuentra el contenido de gas, giro del halo de materia oscura y la estructura interna de la galaxia. Primeramente tenemos que las barras presentan una dependencia con el contenido de gas ([Shlosman and Noguchi \[1993\]](#), [Berentzen et al. \[1998\]](#), [Villa-Vargas et al. \[2010\]](#)). Estudios con simulaciones de N-cuerpos como el [Athanassoula et al. \[2013\]](#) han demostrado que el gas tiene un efecto en la fuerza de la barra. Como se aprecia en las gráficas superiores de la figura 1.9, modelos ricos en gas poseen barras

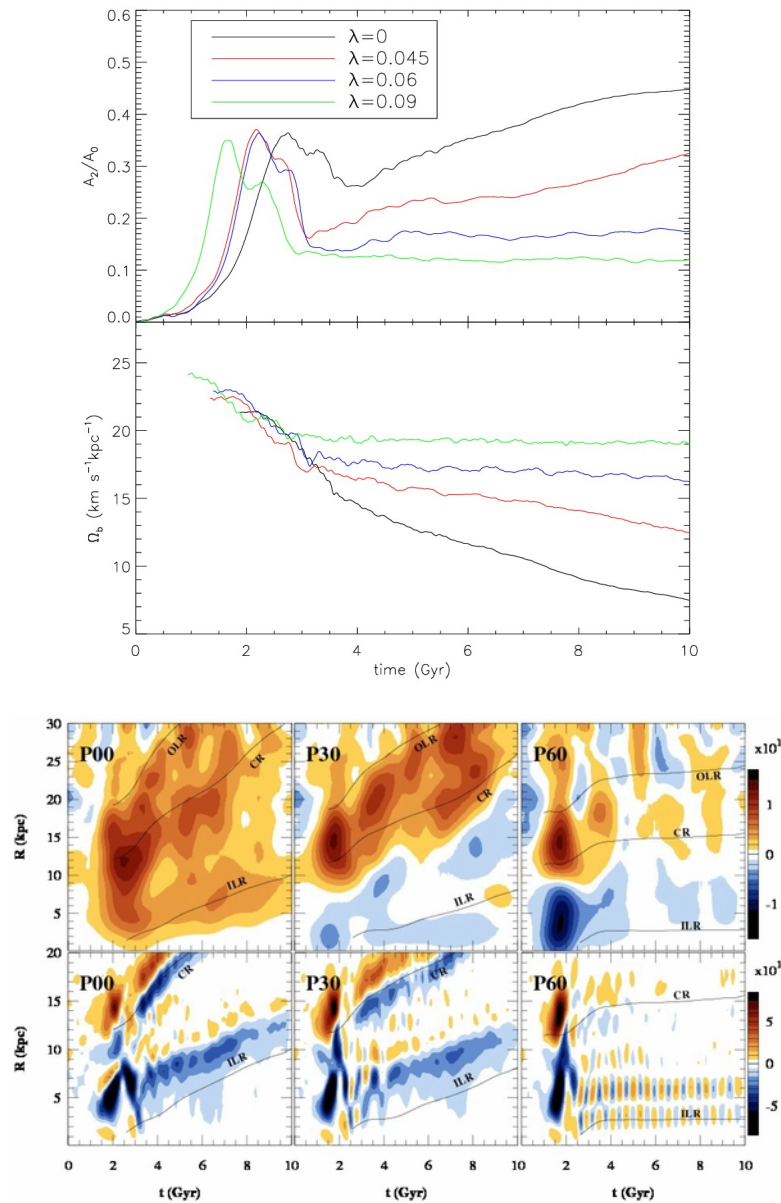


Figura 1.8: Panel superior: evolución de la amplitud de la barra A_2 (arriba) y de su patrón de velocidades ω_b (abajo) para modelos de galaxias con valores diferentes de espín del halo (λ). Panel inferior: Tasas de flujo de momento angular para el halo (arriba) y el disco (abajo). La paleta de colores corresponde a las tasas de ganancia/pérdida (rojo/azul) usando una escala logarítmica en color (Long et al. [2014])

más fuertes en comparación con aquellos con poco o nulo contenido de gas. Durante la evolución secular, para los modelos carentes de gas la evolución de la barra se da a un ritmo más lento.

Athanassoula et al. [2013] también presenta los efectos del gas en el crecimiento y evolución

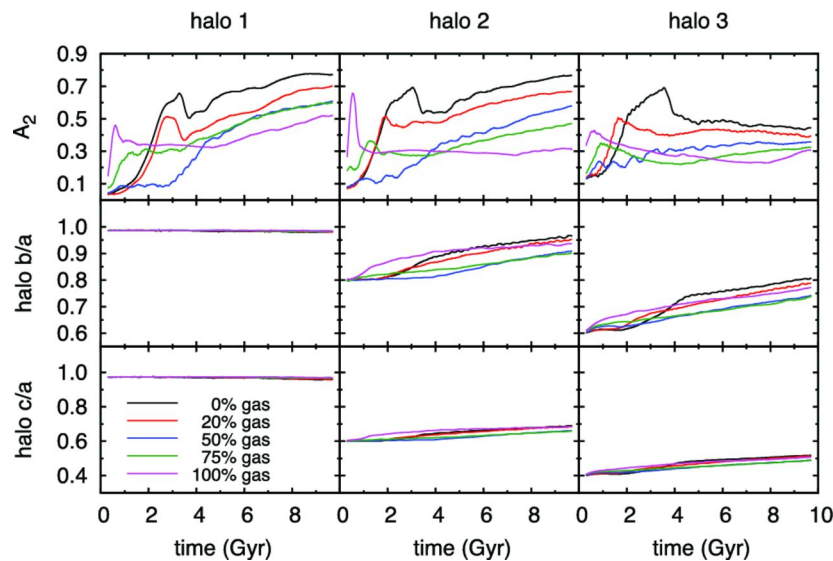


Figura 1.9: Evolución temporal de la fuerza de la barra A_2 (arriba), la relación axial del halo en el plano ecuatorial b/a (centro) y el aplanamiento del halo c/a (abajo) para tres halos con diferentes fracciones de gas (Athanasoula et al. [2013]).

de las barras que a veces pueden ser opuestos entre sí. Éstos son:

- i Dado que las componentes frías responden con más fuerza que las calientes y considerando que el gas es frío, se esperaría que las barras fuertes se formen en galaxias ricas en gas.
- ii Para simulaciones sin contenido de gas, el momento angular es emitido por las estrellas de la región de la barra y absorbido por el material del halo y el disco más externo, por lo que el momento del disco disminuye y el del halo aumenta en igual cantidad. De tener la presencia de un bulbo, éste también absorbería momento angular. Además, como el gas proporciona momento a la barra, dificulta su crecimiento. Así, la fuerza de la barra disminuye al aumentar el contenido en gas en la galaxia.
- iii La presencia de una concentración de masa central gaseosa (CMC, por sus siglas en inglés) masiva y compacta debilita la resistencia de la barra. Esta CMC se puede formar a partir de la barra cuando ésta empuja el gas hacia adentro de la galaxia.

iv Con respecto al efecto del disco delgado en la barra se encuentra que las simulaciones con más gas y estrellas jóvenes, tendrán una fracción mayor de su masa en un componente delgado, dando lugar a barras cortas y débiles.

Trabajos observacionales han encontrado resultados similares. Por ejemplo, [Masters et al. \[2012\]](#), tomando 2090 galaxias de disco del proyecto Galaxy Zoo 2 para estudiar el efecto del gas en galaxias fuertemente barradas, encuentra que las galaxias ricas en gas son más propensas a albergar barras fuertes, mientras que aquellas ricas en gas son no barradas o débilmente barradas. [Cervantes Sodi \[2017\]](#) también encontraron que la fracción de barras disminuye al aumentar la masa de gas, especialmente para barras fuertes. Por otro lado, la cantidad de barras débiles parece tener un ligero aumento conforme aumenta la masa de gas, tal como se muestra en la figura 1.10.

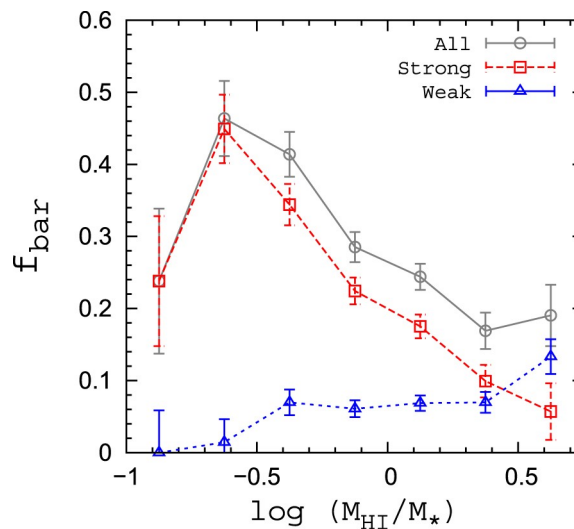


Figura 1.10: Fracción de barras como función de la fracción de masa de gas para barras fuertes (línea roja), débiles (línea azul) y barras totales (línea gris). Se aprecia que a mayor contenido de gas, las barras fuertes disminuyen considerablemente mientras que las barras débiles parecen tener un ligero aumento al incrementar la fracción de gas ([Cervantes Sodi \[2017\]](#)).

Con respecto al bulbo, el trabajo de [Masters et al. \[2011\]](#) mostró que existe un aumento en el número de barras en galaxias que presentan un bulbo más prominente. Aquí es importante

aclarar que existen dos tipos de protuberancias, por una parte tenemos los bulbos clásicos que existen en tiempos anteriores a la barra por lo que influirá en su formación y evolución, durante la fase dinámica de formación, el bulbo clásico ralentiza la formación de la barra; durante la evolución secular ayudan al crecimiento de la barra al absorber momento angular dando como resultado barras más fuertes ([Athanassoula and Misiriotis \[2002\]](#), [Athanassoula \[2003\]](#)). Por otro lado, los pseudobulbos discales (en forma de disco) se forman a partir de la barra durante la evolución secular por lo que éstos no pueden influir en su proceso de formación. Barras fuertes empujan más gas hacia adentro que resulta en bulbos discales más masivos.

Otra consecuencia de la presencia de gas en la galaxia tiene lugar durante la evolución de la barra estelar. Las barras fuertes tienden a sufrir una inestabilidad de pandeo o *Buckling instability* ([Combes et al. \[1990\]](#), [Athanassoula \[2016\]](#), [Smirnov and Sotnikova \[2019\]](#)), este período de inestabilidad fue detectado por simulaciones y provoca que la barra se debilite y engrose. También puede formar una estructura cuadrada/cacahuete en sus partes centrales. Se cree que el *Buckling instability* se relacionan con la inestabilidad vertical de las órbitas estelares que sostienen la barra ([Łokas \[2019\]](#)). [Collier \[2020\]](#) usando simulaciones de N cuerpos, encontró que la inestabilidad está dictada por las propiedades cinemáticas y la geometría de la barra y que un pandeo fuerte o violento no destruye las barras, mientras que uno más energético podría llegar incluso a disolver la barra. [Debattista et al. \[2006\]](#) y [Villa-Vargas et al. \[2010\]](#) han sugerido que este pandeo puede ser suprimido por la presencia de gas.

Como se ve, existen múltiples factores que pueden influir en el crecimiento de las barras estelares por lo que el objetivo del presente trabajo es justamente analizar qué factores son los que más influyen que la cantidad de barras encontradas en una muestra.

1.3.1 Estabilidad del disco: Criterio ELN.

Al ser las barras un factor importante en galaxias de disco, es importante saber si una galaxia es propensa a la formación de una barra estelar. Para esto es común usar lo que se conoce como el criterio ELN explicado a continuación.

En el trabajo realizado por [Efstathiou et al. \[1982\]](#) se estudió la estabilidad del disco galáctico contra la formación de barra, de aquí surge el criterio ELN expresado en términos de la velocidad máxima de rotación V_{\max} , la constante gravitacional G , la masa total del disco M_d y la longitud de escala del disco R_d , la expresión se puede ver en la ecuación 1.4 que corresponde a una medida de la autogravedad del disco.

$$\varepsilon = \frac{V_{\max}}{(GM_{\text{disk}}/R_d)^{1/2}}. \quad (1.4)$$

Esta expresión analítica simple ayuda a distinguir entre discos propensos a la formación de una barra y los que no lo son. Galaxias con valores $\varepsilon > 1.1$, poseen un componente caliente lo suficientemente grande como para estabilizar el disco, es decir, fueron estables frente a la inestabilidad de la barra. Por otro lado, galaxias con $\varepsilon < 1.1$ tienen discos estelares que se vuelven inestables ([Mo et al. \[1998\]](#)). Trabajos posteriores a [Efstathiou et al. \[1982\]](#) como los de [Debattista and Sellwood \[1998\]](#), [Dubinski et al. \[2009\]](#) y [Saha and Naab \[2013\]](#); se enfocaron en el papel que juega la materia oscura, en el proceso de formación de barras; incluyendo halos de DM que fueran capaces de interactuar dinámicamente con la estructura estelar. Una mayor concentración de halo desarrolla una barra más fuerte, grande y delgada en comparación con galaxias con una menor concentración de halo ([Athanassoula and Misiriotis \[2002\]](#)). Halos masivos albergan galaxias con las barras más fuertes mientras que los menos masivos presentan barras estelares débiles.

Para evaluar el desempeño del criterio ELN de inestabilidad del disco, [Izquierdo-Villalba](#)

et al. [2022] usó muestras de galaxias de disco fuertemente barradas y no barradas provenientes de las simulaciones TNG100 y TNG50 a un corrimiento al rojo $z = 0$. Concluyó que el criterio logra identificar con éxito el $\sim 75\%$ y $\sim 80\%$ de las galaxias fuertemente barradas y no barradas, respectivamente. Estos valores indican que el criterio ELN está vigente en la identificación de barras.

Una relación entre ε y el parámetro de espín es presentado por Cervantes Sodi et al. [2013] y se muestra en la ecuación 1.5:

$$\varepsilon^2 = \frac{\lambda_d}{\sqrt{2}f_d}, \quad (1.5)$$

donde f_d es la fracción de masa del disco en términos de la densidad de la superficie estelar.

Dado que la inestabilidad de barra en el disco ocurrirá si $\varepsilon < 1.1$, entonces esperamos encontrar un mayor número de barras a valores bajos de espín.

1.3.2 Efecto de las barras en las galaxias.

Como se ha visto, las barras son un factor clave en la evolución de las galaxias y pueden alterar varias de sus propiedades en escalas de tiempo cortas. Entre las propiedades que se ven afectadas por la presencia de una barra están la formación estelar, color, estructura galáctica (Athanassoula [1983]), composición química (Combes and Elmegreen [1993]) y tal como se mencionó con anterioridad, la formación de pseudobulbos.

De acuerdo con Hawarden et al. [1986], las barras podrían aumentar la tasa de formación estelar, teniendo luminosidades infrarrojas medias de $4.3 \times 10^{10} L_{\odot}$, más del doble comparado con galaxias no barradas que presentan luminosidades de $1.7 \times 10^{10} L_{\odot}$. Este fenómeno se puede atribuir a una región de formación estelar ubicada cerca de donde se acumula el material de flujo de entrada impulsado por barras. Estudios pioneros han sugerido que la presencia de

una barra no es garantía de una mayor SFR ([Martinet and Friedli \[1997\]](#), [Chapelon et al. \[1999\]](#)). Sin embargo, trabajos más recientes como el de [Lin et al. \[2017\]](#), quien usó el survey Calar Alto Legacy Integral Field Area (CALIFA), el cual contiene cerca de ~ 600 galaxias del universo local observadas en un rango de longitud de onda de $3700 - 7100 \text{ \AA}$ con espectroscopía de campo integral; analizó 57 galaxias espirales concluyendo que la barra, al impulsar gas al centro, desencadena la formación de estrellas en esta región y funciona como un canal para crecer/rejuvenecer a los pseudobulbos. Con respecto a la metalicidad también se han encontrado diferentes resultados. Estos resultados contradictorios se podrían deber a la morfología de la galaxia huésped o las características de la barra como su longitud y fuerza ([Elmegreen and Elmegreen \[1985\]](#), [Menéndez-Delmestre et al. \[2007\]](#)).

En [Vera et al. \[2016\]](#), se utilizaron datos observacionales del Sloan Digital Sky Survey Data Release y Galaxy Zoo para obtener una muestra de galaxias barradas (débiles y fuertes) y no barradas con el fin de analizar cómo difieren las propiedades de sus galaxias anfitrionas. En primer lugar, se encontró que una fracción importante de galaxias fuertemente barradas son de tipo SB0, es decir, galaxias lenticulares, por lo que de encontrar una barra en este tipo de galaxias, es muy probable que sea de tipo fuerte, esto es consistente con [Aguerri and González-García \[2009\]](#) y [Laurikainen et al. \[2009\]](#). Con respecto a sus poblaciones estelares, se encontró que galaxias no barradas presentan poblaciones de estrellas más jóvenes y tasas de formación estelar más altas, en comparación de las galaxias con barras que tienen poblaciones estelares viejas. Las barras débiles presentan tendencias intermedias entre las mencionadas anteriormente. Esto es una señal de que la barra podría estar acelerando el procesamiento del gas por lo que es natural pensar que galaxias barradas tendrán un menor contenido de gas. En el caso de galaxias ricas en gas, las barras llevan el gas a la región central y desencadena un estallido de formación estelar por lo que existe una evolución dinámica de las galaxias impulsada por barras ([Jogee et al. \[2005\]](#)), así, las propiedades de la galaxia y la barra se modifican en el

tiempo. [Spinoso et al. \[2016\]](#) usando la simulación hidrodinámica cosmológica ErisBH encontró que cuando la barra alcanza su máximo en longitud y fuerza y se da el estallido en la formación de estrellas, provoca que la región central de la galaxia (~ 2 kpc) se queda sin gas, cuando la región galactocéntrica ya se ha extinguido es más fácil para las observaciones identificar una barra prominente.

Con respecto al color, [Vera et al. \[2016\]](#) encontró que las galaxias con barras fuertes se agrupan principalmente en la región roja a diferencia de las galaxias con barras débiles o no barradas que abarcan más que nada la región azul. En el citado trabajo también se concluyó que la metalicidad es mayor en galaxias fuertemente barradas mientras que las barras débiles o galaxias sin barras presentan una distribución similar; esto indicaría que las barras fuertes aceleran el procesamiento del gas.

1.3.3 Métodos para determinar propiedades de las barras.

Las propiedades que caracterizan a una barra son tres: la longitud de la barra, la fuerza de la barra (bar strength) y la velocidad del patrón (speed pattern). A continuación, se explicarán los métodos más comunes que se usan como proxies de las dos primeras propiedades.

Longitud de la barra. Una de las características más importantes de una barra es su tamaño, cuyo valor está influenciado por la masa de la galaxia, su tamaño, contenido de gas y su grado de interacción con la componente esferoidal del halo. La longitud de la barra (l_{bar}) se vuelve importante cuando se quiere interpretar la frecuencia de barras en grandes muestras ya que barras cortas serán más difíciles de identificar, especialmente a mayores distancias. Para poder medir la longitud de la barra se utilizan diferentes técnicas, mencionando a continuación algunas de las más importantes y que están presentadas en [Peters and Kuzio de Naray \[2018\]](#).

- *Isofotas elípticas.* La luz de la galaxia se puede ajustar con isofotas (curvas que conectan

puntos con igual luminosidad). Con ellas se puede encontrar la barra analizando la excentricidad y sus ángulos de posición. En este método, para determinar la longitud de la barra se suele usar el radio de máxima elipticidad (Wozniak et al. [1995]) o el radio donde la elipticidad cambia discontinuamente como una indicación de que el final de la barra ha sido alcanzado (Aguerri et al. [2000]). Usando el radio donde se presenta el máximo en la elipticidad podría conducir a una subestimación en el tamaño de la barra mientras que elegir el radio de discontinuidad podría proporcionarnos una sobreestimación de la longitud de la barra (Aguerri et al. [2000]).

- *Perfiles de luz azimutal.* Otra forma de determinar l_{bar} es analizando el comportamiento de la luz en función del ángulo y el radio azimutales, lo que sería el perfil de luz azimutal. Estos perfiles en las partes más internas de una galaxia deberían ser constantes debido a la presencia del bulbo o el núcleo. Si existiese una barra en la galaxia, estos perfiles de luz deberían presentar dos “jorobas” con una separación de $\sim 180^\circ$ en un ángulo azimutal a todos los radios. Fuera de la barra si por ejemplo, hay dos brazos espirales, las jorobas comenzarían a moverse en diferentes ángulos ya que los brazos no están a un ángulo azimutal constante (Ohta et al. [1990]).

Finalmente, para medir la longitud de la barra se pueden ajustar gaussianas a cada joroba para medir el ángulo azimutal y la intensidad máxima, sabiendo que el ángulo debe ser de 180° y de intensidad similar, donde veamos que hay un cambio significativo en el ángulo se definirá como l_{bar} .

- *Análisis de Fourier.* Este método es ampliamente utilizado para medir a la barra. Consiste en descomponer perfiles de luz azimutal $I_r(\theta)$ mediante la transformada de Fourier:

$$\mathcal{F}(r) = \int_{-\pi}^{\pi} I_r(\theta) \exp(-2i\theta) d\theta, \quad (1.6)$$

donde los coeficientes de Fourier están expresados como:

$$A_m(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_r(\theta) \cos(m\theta) d\theta \quad \text{y} \quad B_m(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_r(\theta) \sin(m\theta) d\theta, \quad (1.7)$$

y las amplitudes son:

$$I_0(r) = \frac{A_0(r)}{2} \quad \text{y} \quad I_m(r) = \sqrt{A_m^2(r) + B_m^2(r)}. \quad (1.8)$$

Las amplitudes nos pueden servir para identificar la presencia de la barra y medir su tamaño. Dentro de la barra las amplitudes o modos $m = 2$ y $m = 4$ son más fuertes en comparación de otros (Ohta et al. [1990]); el modo $m = 2$ es usado comúnmente debido a que hay una correlación positiva entre su amplitud y la longitud de la barra (Durbala et al. [2009]). Para medir el tamaño de la barra se usan intensidades de barra I_b e interbarra $I_{i,b}$ (Aguerri et al. [2000]) donde la región de la barra se define cómo:

$$\frac{I_b}{I_{i,b}} > \frac{1}{2} \left[\left(\frac{I_b}{I_{i,b}} \right)_{\max} - \left(\frac{I_b}{I_{i,b}} \right)_{\min} \right] + \left(\frac{I_b}{I_{i,b}} \right)_{\min}, \quad (1.9)$$

donde:

$$I_b = I_0 + I_2 + I_4 + I_6 \quad \text{y} \quad I_{i,b} = +I_0 - I_2 + I_4 - I_6. \quad (1.10)$$

El último radio donde la condición de la ecuación 1.9 se cumple se toma como el radio de la barra. Aunque este método, como se encontró en Aguerri et al. [2000], tiende a dar un valor más alto de la longitud de la barra cuando se compara con otros métodos, parece ser que el uso del análisis de Fourier incluye brazos espirales además de la barra, dando como resultado barras más largas.

Fuerza de la barra. Anteriormente se han mencionado barras fuertes o débiles, esta

clasificación está directamente relacionada con la fuerza de la barra, la cual funciona como marcador de su potencial gravitacional. Este parámetro se clasificaba de acuerdo a la longitud y brillo de la barra (Vaucouleurs [1959]). Sin embargo, actualmente es posible cuantificarla mediante varios métodos. Por ejemplo, Buta and Block [2001] estableció que en una galaxia de disco barrada, el valor máximo de la relación entre la fuerza tangencial y la fuerza radial axisimétrica media, denotada como Q_b , proporciona una medida cuantitativa de la fuerza de una barra, aunque este método no mide la elipticidad ni la forma de la barra. La expresión de Q_b se da en la ecuación 1.11, donde Q_{bi} es el valor máximo del de la razón de los campos de fuerza medios radiales axisimétricos y tangenciales en el cuadrante i .

$$Q_b = \sum_{i=1}^4 \frac{Q_{bi}}{4}. \quad (1.11)$$

Otro método sería usar la elipticidad de las isofotas definida por Pierre [1995], en donde la fuerza de la barra está definido como $\epsilon_b = 10(1 - b/a)$ donde a y b son los semi ejes mayor y menor proyectados, respectivamente. Las barras fuertes muestran $\epsilon_b \approx 8$ mientras que los bulbos perfectamente esféricos presentan $\epsilon_b \approx 0$, la incertidumbre que presenta este método es de cerca del 20% (Aguerri [1999]). En Aguerri et al. [2000] se da otro método para medir la fuerza de la barra, definiéndola cómo se expresa en la ecuación 1.12:

$$S_b = \frac{1}{r_{bar}} \int_0^{r_{bar}} \frac{I_2}{I_0} dr, \quad (1.12)$$

donde r_{bar} es el radio de la barra, I_2 e I_0 son las amplitudes de Fourier para $m = 2$ y $m = 0$. Este método mide la prominencia de la barra en la galaxia.

Las fuerzas de las barras encontradas por este método se encuentran en el orden de 0.1. Peters and Kuzio de Naray [2018] encontró que para galaxias de bajo brillo (explicadas en la siguiente sección), las fuerzas de las barras usando este último método van de 0.13 a 0.29 donde

valores más pequeños indican barras débiles que son pequeñas y menos brillantes. Con respecto a las galaxias de alto brillo superficial, [Peters and Kuzio de Naray \[2019\]](#) encontró que tienen valores de fuerza de barra arriba de 0.37.

1.4 Galaxias LSB

Las galaxias LSB barradas serán nuestro objeto de estudio por lo que es importante mencionar las características generales de este tipo de galaxias y la formación de sus barras estelares.

Como se mencionó en la sección 1.1, las galaxias se pueden clasificar según su brillo superficial μ . En este trabajo adoptaremos, para la segregación, el valor límite propuesto por [Pérez-Montaño et al. \[2022\]](#) de $\mu(r) = 22 \text{ mag arsec}^{-2}$, galaxias por encima de este valor se definirán como galaxias de bajo brillo superficial (LSB/LSBs), de lo contrario se definirán como galaxias de alto brillo superficial (HSB/HSBs).

1.4.1 Características generales.

Las galaxias de bajo brillo superficial emiten mucha menos luz por área que las galaxias normales lo que las hacen difíciles de detectar. Sin embargo, en los últimos años, un gran número de investigaciones han ayudado a esclarecer nuestro entendimiento de este tipo de galaxias. La diferencia clave entre las LSBs y HSBs es que las galaxias de bajo brillo presentan una densidad de masa superficial estelar baja lo que resulta en su poca luminosidad que las caracteriza debido a la separación promedio entre sus estrellas. A pesar de esto, las LSBs abarcan todos los rangos de masa ([McGaugh et al. \[1995\]](#)), aunque la mayoría se encuentran a masas menores con respecto a las HSB ([Pérez-Montaño et al. \[2022\]](#)), como se aprecia en el histograma superior central de la figura 1.11. La importancia de estudiar estas galaxias es que estudios observacionales como el de [Impey and Bothun \[1997\]](#), han sugerido que una fracción significativa de la población de

galaxias son LSB. Las curvas de rotación obtenidas por [De Blok et al. \[2001\]](#) para las LSBs, indica que la materia oscura domina (DM) a todos los radios, pero con halos de DM menos densos que sus contrapartes más brillantes.

Otra característica de las galaxias LSB es que tienen una baja tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés). De hecho, su SFR por unidad de masa estelar es un factor de 10 menor que otras galaxias de la misma masa bariónica ([Schombert et al. \[2011\]](#)). Un resultado distinto se puede observar en la figura 1.11 donde se aprecia en el extremo superior derecho que la SFR entre LSBs y HSBs no difiere significativamente. Con respecto a su contenido en gas, las LSBs son más ricas en gas que las HSBs lo que sugiere que pueden ser sistemas relativamente no evolucionados. Sus densidades de gas están muy por debajo del umbral crítico de densidad para la formación de estrellas, lo que resulta en una baja tasa de formación estelar como se mencionó. También son pobres en su contenido de polvo ya que sólo existen algunas LSBs con componentes de polvo detectables ([Hinze et al. \[2007\]](#)) y generalmente sus discos parecen ser pobres en metales ([De Naray et al. \[2004\]](#)).

El medio ambiente en el que se desarrollan es localmente aislado de otras galaxias, cuando se tratan de galaxias espirales LSB gigantes. Otras morfologías de este tipo de galaxias como irregulares o enanas se encuentran tanto en medios poco como muy densos ([Honey et al. \[2018\]](#)). Las LSBs se desarrollan en los mismos progenitores que las HSBs en a un corrimiento $z > 2$ con fracciones de gas similares. Según [Martin et al. \[2019\]](#), la evolución de las galaxias de bajo brillo es mucho más rápida, especialmente a $z < 1$, lo que hace que diverjan evolutivamente de las galaxias de alto brillo superficial. La rápida formación estelar provoca una retroalimentación de supernova más concentrada que aplanan los perfiles de densidad de la componente gaseosa creando perfiles estelares más susceptibles a ser perturbados por fuerzas de marea de galaxias vecinas. Las mareas amplían las distribuciones estelares resultando en galaxias LSB gigantes difusas que también pueden ser pobres en gas; otro efecto de las mareas es el calentamiento

continuo del gas que apaga su formación estelar en $z = 0.25$.

En el trabajo reciente de [Pérez-Montaño et al. \[2022\]](#) se concluye que los parámetros de espín de los halos que albergan las HSB y LSB presentan una divergencia a $z \sim 2$ que resulta en los diferentes trayectos evolutivos de otras propiedades de estos tipos diferentes de galaxias. Los altos valores del momento angular específico estelar y el espín del halo serían los responsables de su naturaleza extendida, dado que las LSBs nacen en halos de espín alto, hecho que presentaron diversos pioneros como los de [Dalcanton et al. \[1997\]](#), [Mo et al. \[1998\]](#), [Jimenez et al. \[1998\]](#), entre otros. [Pérez-Montaño et al. \[2022\]](#) también confirma trabajos anteriores sobre las características generales de las LSB cuyas distribuciones se muestran en la figura 1.11, donde M_r es la magnitud absoluta en la banda r, M_* es la masa estelar total, r_{half} es el radio de la esfera que contiene la mitad de la masa estelar total, $r_{50,r}$ es el radio efectivo proyectado que contiene el 50% de la luminosidad en la banda r, SFR la tasa de formación estelar y sSFR la tasa específica. Como se aprecia en el segundo panel superior, las LSB se concentran principalmente a bajas masas mientras que las HSB abarcan un mayor rango; la SFR es insignificamente menor en las galaxias de bajo brillo y presentan radios r_{half} y $r_{50,r}$ mayores considerando que las LSB son más extendidas espacialmente que las HSB.

Como se mencionó del trabajo anteriormente citado, las LSBs son galaxias que presentan discos dispersos embebidos en halos de materia oscura de alto momento angular. Al conservarse el momento angular específico de los bariones e igualarse con el del halo de DM ([Fall and Efstathiou \[1980\]](#)), la longitud de escala del disco estará regulada por el espín del halo de materia oscura λ . Las LSBs presentan valores de $\lambda > 0.05$ según [Boissier et al. \[2003\]](#) y [Kim and Lee \[2013\]](#). Con estas características, las LSB son estables frente a inestabilidades de disco ([Mihos et al. \[1997\]](#)) por lo que estructuras como barras estelares son raras de encontrar en galaxias LSB, tal como encuentra [McGaugh and Bothun \[1993\]](#) que de una muestra 36 LSBs, únicamente 1 parece presentar una estructura de barra.

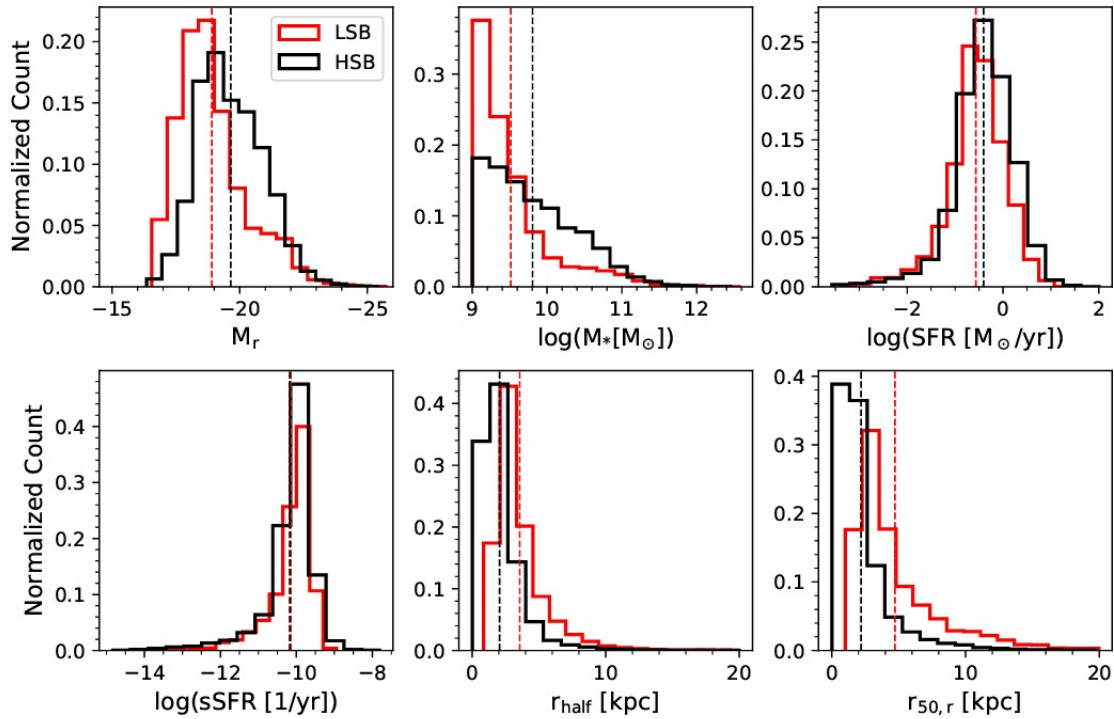


Figura 1.11: Distribuciones de los seis principales parámetros de las galaxias para HSBs y LSBs a $z = 0$, las líneas verticales corresponden a los valores promedios de cada parámetro (Pérez-Montaño et al. [2022]).

1.4.2 Barras en LSBs

Hasta ahora hemos visto que las barras en galaxias de bajo brillo superficial deberían ser raras dado que sus discos son estables frente a la formación de barras debido a la baja autogravedad del disco y su alto contenido de materia oscura (Mihos et al. [1997]). La cantidad de barras encontradas en LSBs es muy baja. Por ejemplo, Honey et al. [2016] encuentra una fracción de galaxias (f_{bar}) barradas del 8.3% para una muestra de 856 galaxias, mientras que el trabajo de Cervantes Sodi and Sánchez-García [2017] calcula una fracción del 20%. Cada uno de estos resultados resulta ser mucho menor a la fracción de barras encontrada para las galaxias de alto brillo que es de alrededor del 60% (Eskridge et al. [2000], Menéndez-Delmestre et al. [2007]). Esta diferencia se atribuye comúnmente a la diferencia en el contenido de gas en ambos tipos de

galaxias, siendo las LSBs más ricas en esta componente. Vale la pena preguntarse entonces cómo es que se da la formación de barras en galaxias de bajo brillo superficial teniendo características que pueden estar suprimiendo o ralentizando la formación y evolución de las barras.

[Mihos et al. \[1997\]](#), usando simulaciones numéricas para modelar un encuentro entre una galaxia LSB y una HSB, exploró la estabilidad dinámica de discos LSBs para analizar su respuesta a perturbaciones externas. Encontró que a pesar de que los discos de las LSBs son más estables contra la formación de barras, las colisiones podrían generar inestabilidades locales que desencadenaría formación de barras aunque en general, los discos de las LSBs son lo suficientemente estables como para generar y amplificar inestabilidades ya sea locales o globales. Por otro lado, [Mayer and Wadsley \[2004\]](#) encontró que para que las LSBs sean capaces de formar barras, éstas deben ser más masivas (en un factor de dos más alto) de lo que se cree. Un disco altamente gaseoso puede formar una barra si el halo tiene una concentración muy baja y la componente estelar más alta que la observada para galaxias de bajo brillo superficial. Las barras en estos modelos de LSB son notablemente más cortas que el radio de escala del halo, por lo que su contenido de momento angular es bajo y una vez formada la barra, ésta evoluciona hacia estructuras similares a bulbos en unos pocos giga años. Por lo tanto, una componente similar a un bulbo debería estar presente en cualquier LSB que se haya vuelto inestable en el pasado.

[Peters and Kuzio de Naray \[2018\]](#) estudiaron 4 galaxias LSB barradas encontrando que las galaxias de bajo brillo barradas presentan morfologías complejas y que pueden presentar barras dobles o espirales internas dentro de la región de la barra. En su estudio concluyen que la longitud de las barras en LSBs es comparable a las encontradas en las HSB de tipo tardío y que en general son más débiles aunque no de manera drástica.

Finalmente, [Cervantes Sodi and Sánchez-García \[2017\]](#) usó una muestra de galaxias provenientes del proyecto Galaxy Zoo 2 en donde reportan fracciones de galaxias barradas de del 20 % y 30 % para galaxias LSB y HSB, respectivamente. Esta diferencia se debe a la dependencia de

la fracción de barras con el brillo superficial central, galaxias más brillantes tendrán una mayor cantidad de barras. La diferencia de f_{bar} en LSBs y HSBs también se atribuyó al contenido de gas, al ser las galaxias de bajo brillo más ricas en gas, estas tendrán menor cantidad de barras por el efecto inhibitor del gas en la formación de barras. Otro parámetro al que se le atribuye la diferencia en la fracción de barras es al espín. Dado que las LSBs presentan parámetros de espín más altos que las HSBs, entonces el aumento de la fracción de barras con el brillo está impulsada por su anticorrelación con λ , es decir que f_{bar} disminuye al aumentar el espín (Cervantes Sodi et al. [2013]). Los altos valores de espín en LSBs hace que sus discos sean más dispersos y menos autogravitantes como para presentar inestabilidad de barra. Finalmente, las barras encontradas en las LSBs tienden a ser de menor tamaño que las encontradas en sus contrapartes de alto brillo.

Dado que el objetivo de este trabajo es estudiar y analizar las barras en LSBs en contraposición con las HSBs dentro de la simulación IllustrisTNG, es importante describir a grandes rasgos esta simulación. En la siguiente sección se explicará en qué consiste la simulación usada en este estudio. Posteriormente en la metodología se hablará de los catálogos requeridos para la construcción de nuestra muestra.

La simulación Illustris TNG

El proyecto IllustrisTNG (The Next Generation) ([Nelson et al. \[2018\]](#), [Naiman et al. \[2018\]](#), [Pillepich et al. \[2018a\]](#), [Marinacci et al. \[2018\]](#), [Springel et al. \[2018\]](#)), está conformado por un conjunto de simulaciones gravo-magneto-hidrodinámicas cosmológicas de formación de galaxias, que se ejecutan con el código AREPO, descrito y propuesto por [Springel \[2010\]](#). El código emplea un algoritmo de malla de partículas de árbol, con el fin de resolver la gravedad a través de la ecuación de Poisson; también emplea un esquema de volumen finito en una malla de Voronoi completamente dinámica para las ecuaciones de la magnetohidrodinámica ideal. Permite ajustar la resolución espacial de forma automática y continua, aspecto clave para simulaciones de crecimiento de estructuras cosmológicas.

IllustrisTNG es el sucesor de la simulación Illustris, descrita en [Vogelsberger et al. \[2014\]](#); [Genel et al. \[2014\]](#) y [Sijacki et al. \[2015\]](#). A diferencia de su predecesor, TNG incorpora un modelo actualizado de formación de galaxias que involucra mejoras en los procesos físicos que se desarrollan dentro de la simulación; también toma en cuenta el impacto de los campos

magnéticos en los procesos. Algunas de las mejoras puntuales que presenta IllustrisTNG en comparación con Illustris son: 1) incrementar el rango de masas de las galaxias simuladas, 2) adopción de un mejorado modelo numérico y astrofísico, 3) abordar las deficiencias identificadas de las simulaciones de Illustris (Nelson et al. [2015]).

TNG está esencialmente conformada por 3 simulaciones principales con diferentes volúmenes de 50 , 100 y 300 Mpc³ (figura 2.1), a los que se denominan TNG50, TNG100 y TNG300 respectivamente. Las simulaciones modelan la formación y evolución de galaxias dentro del paradigma Λ CDM (Pillepich et al. [2018a]), e incluyen un modelo de formación galáctica que se puede seguir a través del tiempo cósmico (Weinberger et al. [2016], Pillepich et al. [2018b]). Estas simulaciones resuelven la evolución acoplada de diversos objetos astronómicos tales como la materia oscura (DM, por sus siglas en inglés), gas cósmico, material estelar y agujeros negros supermasivos desde un corrimiento al rojo de $z = 127$, hasta el universo actual correspondiente a $z = 0$.

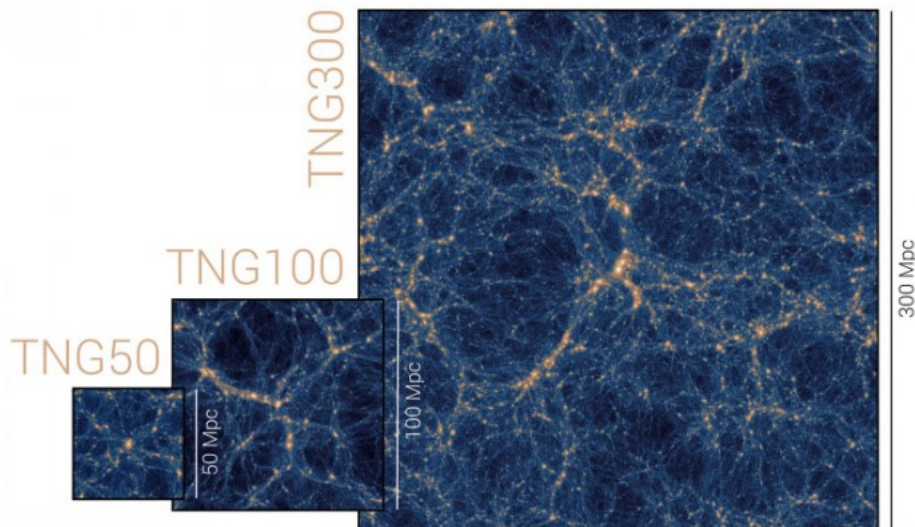


Figura 2.1: Representación de los tres volúmenes de simulación que conforman IllustrisTNG: TNG50, TNG100 y TNG300; como se aprecia, el nombre de cada una denota la longitud del lado de la caja en Mpc. Créditos: IllustrisTNG project.

Las tres simulaciones presentadas se complementan entre sí, lo que permite investigar diferentes aspectos de la formación de galaxias. Por un lado tenemos el volumen más grande, TNG300 que permite estudiar objetos raros y masivos, tales como los cúmulos de galaxias. La simulación de volumen más pequeño, denominada TNG50 nos proporciona una resolución 100 veces mejor que TNG300 y da una vista más detallada de las propiedades de las galaxias, así como de los fenómenos relacionados con el gas. Finalmente, la simulación TNG100 que se encuentra entre las dos anteriores, es útil para estudiar la evolución de las galaxias ya que tiene un equilibrio ideal entre el volumen y la resolución, especialmente para halos de masa intermedia. TNG100 también usa las mismas condiciones iniciales que el original Illustris (ajustada para la cosmología actualizada), por ello es posible hacer comparaciones entre los resultados de ambas simulaciones. En la figura 2.2 vemos una representación visual de las simulaciones TNG100 y TNG300 a $z = 0$.

Para TNG100 y TNG300 se tienen tres niveles de resolución y cuatro para TNG50. Las simulaciones de más alto nivel para cada volumen se definen como TNG50-1, TNG100-1 Y TNG300-1, las cuales incluyen 2×2160^3 , 2×1820^3 y 2×2510^3 elementos de resolución, respectivamente.

2.1 Cosmología empleada

Las simulaciones adoptan los parámetros cosmológicos de Planck ([Collaboration et al. \[2016\]](#)): $\Omega_{\Lambda,0} = 0.6911$, $\Omega_{m,0} = 0.3089$, $\Omega_{b,0} = 0.0486$, $\Omega_8 = 0.8159$ y $h = 0.6774$ donde $\Omega_{\Lambda,0}$, $\Omega_{m,0}$ y $\Omega_{b,0}$ son los parámetros de densidad de la energía oscura, materia y bariones en unidades de densidad crítica para un corrimiento al rojo de $z = 0$, Ω_8 es la raíz cuadrada de la varianza lineal y h es el parámetro de Hubble. Estas condiciones iniciales son consistentes con la autogravedad newtoniana, resuelta para un universo en expansión. Las ejecuciones de TNG incluyen procesos

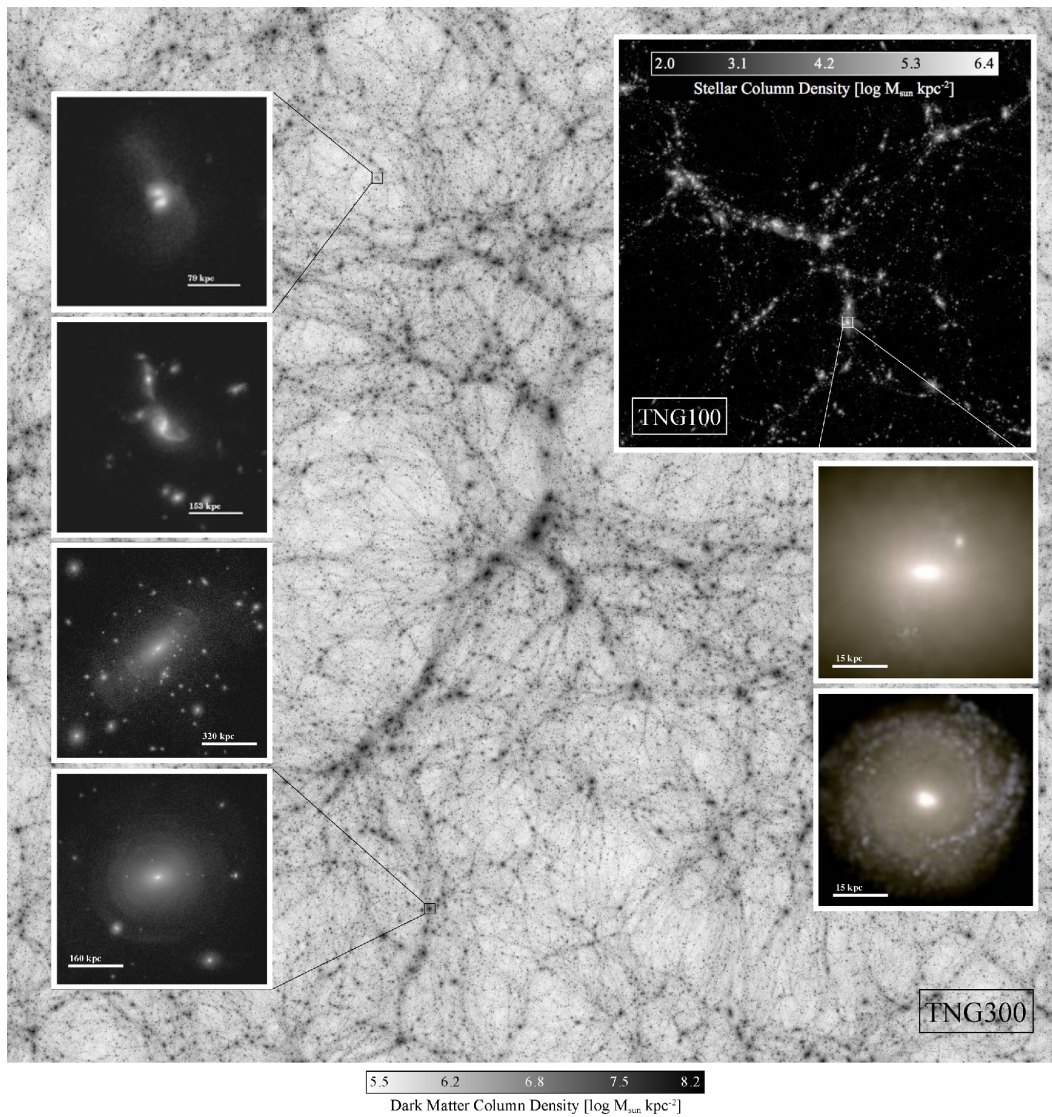


Figura 2.2: Representación visual del alcance y volúmenes abarcados en las simulaciones TNG100 y TNG300 de IllustrisTNG a $z = 0$, presentada en [Pillepich et al. \[2018a\]](#). El fondo representa el campo de densidad de materia oscura (DM) al lo largo del volumen de 300 Mpc, los recuadros a la izquierda muestran galaxias identificadas en TNG300 así como las interacciones galaxia-galaxia. En la esquina superior derecha de muestra la distribución de masa estelar en el volumen de 100 Mpc y debajo ejemplos de galaxias simuladas dentro de TNG100 con masa estelar superior a $10^{11} M_{\odot}$.

físicos adicionales ([Weinberger et al. \[2016\]](#); [Pillepich et al. \[2018b\]](#)) entre los que se encuentran:

- Formación de estrellas en el gas del medio interestelar (ISM) denso.
- Energía expulsada al ISM por las supernovas no resueltas, conocido como retroalimentación

por supervonas.

- Evolución de las poblaciones estelares, con el enriquecimiento químico asociado y la pérdida de masa. Toma en cuenta las estrellas tipo supernova (SN) Ia/II, AGB y las fusiones de estrellas de neutrones.
- Crecimiento y evolución de agujeros negros (BH, por sus siglas en inglés) supermasivos, así como su retroalimentación mecánica. Los agujeros negros liberarían energía en dos modos, a tasas grandes de acreción (lo que se denomina modo "quasar") y tasas bajas de acreción (modo "vientos cinéticos".)
- Campos magnéticos.

La simulación TNG es capaz también de reproducir varias propiedades de las galaxias observadas a $z = 0$ como la masa estelar, el contenido de gas dentro del radio virial, r_{500} , de grupos masivos, las relaciones de masa BH-galaxia, entre otras. El modelo también reproduce una amplia gama de galaxias inusuales, rastreando colas de población de galaxias, incluidas las galaxias de bajo brillo superficial ([Zhu et al. \[2018\]](#)) y medusas.

2.2 Identificación de halos y galaxias.

Dentro de la simulación, para poder identificar los halos, subhalos y sus propiedades se emplean los algoritmos FOF (Friends of Friends) y SUBFIND ([Davis et al. \[1985\]](#), [Springel et al. \[2001\]](#), [Dolag et al. \[2009\]](#)) en cada una de las 100 instantáneas o snapshots almacenadas desde $z \sim 20$ hasta $z = 0$.

El algoritmo FOF es una herramienta usada comúnmente para identificar grupos de partículas en una simulación, se puede usar, por ejemplo, para identificar halos en una simulación cosmológica. Trabaja mediante el parámetro denominado *longitud de enlace* (l), exige que cualquier partícula que encuentra a otra dentro de una determinada distancia l , se vincule a

ella para formar un grupo. Así, una partícula estará vinculada directamente a todas las demás dentro de l (sus amigos) e indirectamente a todas las partículas a las que están vinculadas sus amigos (sus amigos de amigos o FOF); con esto se crean redes de partículas enlazadas que se denominan grupos y cuyo tamaño es el número de partículas que contiene. Dentro del algoritmo, se puede establecer un umbral mínimo de partículas para denominar un grupo y aquellos por debajo de este umbral se descartan. Por otro lado, el algoritmo SUBFIND (desarrollado por [Springel et al. \[2001\]](#)), se usa para identificar la subestructura dentro de los grupos formados en las simulaciones, el algoritmo define los “subhalos” como grupos de partículas autoligados localmente.

A partir de lo anterior, la simulación considera como *galaxia* a cualquier subhalo luminoso, es decir, a cualquier objeto ligado gravitacionalmente con una componente estelar que sea distinta de cero, como se menciona en [Pillepich et al. \[2018a\]](#). Primero se ejecuta un buscador de halos FOF, usando una longitud de enlace de $l = 0.2$ (en unidades de la separación media entre partículas), dentro de los cuales se ubican y caracterizan jerárquicamente las subestructuras ligadas gravitacionalmente (galaxias); por debajo de este umbral las partículas no se consideran asociadas. El catálogo de objetos SUBFIND incluye subhalos centrales y satélites. La definición de grupos y cúmulos galácticos, galaxias centrales y satélites se presentan en la tabla 2.1 y provienen del trabajo de [Pillepich et al. \[2018a\]](#), donde se toma como radio virial R_{200c} ó R_{500c} que incluye materia oscura, gas, estrellas y agujeros negros.

2.3 La simulación TNG100

Como se mencionó previamente, IllustrisTNG está conformada por 3 volúmenes principales: 50 , 100 y 300 Mpc³ denominados TNG50, TNG100 Y TNG300 de acuerdo a la longitud de un lado de la caja en la cual se desarrollan. En el presente trabajo se usará específicamente la

Cuadro 2.1: Definiciones de grupo y cúmulo de galaxias, galaxia central y satélite usada dentro del contexto de la simulación IllustrisTNG.

Nombre	Definición
Grupos y cúmulos de galaxias	Objetos con una masa de halo de sobredensidad esférica total de $10^{13} M_{\odot}$.
Galaxia central	Galaxia en el mínimo de potencial de un grupo o cúmulo, éste no está dentro del radio virial de un halo más grande. Su masa estelar se obtiene de sumar todas las masas de partículas estelares dentro de aperturas fijas, por ejemplo de 10, 30, 100 kpc físicos o comóviles.
Galaxia satélite	Cualquier galaxia dentro del radio virial de una central. Su masa estelar se define como la suma de la masa de todas las partículas estelares que están unidas gravitacionalmente según el algoritmo SUBFIND.

simulación intermedia TNG100 con un volumen exacto de 110.7^3 Mpc^3 a un corrimiento de $z=0$; las características generales de la simulación se muestran en la tabla 2.2.

La motivación de usar en específico esta simulación es que ofrece una gran relación entre volumen cosmológico y resolución que nos permitirá el estudio de la evolución de las galaxias así como sus componentes morfológicas. Entre estas componentes se encuentra la barra estelar, tema central del presente trabajo. TNG100 tiene un límite de resolución por debajo del kilopársec, lo que permite resolver el tamaño de las barras en el universo cercano. Los valores típicos observados de la longitud de la barra se presentan en el trabajo de Erwin [2019] y se muestran en la figura 2.3, donde podemos ver que los valores se encuentran alrededor de 1 kpc por lo que no tendremos problemas en resolver las barras de nuestra muestra detallada más adelante.

Por lo mencionado anteriormente, TNG100 nos ayudará a entender la naturaleza de las galaxias barradas, su formación y evolución, a través del análisis de sus diferentes parámetros. Además, es usando TNG100 que se han obtenido catálogos que describen las barras galácticas, éstos son: el catálogo de Rosas-Guevara et al. [2020] y Zhao et al. [2020] que serán explicados en la siguiente sección.

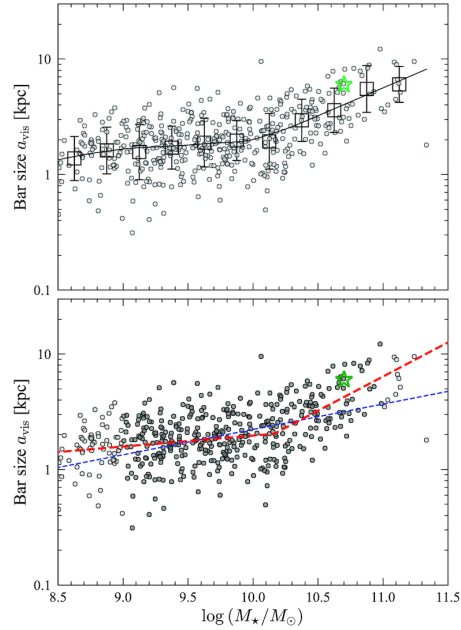


Figura 2.3: Valores típicos de la longitud de la barra presentados en [Erwin \[2019\]](#). En ambos paneles se presentan los tamaños del semi eje mayor de la barra como función de la masa estelar así como diferentes ajustes.

Cuadro 2.2: Principal información sobre la simulación TNG100 donde se presenta (de arriba a abajo) el volumen de la simulación, la longitud de la caja, número de elementos resolubles de gas y materia oscura (DM) y masa inicial de celdas de gas y partículas de DM.

Propiedad	Unidades	TNG100
V	[Mpc ³]	110.7 ³
L_{box}	[Mpc/h]	75
N_{GAS}	-	1820 ³
N_{DM}	-	1820 ³
m_{GAS}	[M_{\odot}]	1.4×10^6
m_{DM}	[M_{\odot}]	7.5×10^6

Metodología

3.1 Catálogo TNG100

Dentro del proyecto IllustrisTNG existen dos tipos de *snapshots* o instantáneas denominadas “completas” y “mini”. Aunque ambas abarcan todo el volumen, las denominadas “mini” sólo tienen un subconjunto de campo de partículas disponible mientras que las completas contienen todos los subconjuntos (Nelson et al. [2019]). TNG está conformado de 80 snapshots mini y 20 consideradas completas las cuales se presentan en la tabla 3.1.

Dentro de la lista de las consideradas completas se encuentra la que se usará como catálogo base para nuestros análisis, esta es la instantánea 99 a un corrimiento al rojo de $z = 0$ y donde se encuentran los subhalos identificados como galaxias. Para cada snapshot se tienen cinco grupos correspondientes a los diferentes tipos de partículas presentes en la simulación:

- PartType0: Gas
- PartType1: Materia Oscura

Cuadro 3.1: Lista de las 20 instantáneas completas de IllustrisTNG, cada una presenta el número de snapshot, el factor de escala correspondiente y su corrimiento al rojo.

Snap	a	z	Snap	a	z
2	0.0769	12	33	0.3333	2
3	0.0833	11	40	0.4	1.5
4	0.0909	10	50	0.5	1
6	0.1	9	59	0.5882	0.7
8	0.1111	8	67	0.6667	0.5
11	0.125	7	72	0.7143	0.4
13	0.1429	6	78	0.7692	0.3
17	0.1667	5	84	0.8333	0.2
21	0.2	4	91	0.9091	0.1
25	0.25	3	99	1	0

- PartType2: Sin uso
- PartType3: Partículas trazadoras
- PartType4: Estrellas y partículas de viento
- PartType5: Agujeros negros

Para el snapshot correspondiente tenemos un total de 4,371,211 galaxias y para cada uno de estas podemos encontrar diferentes parámetros tales como la tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés), su masa (ya sea contando todas las partículas o por tipo), momento angular específico entre otros tantos datos que ayudan a caracterizar cada galaxia a partir de sus parámetros físicos. Para referirnos a un subhalo en específico se usa el ID que corresponde a la indexación de la galaxia dentro de nuestro arreglo de más de 4 millones de elementos. Así, con el índice correspondiente podemos seleccionar únicamente las galaxias que nos interesan.

3.2 Catálogos suplementarios

Para la simulación TNG100 hay dos catálogos disponibles en la literatura que describen la presencia y propiedades de las barras galácticas, tema al que está dirigido este trabajo. Estos

son los catálogos de [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#) y [Zhao et al. \[2020\]](#) descritos a continuación.

3.2.1 Catálogo de Rosas-Guevara et al. [2020]

Este estudio se concentra en galaxias de disco dominante que posean suficientes elementos de resolución (más de 10^4 partículas estelares dentro del radio de media masa) para así poder estudiar los diferentes componentes morfológicos como discos, bulbos y barras. Para seleccionar la muestra inicialmente se tomó un rango en masa de $10^{10.4} - 10^{11} M_{\odot}$, haciendo este corte en masa se encontraron 2,500 galaxias. Para identificar galaxias de disco se usó la descomposición cinemático bulbo a disco del catálogo de [Genel et al. \[2015\]](#) (explicado más adelante) que define el parámetro de circularidad cómo:

$$\epsilon = \frac{J_z}{J(E)}, \quad (3.1)$$

donde J_z es el momento angular específico de la partícula al rededor de los ejes de simetría y $J(E)$ es el máximo momento angular específico posible de cada partícula estelar. La masa del disco estelar está basado en las partículas estelares con, $\epsilon > 0.7$ mientras que la masa del bulbo está definida como dos veces las masas de partículas estelares con $\epsilon < 0$; considerando estos parámetros se encontraron más de 300 galaxias disco. Por último, para llegar a la muestra final, el trabajo de Rosas-Guevara et al. se interesó específicamente en galaxias con morfología bien definida, por lo que sólo se seleccionaron aquellas con $D/T + B/T > 0.7$, donde D/T es la relación masa disco estelar-total y B/T la relación masa bulbo-total. Para tomar galaxias de disco dominante únicamente, se consideran aquellas con $D/T \geq 0.5$, llegando a una muestra final de 270 galaxias de las cuales 213 son centrales (las más masivas del grupo al cual pertenecen) y 57 son consideradas como satélites.

Las galaxias se clasificaron por su tipo de barra, ya sea si presentan barras fuertes, débiles o

si no tienen barras. Para la identificación de la barra en la galaxia se usó la descomposición de Fourier de la densidad superficial estelar teniendo una vista frontal del objeto y calculando así, la razón entre el segundo término y el término cero de la descomposición, A_2 cuya expresión se muestra en la ecuación 3.2:

$$A_2(R) = \frac{|\sum_j m_j e^{2i\theta_j}|}{\sum_j m_j}, \quad (3.2)$$

donde m_j es la masa de la j -ésima partícula y θ_j es la coordenada angular en el plano galáctico.

Se tomó como fuerza de la barra el valor más alto de este parámetro al que se le denominó $A_{2,max}$ y que se alcanza en la ubicación tomada como la longitud de la barra (Rosas-Guevara et al. [2020]). También se aseguró que la fase del modo $m = 2$, $\Phi(r)$, sea constante dentro de la extensión de la barra,

$$\Phi(r) = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{\sum_j m_j \sin(2\theta_j)}{\sum_j m_j \cos(2\theta_j)} \right]. \quad (3.3)$$

Usando las cantidades antes mencionadas se definió una galaxia como barrada si $A_{2,max} \geq 0.2$, $r_{bar} > 1$ kpc y $\Phi < r_{bar}$.

Finalmente, se dividió la muestra total en tres submuestras:

- Fuertemente barradas: $A_{2,max} \geq 0.3$.
- Débilmente barradas: $0.2 < A_{2,max} \leq 0.3$.
- No barradas: Todas las galaxias restantes.

En la figura 3.1 se presentan ejemplos de una galaxia fuertemente barrada y una no barrada con sus perfiles radiales de A_2 ; también se muestran los perfiles acumulativos de A_2 ($A_{2,tot} = A_2(< R)$) y su fase como referencia. El término r_{max} indica el radio donde el pico de A_2 es alcanzado mientras que r_Φ es el radio dentro del cual la fase de A_2 permanece constante,

ambos radios se han utilizado en la literatura como sustitutos alternativos para la longitud de la barra. Se puede apreciar claramente que la descomposición de Fourier de las dos galaxias es muy diferente, la galaxia en el panel superior presenta un perfil de A_2 típico de una galaxia con barra, mientras que la del panel inferior no exhibe una estructura de barra. En los paneles centrales observamos mapas de densidades estelares vistas de frente de ambas galaxias. A la derecha están los paneles que muestran las galaxias, nuevamente de frente, simuladas por Nelson et al. [2018] para los filtros JWST NIRCcam F200W, F115W, y F070W.

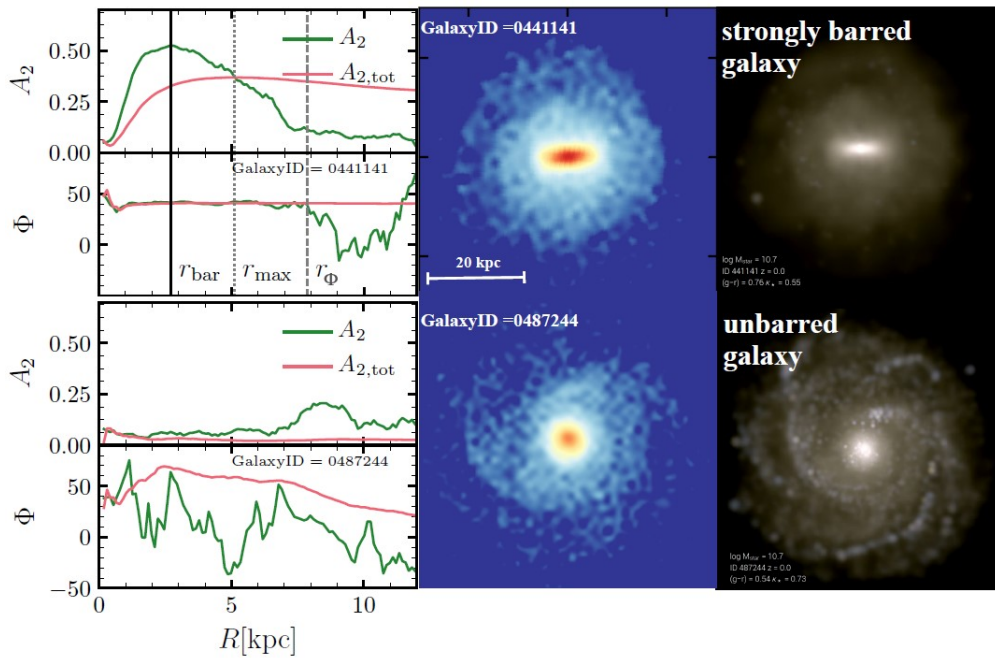


Figura 3.1: Ejemplo de una galaxia fuertemente barrada (arriba) y una no barrada (abajo) con una masa estelar similar ($\sim 10^{10.7} M_{\odot}$) presentadas en Rosas-Guevara et al. [2020]. Arriba a la izquierda tenemos en el panel superior, el perfil A_2 para la descomposición de Fourier de la densidad superficial de estrellas con una vista frontal (línea verde) así como su distribución acumulada $A_{2,tot}$ (línea roja); en el panel inferior tenemos los perfiles correspondientes de la fase Φ . La línea vertical continua nos señala el lugar donde se da el pico de A_2 y se usa como proxy para la longitud de la barra (r_{bar}), la línea punteada señala r_{max} que es donde se tiene el pico de $A_{2,tot}$, finalmente la línea discontinua nos marca r_{Φ} donde A_2 permanece constante. Para la gráficas de la galaxia inferior, a la izquierda se tienen gráficas similares pero para una galaxia no barrada. Los paneles centrales corresponden al mapa de densidad de superficie estelar vista de frente para ambos tipo de galaxia. Arriba y abajo a la derecha tenemos imágenes simuladas en diferentes filtros mencionados en el texto.

Con la clasificación anterior, se encontraron un total de 107 galaxias barradas de las cuales 59 presentan barras fuertes y 48 son de barras débiles de formación reciente. Así, de la muestra total de galaxias de disco, el 40 % son barradas siendo un 22 % con barras fuertes y un 18 % con barras débiles. En el panel superior de la figura 3.2 observamos la fracción de barras en función de la masa estelar presentada por [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#). En el panel inferior se presenta la reproducción de la misma gráfica obtenida usando este mismo catálogo. En este trabajo denotaremos de aquí en adelante, a la fracción de barras como f_{bar} y definida anteriormente en la ecuación 1.3.

Al calcular las fracciones de barras de manera independiente obtenemos que de toda la muestra, el 39.6 % es barrada de los cuales 21.8 % es fuertemente barrada (strong bars) y 17.7 % presenta barra débil (weak bars), como vemos las cantidades son prácticamente iguales. La f_{bar} total de toda la muestra es consistente con trabajos previos que han encontrado una fracción entre 30 % y 52 % ([Barazza et al. \[2008\]](#), [Nair and Abraham \[2010b\]](#), [Cervantes Sodi et al. \[2015\]](#)). Observando la Figura 3.2 notamos a primera vista que a mayor masa estelar en la galaxia tenemos un aumento en f_{bar} considerable, este comportamiento es consistente con trabajos recientes como el de [Roshan et al. \[2021\]](#) donde se presenta la fracción de barras como función de la masa para diferentes simulaciones de IllustrisTNG. También observamos que a masas bajas, tenemos una fracción similar de galaxias fuertes y débiles, la diferencia se va haciendo más marcada al considerar galaxias más masivas donde vemos que predominan mayormente las barras fuertes en comparación de las débiles.

Además de f_{bar} , en este trabajo también se buscó analizar la evolución de la fuerza y la longitud de la barra a través del tiempo para así determinar cuándo la barra comienza a ser una característica dinámica de la galaxia y a partir de esto, establecer la edad de la barra t_{bar} que se define como el tiempo retrospectivo t_{lookback} en el que se cumplen las siguientes condiciones:

- $A_{2,max}(t_{\text{lookback}}) \geq 0.2$ para $t_{\text{lookback}} < t_{\text{bar}}$

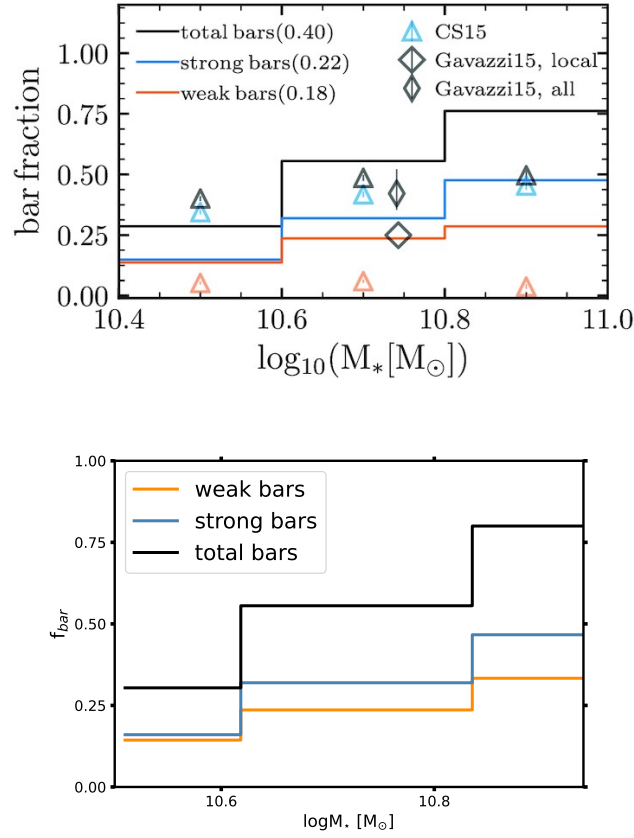


Figura 3.2: Comparación de la fracción de barras como función de la masa estelar. En el panel superior se presenta el obtenido por [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#) y en el inferior la reproducción del mismo cálculo para barras fuertes y débiles.

- $| (A_{2,max}(t_{bar}) - A_{2,max}(t_{bar} - \Delta t)) / A_2(t_{bar}) | < 0.4$ donde $\Delta t \sim 300$ Myrs corresponde al tiempo transcurrido entre la salida cuando la barra se forma y dos salidas anteriores de la simulación.

La primera condición asegura que la barra es una característica estable mientras que la segunda nos ayuda a establecer el tiempo en el que la barra es estable y ya no es un componente transitorio sujeto a fuertes fluctuaciones. En la figura 3.3 podemos observar t_{bar} como función de la masa estelar para galaxias fuerte y débilmente barradas, en donde vemos que la edad de la barra aumenta al aumentar M_* , mientras que las barras débiles son de formación reciente.

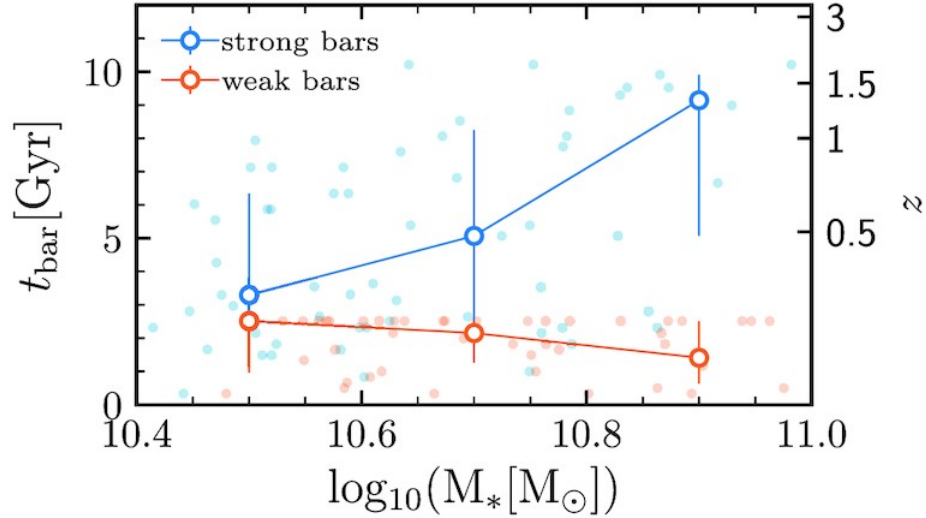


Figura 3.3: Valores medianos de la edad de la barra t_{bar} como función de la masa estelar M_* para la muestra de barras fuertes y débiles presentada en [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#)

Este catálogo es muy valioso porque nos permite observar cómo se comporta la fracción de barras con la masa estelar de las galaxias haciendo una segregación en galaxias con barras fuertes y prominentes y débiles. También nos deja ver la evolución de la edad de la barra con la M_* en la etapa en la que es estable (condición de t_{bar}). Sin embargo, debido al tamaño reducido de la muestra no sería ideal su uso para los fines del presente trabajo debido a que de las 270 galaxias, únicamente 61 son de bajo brillo superficial, las restantes 201 se consideran HSB.

3.2.2 Catálogo de Zhao et al. [2020]

En [Zhao et al. \[2020\]](#) se tomaron 6507 galaxias de la simulación TNG100 a $z = 0$ con masas estelares $M_* \geq 10^{10.0} M_\odot$ calculadas dentro de un radio de 30 kpc, con este criterio tendremos suficientes partículas estelares ($> 10^4$) para resolver su estructura. También se usó el valor del parámetro $k_{\text{rot}} = v_\phi^2/v^2$ que mide la fracción entre la velocidad azimutal y la total de cada partícula estelar dentro del mismo radio para definir galaxias de disco las cuales tendrían un valor de $k_{\text{rot}} \geq 0.5$ (las galaxias con valor $k_{\text{rot}} = 1/3$ serían para galaxias esferoidales no tomadas

en cuenta). Considerando la condición en k_{rot} se obtuvo una muestra principal de 3,866 galaxias correspondiente al 59% de todas las galaxias en este rango de masas.

Para la detección de la barra en la muestra de Zhao et al. 2020 se usó el método de ajuste de elipse que, como se mencionó, consiste en ajustar elipses a los contornos de isodensidad mirando frontalmente a las galaxias, midiendo así la elipticidad (ϵ), el ángulo de posición (PA) y la densidad superficial. Para considerar la presencia de una barra estelar en la galaxia se toma $\epsilon > 0.25$ y el PA debería variar $< 10^\circ$. Además del ajuste de elipses, también se inspeccionó visualmente las imágenes para asegurar morfologías razonables de galaxias barradas, de este análisis se encontró que $\sim 3\%$ de las galaxias están clasificadas erróneamente como barradas, cuando en realidad se trata de estructuras irregulares en las regiones internas de la galaxia por lo que fueron excluidas para evitar contaminar la muestra de galaxias con barras. Análisis de elipticidad y PA se presentan en la Figura 3.4 donde vemos dos ejemplos de galaxias barradas y una no barrada; en las galaxias del centro y derecha se nota una clara estructura de barra y una poca variación en el ángulo de posición a diferencia de la galaxia no barrada. En este trabajo se consideró una barra fuerte si $\epsilon \geq 0.4$, debajo de este valor se considera débil.

Para poder medir el tamaño de la barra estelar se emplearon dos métodos que estiman su eje semi-mayor. El primero es usando el radio $R_{0.85\text{max}}$ donde ϵ se reduce al 85% del valor máximo, Martínez-Valpuesta et al. [2006] sugirió que $R_{0.85\text{max}}$ puede ser usado como estimador confiable del tamaño de la barra. El segundo método usa el valor de R_{max} definido como el radio a ϵ_{max} , este valor es comúnmente usado, aunque diversos estudios teóricos y observacionales han sugerido que R_{max} en realidad es una sobreestimación del tamaño real de la barra estelar. En TNG100, $R_{0.85\text{max}}$ es estadísticamente más grande que R_{max} por ~ 0.14 dex, con una relación de mejor ajuste encontrada tal que $R_{0.85\text{max}} = 0.96R_{\text{max}} + 0.14$.

Entre los cálculos presentados en el trabajo de Zhao se encuentran la fracción de galaxias barradas como función de la masa estelar, tal como se puede observar en el panel izquierdo de la

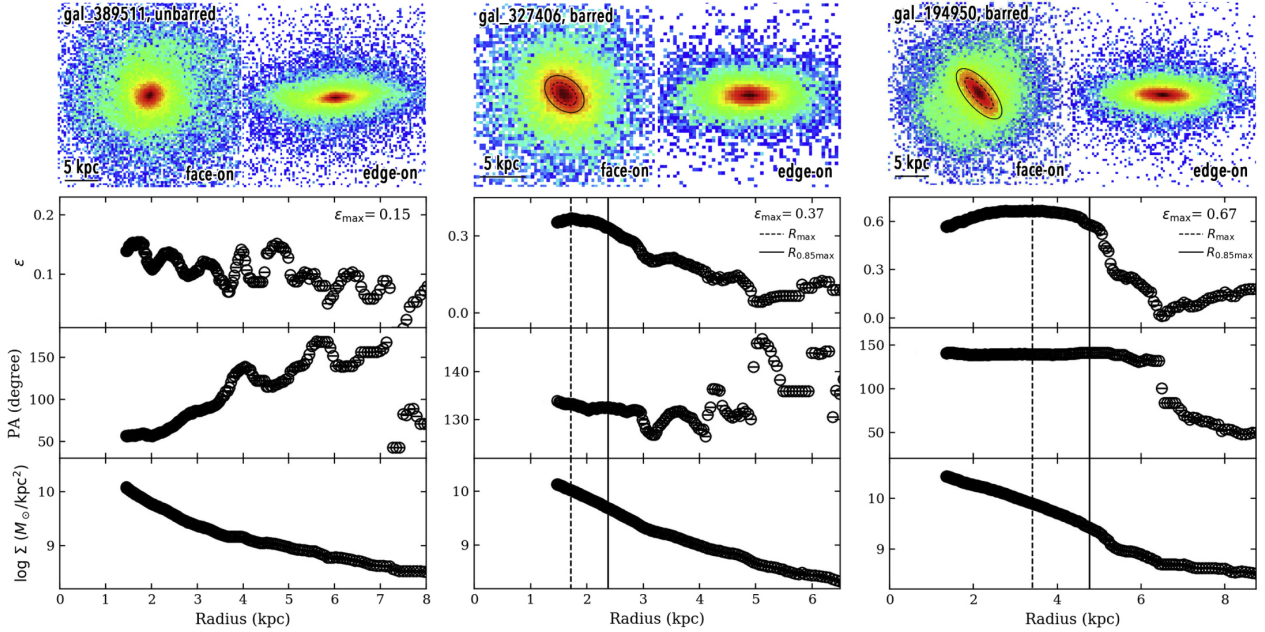


Figura 3.4: Ejemplo de galaxia no barrada (izquierda), galaxia débilmente barrada (centro) y fuertemente barrada (derecha) presentadas por Zhao et al. [2020]. Todas fueron identificadas por el análisis de contornos de isodensidad elípticos y usando los mapas de densidad frontales de las galaxias en TNG100. También se presenta en los paneles inferiores, los perfiles de elipticidad ϵ , ángulo de posición PA y densidad de masa superficial.

figura 3.5, con un incremento sistemático de f_{bar} al aumentar M_* , en sintonía con los resultados de Rosas-Guevara et al. [2020]. Es importante hacer notar que el mayor incremento de f_{bar} ocurre en el rango de $10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$, mientras que por encima de este rango, la fracción de barras permanece casi constante, con una $f_{\text{bar}} \approx 0.5 - 0.6$. Estos resultados son consistentes con el trabajo de Zhou et al. [2020] que usa una muestra similar a la de Zhao, pero empleando el método de Fourier, el cual es menos sensible para la detección de barras que el de ajuste por elipses, lo que produce que las fracciones de galaxias barradas encontradas por Zhou et al. sean entre 10% y 20% menor a las de Zhao.

En el panel derecho de la figura 3.5 presentamos la reproducción de la gráfica de Zhao empleando nuestra muestra, cuya construcción se detalla más adelante en este mismo capítulo en la sección 3.3.

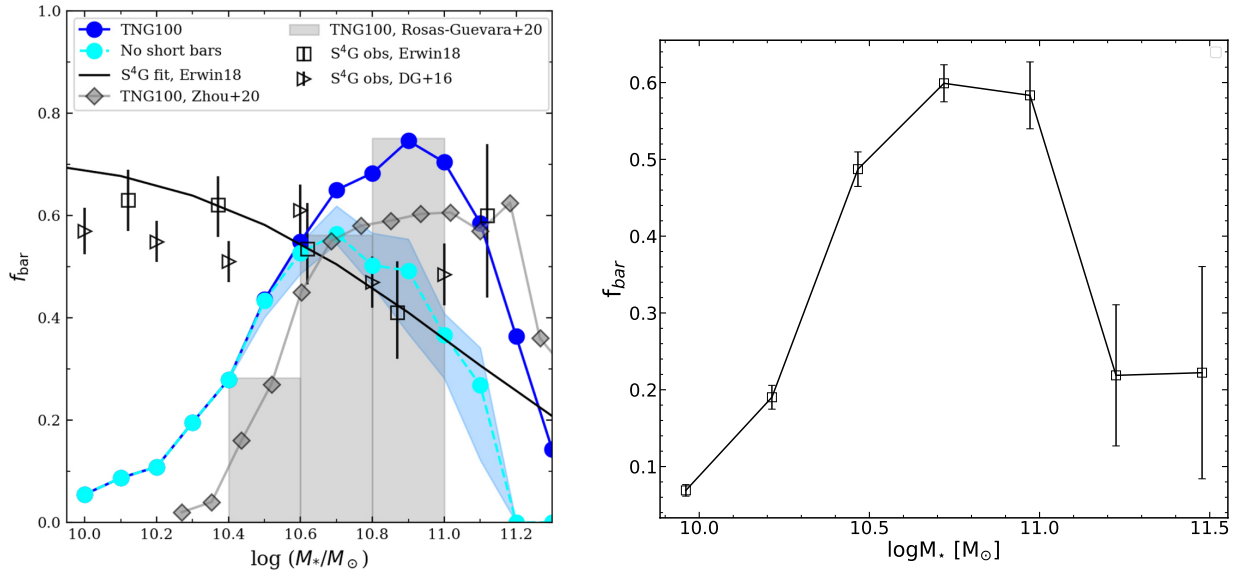


Figura 3.5: Fracción de barras como función de la masa estelar. Del lado izquierdo se presenta el obtenido por [Zhao et al. \[2020\]](#) y su comparación con trabajos previos, los puntos azul oscuro representa la fracción de barras general de la TNG100 mientras que las color cyan muestran la fracción si se excluyen las barras cortas. A la derecha, la reproducción del mismo cálculo con nuestra muestra que abarca el mismo rango de masas estelares pero en número resulta ser un catálogo más grande, su construcción se explica a detalle en la sección 3.3.

En el catálogo público de [Zhao et al. \[2020\]](#), accesible a través del sitio oficial de IllustrisTNG,¹ los autores incluyen exclusivamente las galaxias barradas de su selección, siendo un total de 1,179. Para completar el catálogo incluyendo las galaxias no barradas hacemos una selección a partir del catálogo general de IllustrisTNG, imponiendo los mismos criterios de selección i.e., $M_{\star} \geq 10^{10} M_{\odot}$, $k_{\text{rot}} \geq 0.5$, lo que nos permite identificar las galaxias no barradas complementarias que resultan en las 3,866 galaxias del catálogo completo.

Con el objetivo de comparar los dos trabajos anteriores, se analizó el parámetro k_{rot} de sus respectivos catálogos obteniendo los histogramas de la figura 3.6. Se observa que las galaxias contenidas en el catálogo de [Zhao et al. \[2020\]](#) abarcan un mayor rango de valores, teniendo una variación más grande de tipo morfológico, mientras que las galaxias del catálogo de [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#) se concentran hacia valores más grandes de k_{rot} con tipos morfológicos

¹Acceso a datos públicos: <https://www.tng-project.org/data/docs/specifications/sec5f>

tardíos. Para abarcar un mayor número de galaxias con un valor amplio de k_{rot} y segregar entre galaxias barradas y no barradas, se seleccionó preferentemente el catálogo de [Zhao et al. \[2020\]](#).

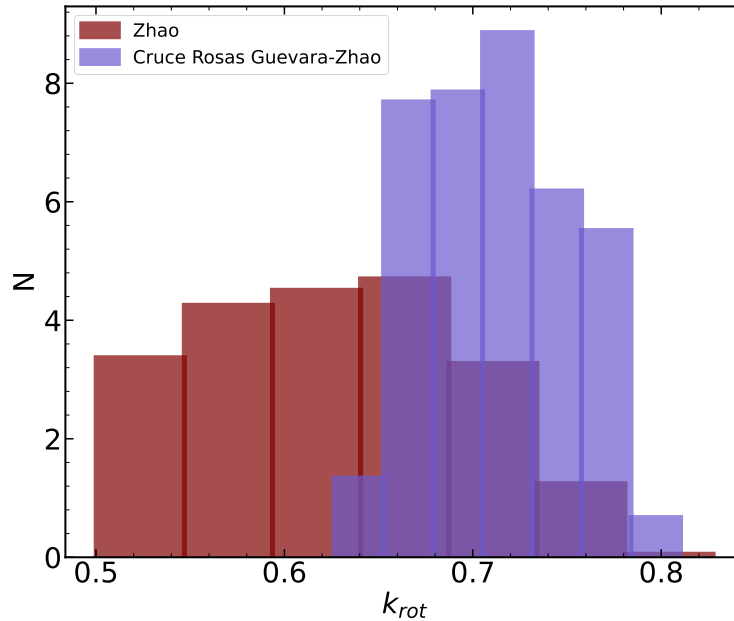


Figura 3.6: Distribución de valores del parámetro k_{rot} para los catálogos de [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#) y [Zhao et al. \[2020\]](#).

3.2.3 Catálogo de Pérez-Montaño et al. [2022]

Dado que el presente trabajo está centrado en analizar cómo diferentes parámetros influyen en la fracción de barras para las galaxias de bajo brillo superficial y ver cómo difieren de sus contrapartes de alto brillo, es necesaria la identificación de este tipo de galaxias para hacer una segregación de la muestra general en galaxias LSB y HSB. Para la segregación de nuestra muestra adoptamos la metodología presentada por [Pérez-Montaño et al. \[2022\]](#), quien usó la simulación TNG100 y donde se clasifican las galaxias tomando un rango de masas entre $M_{\star} = 10^9 - 10^{12} M_{\odot}$ a un corrimiento al rojo $z = 0$. Un punto importante en este estudio es que las galaxias

analizadas fueron observadas desde una perspectiva frontal, orientando el vector de momento angular estelar (\vec{J}_*) a lo largo de la línea de visión. Para segregar la muestra en LSBs y HSBs se calculó el brillo superficial central en la banda r del SDSS usando la ecuación 3.4 donde m_r es la magnitud aparente dentro del radio ($r_{50,r}$) de media luz proyectada.

$$\mu_r = m_r + 2.5 \log(\pi r_{50,r}^2) \quad (3.4)$$

En esta muestra no se toma en cuenta la atenuación del polvo interestelar debido a que [Kulier et al. \[2020\]](#), usando galaxias de la simulación cosmológica hidrodinámica EAGLE y el código de transferencia radiativa SKIRT ([Baes et al. \[2003\]](#), [Baes et al. \[2011\]](#), [Camps and Baes \[2015\]](#)), demostró que este efecto no juega un papel importante en la selección de la muestra de galaxias LSB, especialmente cuando éstas son vistas de frente, es decir, el tamaño de la muestra no se ve modificada por este parámetro. Para el cálculo del flujo se usaron modelos de síntesis de poblaciones estelares de [Bruzual and Charlot \[2003\]](#).

Tomando estos criterios de selección se encuentra una muestra total de 22,554 galaxias. Para segregar entre galaxias LSB y HSB se tomó el valor limitante de $\mu_r = 22.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$. Por encima de este valor se considera como una galaxia de bajo brillo superficial de las cuales se encontraron 5,814 galaxias; por debajo de este valor se toma como una galaxia de alto brillo superficial de las cuales se hallaron 16,714. En la figura 3.7 se muestran imágenes sintéticas de dos galaxias en este catálogo, en el panel izquierdo observamos un ejemplo aleatorio de una galaxia LSB y en el derecho un ejemplo de HSB, ambas con una masa estelar similar. Se puede apreciar que las galaxias consideradas de bajo brillo son visiblemente más extendidas y difusas comparadas con las de alto brillo.

Para poder distinguir entre galaxias espirales y elípticas se usó un criterio cinemático basado en el parámetro k_{rot} que, como se definió para el catálogo de Zhao, es la razón entre la energía

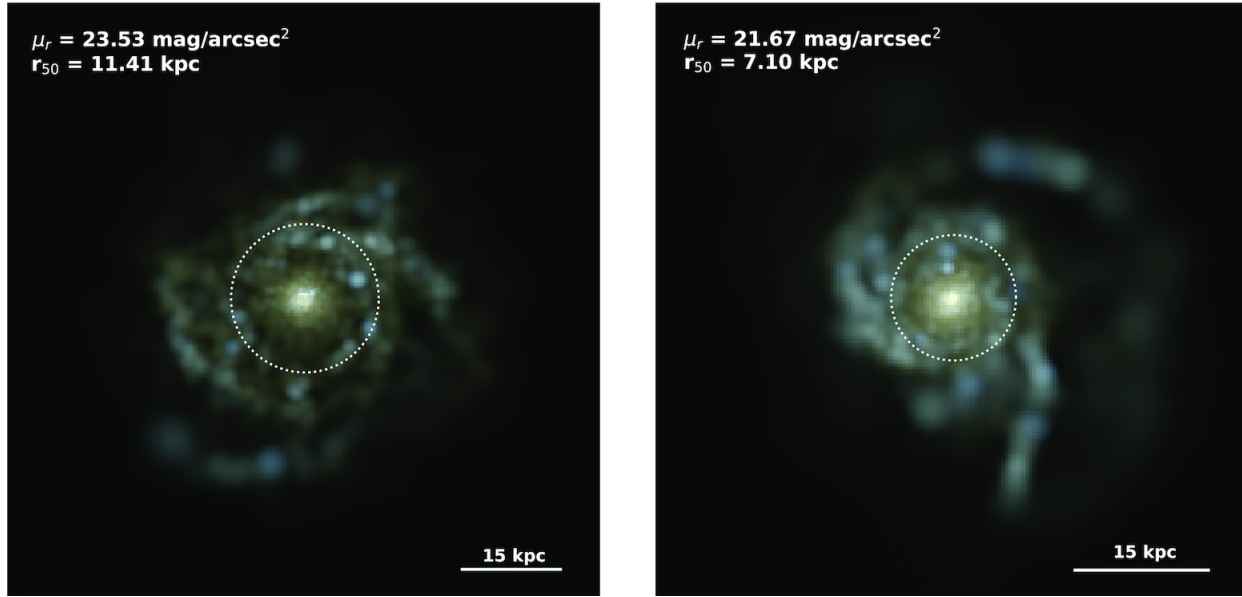


Figura 3.7: Comparación entre una galaxia LSB (izquierda) y una HSB (derecha) del catálogo de Pérez-Montaño et al. [2022], ambas con la misma masa estelar $\sim 10^{10} M_{\odot}$.

cinética a lo largo de la componente azimutal y la energía cinética estelar total. Valores de $k_{rot} > 0.5$ se atribuyen a galaxias de tipo tardío o espirales y elípticas por debajo de este valor. En la figura 3.8 se muestra la distribución de tipos morfológicos en el plano μ_r vs M_{\star} , segregando la muestra entre LSB y HSB. Es notorio que en la submuestra de LSB dominan los tipos tardíos, que son de interés en el presente estudio porque es en donde se pueden desarrollar barras estelares. Por otro lado, las HSB presentan un rango más amplio de morfologías. Sin embargo, a altas masas las que más predominan son las tipo elíptico con valores de k_{rot} típicamente por debajo de 0.5.

Además de contar con una segregación por brillo superficial y tipo morfológico, Pérez-Montaño también distingue entre galaxias centrales y satélites, siendo las primeras las galaxias más masivas del grupo al que pertenecen de acuerdo al algoritmo *subfind*. En la muestra del catálogo se tienen 7,240 LSB y 11,779 HSB centrales. En la figura 3.9 se observa la fracción de LSB a una masa estelar dada y su segregación entre centrales y satélites; a bajas masas existe una

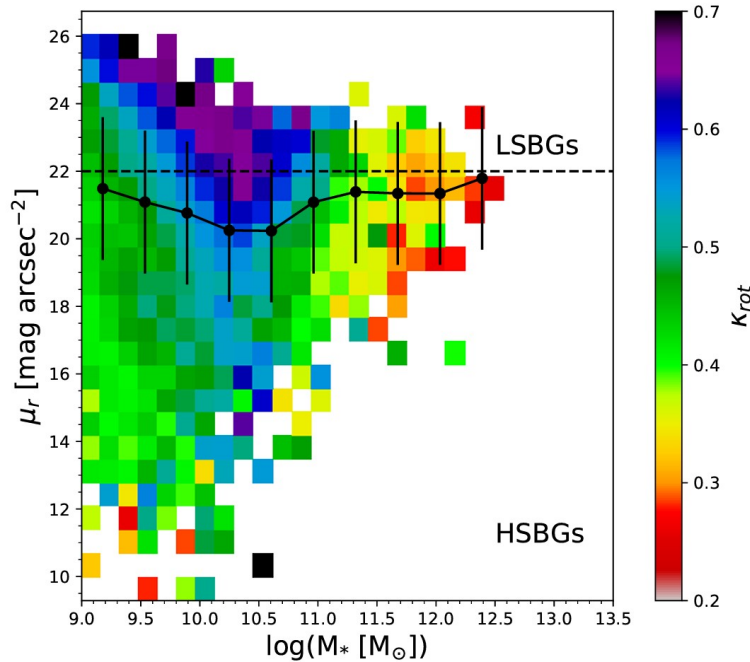


Figura 3.8: Brillo superficial μ_r como función de la masa estelar usando como código de color los valores respectivos de su k_{rot} (Pérez-Montañó et al. [2022]).

fracción importante de galaxias LSB, lo que es de esperarse dado que éstas son principalmente galaxias de baja masa, hacia masas mayores la fracción va decreciendo presentando un repunte nuevamente a $M_x \sim 10^{10.5} M_\odot$. Con respecto a la segregación de la submuestra tenemos que la mayoría de las LSB son centrales como se mencionó anteriormente y una pequeña fracción son satélites.

3.2.4 Catálogo de Genel et al. [2015]

El trabajo de Genel et al. [2015] nos presenta el estudio del momento angular estelar de miles de galaxias a $z=0$ usando la simulación Illustris. Una de las propiedades principales de una galaxia es su contenido de momento angular, el cual está relacionado con su masa y el tipo de galaxia. Según la teoría, en la formación de galaxias de disco, los bariones retienen su momento angular

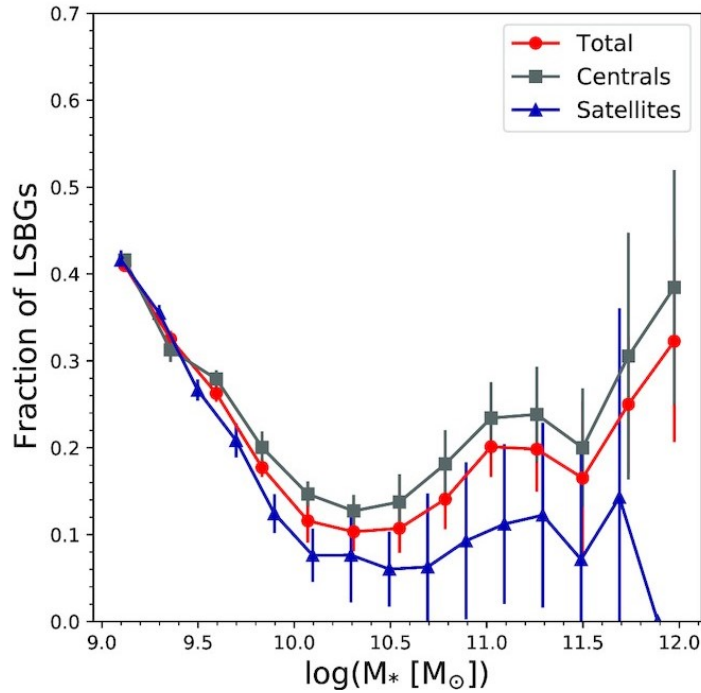


Figura 3.9: Fracción de LSB como función de la masas estelar y su segregación en centrales y satélites (Pérez-Montaño et al. [2022]).

específico definido como $j \equiv J/M$, donde J es el momento angular y M es la masa, a medida que colapsan en el centro del halo.

Para tener una población de galaxias diversa con un contenido de momento angular aproximadamente realista se usó una combinación de simulaciones diferentes en volumen y resolución. Por un lado tenemos la simulación Illustris con un volumen de $(106.5\text{Mpc})^3$ que contiene 2×1820^3 elementos resueltos, una masa típica de bariones de $1.26 \times 10^6 M_\odot$ y diversos procesos físicos que hacen evolucionar el sistema entre los que se encuentran el enfriamiento del gas, la formación de estrellas, producción de metales, formación, acreción y retroalimentación de agujeros negros, entre otros. También se desarrolló un volumen menor de $(35.5\text{Mpc})^3$ con una masa de bariones de $1.7 \times 10^7 M_\odot$ y con variaciones en torno al modelo fiduciario, en algunas de estas variaciones se quitaron ciertos ingredientes del proceso y en otras se aumentó o disminuyó la fuerza de

algunos procesos de retroalimentación.

Para las galaxias generadas se calculó el momento angular incluyendo todas las partículas estelares que pertenecen al subhalo, es decir, aquellas unidas a su pico de densidad y que no pertenecen a las satélites. No se aplicó ninguna restricción en radio en la medición ya que la mayor contribución al momento angular proviene del material que se encuentra principalmente más allá del radio de media masa (Romanowsky and Fall [2012]).

Para distinguir entre las componentes morfológicas de las galaxias en su muestra, se usó el parámetro de circularidad definido como $\epsilon \equiv J_z/J(E)$, donde J_z es el momento angular específico para cada partícula y $J(E)$ es el momento angular máximo de las partículas estelares, estando en una posición entre 50 antes y después en una lista donde están ordenadas por energía de enlace. Definimos entonces como estrellas del disco, para identificar esta componente, a aquellas con $\epsilon > 0.7$, ya que poseen un soporte rotacional significativo. Por otro lado, las estrellas con $\epsilon < 0$ se consideran como parte del bulbo, definiendo así esta componente morfológico.

Entre los resultados obtenidos por Genel et al. [2015] encontraron que para todas las galaxias de Illustris con $M_\star > 10^9 M_\odot$ a $z=0$, siendo una muestra total de 29,203 galaxias, el momento angular específico estelar j_\star aumenta al incrementar la masa estelar de la galaxia. En la Figura 3.10 podemos ver esta tendencia en tres diferentes paneles donde se analizan diferentes cantidades como se describe a continuación. En el panel izquierdo se segregó la muestra en función de la relación axial, midiendo el segundo momento de la distribución de masa en cada dirección cartesiana $M_i \equiv (\sum_k m_k r_{k,i}^2)^{1/2} / (\sum_k m_k)^{1/2}$ donde k corre sobre las partículas estelares e i corresponde a las coordenadas cartesianas (x, y, z) . Así, se definen como galaxias *planas* si $M_z/(M_x M_y)^{1/2} < 0.55$ y *redondas* si $M_z/(M_x M_y)^{1/2} > 0.9$. En el panel central se separa la muestra de acuerdo a su morfología definiendo la estadística de bulbo $F(G, M_{20})$ (Snyder et al. [2015]), se consideran galaxias *difusas* como aquellas donde $F < -1$, presentando bulbos pequeños mientras que galaxias con $F > 0.1$ se consideran *concentradas* ya que tienen bulbos de

tamaño considerable. Finalmente, en el panel derecho se segrega la muestra por tasa específica de formación estelar (sSFR por sus siglas en inglés), considerando como galaxias con *formación de estrellas* si $sSFR > 0.2 \text{ Gyr}^{-1}$ e *inactivas* si $sSFR < 0.01 \text{ Gyr}^{-1}$. En todos los paneles las líneas punteadas representan ajustes a las correlaciones observadas (Fall and Romanowsky [2013]) para galaxias de tipo tardío (azul) y temprano (rojo). Para las galaxias de Illustris, tomando en cuenta la segregación por las tres cantidades antes mencionadas, se muestran los tipos tardíos en color cian mientras que las tempranas se muestran en las líneas púrpuras. Como vemos, existe una buena concordancia entre las curvas correspondientes, tomando en cuenta las incertidumbres en las cantidades observadas. Este tipo de estudios permite concluir que las galaxias a $z = 0$ en Illustris son consistentes con un contenido de momento angular que está de acuerdo con las observaciones.

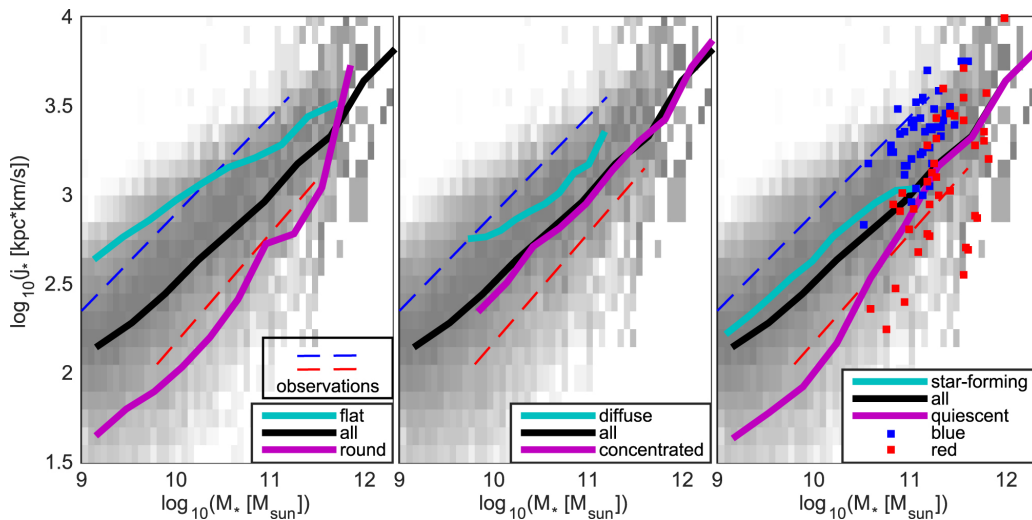


Figura 3.10: Relación entre el momento angular estelar específico y la masa estelar. En el panel izquierdo vemos la separación de la muestra por relación axial. En el panel central tenemos la segregación por morfología. Finalmente en el derecho se dividen las galaxias por tasa de formación estelar específica donde además, los cuadrados azules muestran las galaxias Illustris de tipo tardío y los rojos de tipo temprano seleccionadas visualmente por Vogelsberger et al. [2014]. Imagen tomada de Genel et al. [2015].

Haciendo un análisis similar al anterior, pero esta vez de la evolución del momento angular estelar específico como función de la masa del halo en lugar de la masa estelar, se encontró

que las galaxias de tipo tardío simuladas tienen un factor de retención de momento angular ($\eta_j \equiv j_\star/j_{DM}$) del 100 %, es decir, no presentan pérdida de momento angular, mientras que las galaxias de tipo temprano tienen sólo $\eta_j \sim 30\%$ de su momento angular específico original.

El catálogo público de Genel también se puede encontrar en el sitio oficial de Illustris, dentro de éste se incluyen diversos parámetros, tal como el momento angular específico de la componente estelar j_\star , cuyo cálculo se mencionó anteriormente. También proporciona la fracción en masa de las componentes morfológicas del disco y el bulbo con las condiciones de circularidad ϵ ya planteadas.

3.3 Construcción y descripción de la muestra

Para la construcción de la muestra utilizada en este trabajo se tomó como base el catálogo TNG100 para la instantánea completa 99 a $z = 0$. Como se mencionó con anterioridad, este catálogo contiene un total de 4,371,211 subhalos o galaxias. Para referirnos a una galaxia en particular se toma su respectivo ID (también llamado SubhaloID o SubfindID) dentro del arreglo, a partir de este identificador, podemos obtener los parámetros correspondientes para las galaxias de interés. Entre estas cantidades encontramos la masa total, que incluye todas las partículas miembro unidas a cada subhalo y separadas por tipo (PartType) tomando así, el tipo de partículas que será de utilidad para nuestro estudio. En este caso se extrajo primeramente la masa estelar (M_\star) que corresponde al PartType4.

Para segregar las galaxias por brillo superficial μ_r se usó el catálogo de Pérez-Montaño descrito anteriormente, el cual incluye galaxias en el rango de masas estelares $M_\star = 10^9 - 10^{12} M_\odot$, con estas masas se aseguran objetos bien resueltos. Sin embargo, dado que el objetivo de nuestro trabajo es estudiar las barras estelares en nuestra muestra, restringimos un poco más el catálogo considerando solo aquellas galaxias cuyas masas sean mayores a $10^{10} M_\odot$ y así poder

usar el catálogo de Zhao, para el cual es posible la identificación de la barra. Haciendo estas consideraciones en masa y tomando valores de $k_{rot} > 0.5$ encontramos 4,224 galaxias, la cual se considera como nuestra muestra final y de las cuales, con ayuda del catálogo de Pérez-Montaño, identificamos 652 LSB y 3,572 HSB, usando este mismo catálogo segregamos entre galaxias centrales y satélites encontrando que 489 LSB y 1772 HSB son centrales.

Finalmente, para distinguir entre galaxias barradas y no barradas se usó el catálogo público de Zhao que, como se mencionó anteriormente, incluye únicamente galaxias barradas que cumplen con $k_{rot} > 0.5$ y $\epsilon > 0.25$, siendo un total de 1,179. Entonces, para las galaxias de nuestra muestra, se consideraron barradas si aparecen en el catálogo de [Zhao et al. \[2020\]](#). Por el contrario, si no aparece dentro de su catálogo, la tomamos como una galaxia no barrada. Así, nuestra muestra de 4,224 contiene 1,172 galaxias barradas y 3,052 que no presentan estructura de barra. Para nuestras submuestras de alto y bajo brillo superficial tenemos que 1,011 galaxias HSB y 161 LSB son barradas. La composición de nuestra muestra final se observa en la tabla [3.2](#).

En la figura [3.11](#) se presentan imágenes de algunas galaxias centrales dentro de la muestra final, calculadas en [Nelson et al. \[2018\]](#) para los filtros F200W, F115W y F070W del JWST. En el panel superior izquierdo vemos claramente un ejemplo de galaxia de bajo brillo superficial con estructura de barra estelar, mientras que en el panel superior derecho tenemos el ejemplo de una LSB que no presenta estructura de barra en su centro. En los paneles inferiores se muestran dos ejemplos de galaxias de alto brillo: barrada en el panel izquierdo donde es más visible la estructura alargada característica de la barra, y no barrada a la derecha. Los ejemplos de galaxias barradas presentan masas similares de $M_{\star} \sim 10^{10.9} M_{\odot}$ mientras que las no barradas tienen masas $M_{\star} \sim 10^{10.8} M_{\odot}$.

Cuadro 3.2: Composición general de la muestra de galaxias construida, segregadas según su brillo superficial (μ_r), si presentan o no barra estelar y, finalmente si se consideran centrales o satélites.

Muestra total: 4,224 galaxias.		
	HSB: 3,572	LSB: 652
Barradas	1,011	161
No barradas	2,561	491
Centrales	1,772	489
Satélites	1,800	163

3.3.1 Parámetros de la muestra

Como el objetivo de este trabajo es estudiar y analizar cómo los parámetros de las LSB y HSB afectan la fracción de barras encontrada en cada tipo, a continuación describimos el cómputo de las propiedades seleccionadas: fracción de gas, el parámetro de espín y la fracción de bulbo, las cuales están relacionadas con la formación y evolución de barras ([Masters et al. \[2012\]](#), [Long et al. \[2014\]](#), [Kataria and Das \[2018\]](#)).

Primero tenemos la **fracción de gas**, la cual es una característica de las galaxias que nos habla de cómo es su contenido en gas. La expresión para este parámetro se aprecia en la ecuación 3.5:

$$f_{\text{gas}} = \frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{gas}} + M_{\star}}, \quad (3.5)$$

expresión que está en función de la masa de gas M_{gas} y la masa estelar M_{\star} . La masa del gas se puede encontrar de la misma manera que la masa estelar, usando el catálogo general TNG100, pero especificando para PartType0, correspondiente al total de masa de gas en el subhalo.

Dado que las galaxias LSB se caracterizan por ser galaxias ricas en gas ([Schombert et al. \[1992\]](#), [McGaugh and De Blok \[1997\]](#)), exploramos si las galaxias identificadas como LSB en nuestra muestra cumplen esta condición. En la figura 3.12 se muestra la distribución de la fracción de gas para nuestra muestra, segregando galaxias entre LSB y HSB. En la figura se

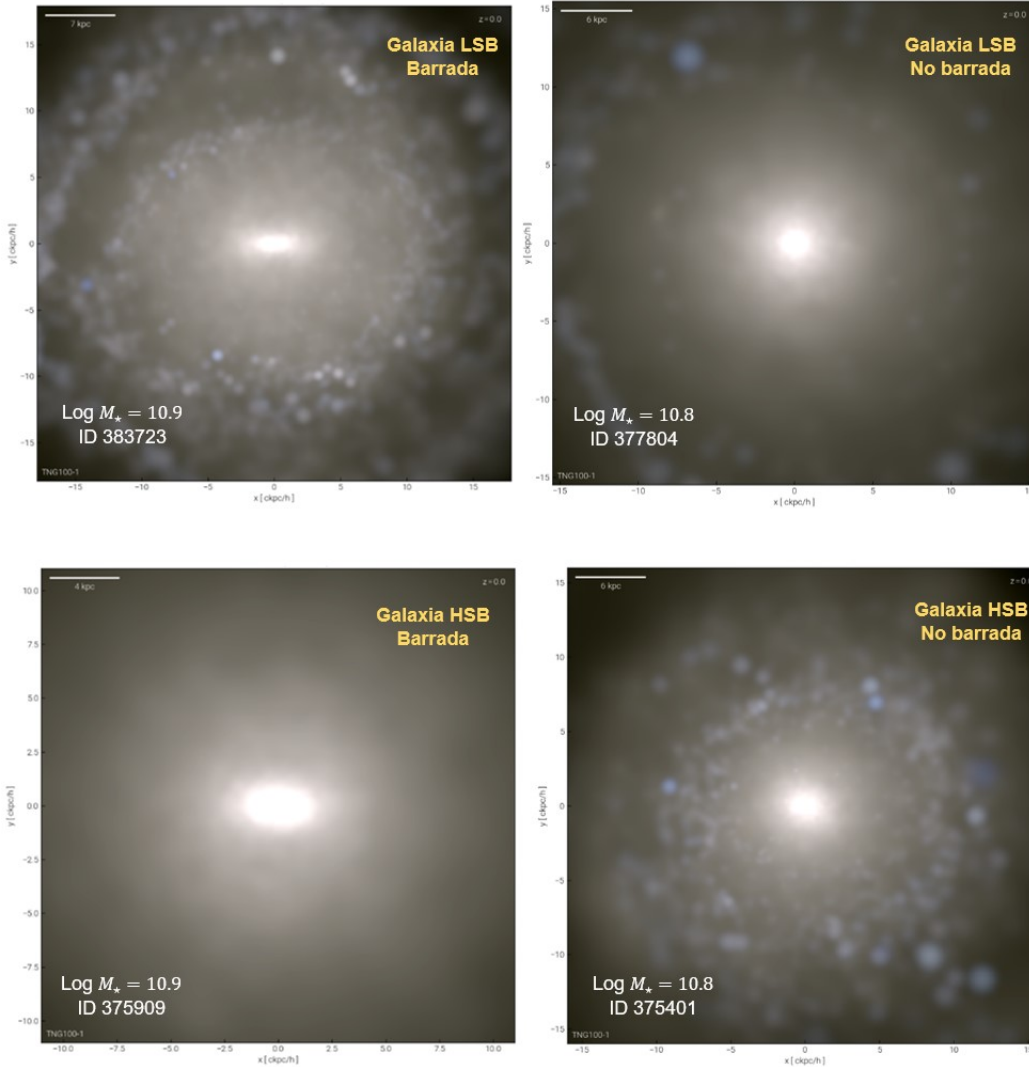


Figura 3.11: A la izquierda tenemos un ejemplo de galaxia LSB (panel superior) y HSB (panel inferior) barrada, ambas galaxias presentan masas estelares similares $\sim 10^{10.9} M_{\odot}$. En los paneles de la derecha tenemos de la misma manera, un ejemplo de LSB (arriba) y HSB (abajo) que no presentan estructura de barra estelar, ambas con una masa similar de $\sim 10^{10.8} M_{\odot}$.

observa que tanto las galaxias LSB como las HSB abarcan el mismo rango en la fracción de masa en gas, pero sus distribuciones son diferentes, a pesar de que ambas tienen un primer pico a valores bajos de fracción de gas, hay considerablemente más galaxias HSBs en este rango. El segundo pico en la distribución de f_{gas} se da a valores pequeños para galaxias de alto brillo

mientras que para las de bajo brillo se extiende a valores más grandes. En la misma figura también se indica el valor de la mediana de f_{gas} para ambas submuestras, con el valor para LSB (0.207) siendo casi dos veces mayor al valor presentado por HSBs (0.122), también se presentan en las líneas sombreadas los percentiles 25 y 75 para cada submuestra. Este resultado confirma que las galaxias LSB de nuestra muestra son ricas en gas en contraposición de las galaxias HSB. Los valores medianos de la fracción de masa en gas en ambas submuestras pueden ser comparados con los encontrados en el trabajo observacional de O'Neil et al. [2004], donde se reportan valores de 0.01 y 0.006 para LSBs y HSBs, respectivamente, nuevamente presentando que las galaxias de bajo brillo resultan ser más ricas en gas.

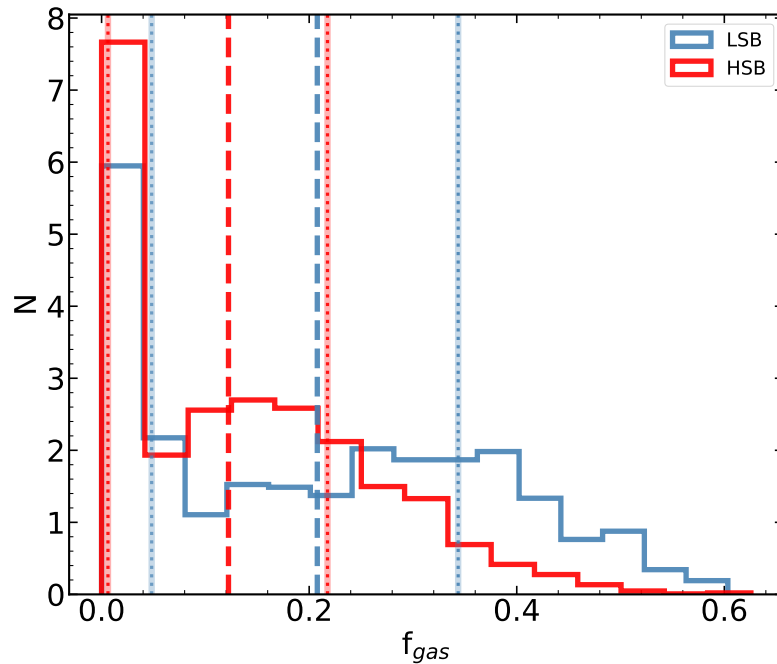


Figura 3.12: Distribución de la fracción de gas f_{gas} en nuestra muestra de 4, 224 galaxias segregadas en LSB y HSB. Las líneas verticales segmentadas corresponden a los valores medianos para ambas submuestras (0.207 y 0.122 para galaxias LSB y HSB, respectivamente), también se presentan los percentiles 25 y 75.

La segunda propiedad a analizar es el **parámetro de espín** del halo de materia oscura

λ , haciendo hincapié en que este parámetro está bien definido únicamente para las galaxias más masivas de un grupo, es decir, las consideradas centrales (Pérez-Montaño et al. [2022]), es por eso que de nuestra muestra final únicamente se tomarán este tipo de galaxias. En nuestras submuestras, 489 LSB y 1, 772 HSB son consideradas centrales, dando un total de 2, 261 galaxias (53 % de la muestra total), tal como se presentó en la tabla 3.2.

La motivación principal para estudiar este parámetro es que podría tener un efecto directo en la formación y crecimiento de la barra estelar. Para calcular su valor, utilizamos la expresión propuesta por Bullock et al. [2001]:

$$\lambda = \frac{|J|}{\sqrt{2MRV}} \quad (3.6)$$

donde J es el momento angular total del halo, R es el radio virial, M la masa virial y V la velocidad circular virial.

Para J tomamos los valores proporcionados por el catálogo TNG100, en donde se presentan valores de momento angular por eje (x, y, z), calculados como la suma ponderada de la masa de la coordenada relativa multiplicada por la velocidad relativa de todas las partículas; entonces para J se toma el módulo de estas tres cantidades ($J = \sqrt{j_x^2 + j_y^2 + j_z^2}$), como los términos están ponderados por la masa, entonces se cancela por el factor M del denominador en la ecuación de λ . Para los valores de R y V se usó el trabajo de Ayromlou et al. [2021]. Dentro de este catálogo, público en la base de datos de IllustrisTNG, se define R como el radio virial del grupo FOF en el que reside la galaxia y donde la densidad de la materia es igual a 200 veces la densidad crítica del universo, si el sistema está compuesto de disco y bulbo, entonces el radio se calcula suponiendo un disco exponencial y un bulbo de potencia $r^{1/4}$. Finalmente V es la velocidad virial del subhalo. La relación entre la masa de la galaxia, R y V se muestra en la ecuación 3.7 presentada por Henriques et al. [2015]:

$$M_{200c} = \frac{100}{G} H^2(z) R_{200c}^3 = \frac{V_{200c}^3}{10GH(z)}, \quad (3.7)$$

donde $H(z)$ es la constante de Hubble a determinado corrimiento al rojo z ,

Centrándonos en nuestra muestra final de 4, 224 galaxias podemos obtener, al igual que para la fracción de gas, la distribución del parámetro de espín del halo de materia oscura que se muestra en la Figura 3.13, en donde podemos observar que los valores de espín corresponden con la literatura, con las LSB presentando valores más altos de λ en comparación con las HSB tal como se vio en Pérez-Montaño et al. [2022]. También apreciamos que la mayoría de las galaxias de alto brillo superficial se concentran hacia valores más pequeños de λ , aunque presentando una cola más prominente que las LSB; el valor de la mediana para ambas distribuciones es de 0.043 y 0.070 para las HSB y LSB, respectivamente, es decir, las galaxias de bajo brillo presentan cantidades ~ 0.03 mayores.

Para observar el comportamiento y los valores que toman los parámetros de espín, se graficó λ de las galaxias centrales contenidas en el catálogo de Henriques et al., obteniendo la gráfica de la derecha de la figura 3.14, la cual se compara con la figura del lado izquierdo obtenida por Pérez-Montaño et al. [2022]. Las barras de error presentadas en esta y la siguiente sección de esta sección, fueron obtenidas a través del método de *bootstrap*, el cual se basa en generar pseudo-muestras del mismo tamaño que la muestra original, mediante un muestreo repetido y aleatorio de los datos disponibles. Los intervalos de confianza representan 1σ de las distribuciones, resultado de la realización de 1000 pseudo-muestras aleatorias.

Como podemos ver, los comportamientos son prácticamente iguales a todo el rango de masas. En ambos paneles observamos que las LSB presentan sistemáticamente valores mayores de parámetro de espín (línea roja el panel izquierdo), con respecto a sus contrapartes HSB. También se aprecia una variación significativa de λ con la masa estelar en las galaxias de bajo brillo

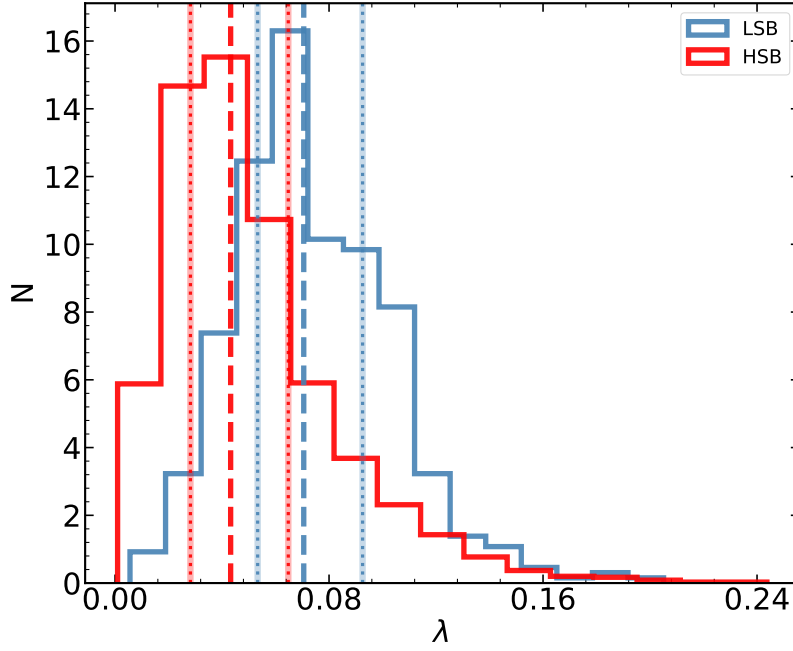


Figura 3.13: Distribución del parámetro de espín en nuestra muestra de 4,224 galaxias segregadas entre LSB y HSB. Las líneas punteadas representan el valor de la mediana de ambas submuestras (0.043 y 0.070 para las HSB y LSB, respectivamente), mientras que las líneas sombreadas muestran los percentiles 25 y 75.

superficial, especialmente a bajas masas donde tenemos un aumento prominente del parámetro de espín, a masas intermedias permanece relativamente constante y se desploma a masas grandes ($\sim 10^{12} M_{\odot}$). En las galaxias de alto brillo, notamos que no hay grandes cambios en los valores de λ al aumentar la masa estelar.

Podemos también analizar la retención de momento angular; es decir, el cociente entre el momento angular específico de la componente estelar j_{\star} y el del halo de materia oscura j_{DM} . En la figura 3.15 tenemos del lado izquierdo la gráfica de Pérez-Montaño et al. [2022] y del lado derecho la reproducción de la misma para todas las LSB y HSB centrales. Los valores para la componente j_{\star} fueron hallados dentro del catálogo de Genel et al. [2015]. Según resultados

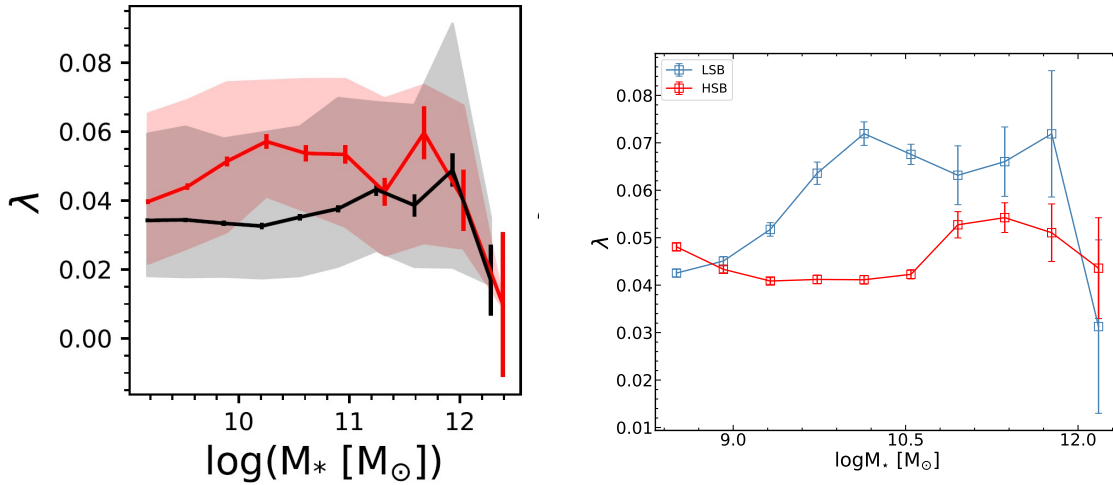


Figura 3.14: Comparación entre los comportamientos obtenidos para el parámetro de espín del halo de materia oscura en función de la masa estelar, del lado izquierdo vemos el obtenido con el catálogo de Pérez-Montaño et al. [2022] (las líneas rojas corresponden a las LSB y las negras a las HSB) y del lado derecho usando los datos del catálogo de Henriques.

encontrados por Zavala et al. [2016], existe una correlación entre estas dos componentes que también presenta una marcada dependencia con otro factor importante: el tipo morfológico de la galaxia, por ejemplo, las galaxias de disco presentan una mayor retención de momento angular con respecto a otro tipo de galaxias, conclusión a la que se llegó en Fall and Romanowsky [2013], donde también se tiene que j_* aumenta conforme la masa estelar va en aumento. En nuestra imagen podemos ver cómo el cociente de estas dos cantidades (j_*/j_{DM}) aumenta al inicio para bajas masas, a partir de $M_* \sim 10^{10} M_\odot$ se presenta una disminución en la retención bastante significativa.

En la figura también se puede ver que las galaxias de bajo brillo superficial presentan sistemáticamente valores más grandes de retención de momento angular con respecto a sus contrapartes de alto brillo.

El último parámetro a analizar relacionado con la formación de barras es la **fracción de masa bulbo-total** B/T presente en las galaxias de la muestra. Se define como la masa

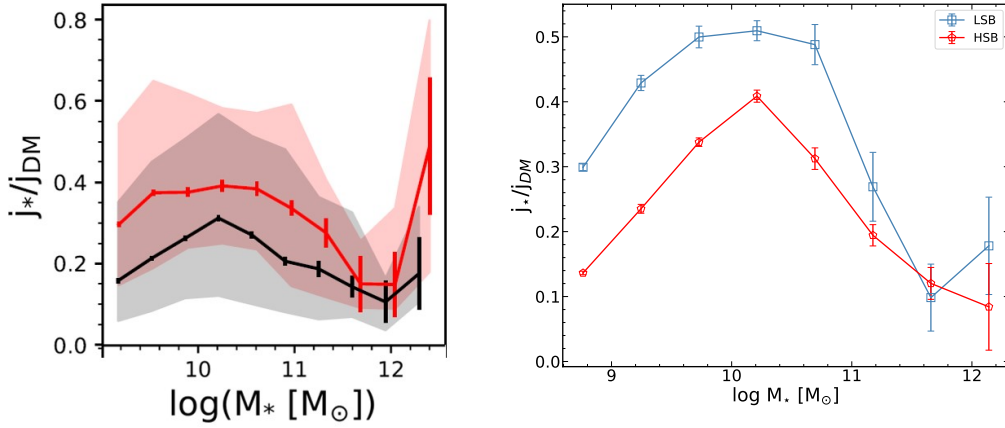


Figura 3.15: Transferencia de momento angular entre la componente bariónica del momento angular específico j_* y la componente de materia oscura j_{DM} como función de la masa estelar. Del lado izquierdo tenemos el presentado por Pérez-Montaño et al. [2022] y del lado derecho la reproducción de la misma para todas las galaxias centrales de bajo y alto brillo superficial.

del componente esferoidal central o “bulbo” con respecto a la masa total de la galaxia. Los valores de este parámetro se extrajeron del catálogo de Genel et al. [2015] el cual fue explicado anteriormente.

Según Galaz et al. [2006], quien estudió la evolución del disco en galaxias de bajo brillo superficial, la relación entre el tamaño del bulbo y del disco (B/D) para las galaxias HSB parece ser idéntica a la observada para las galaxias LSB. Algo similar encontramos al observar las distribuciones de B/T en la figura 3.16, donde vemos que las muestras presentan una distribución bastante similar para todos los valores de B/T que van desde 0 hasta ~ 0.9 .

Aunque puede ser un poco difícil de notar a simple vista, en el extremo izquierdo de la imagen se puede apreciar que algunas HSB tienen valores un poco más pequeños que las LSB y que se extienden por un mayor rango de valores. Sin embargo, la mayoría se concentra a valores menores a ~ 0.5 ; por otro lado las galaxias de alto brillo superficial abarcan un rango menor pero también se concentran principalmente a valores pequeños de B/T . Las distribuciones, a

pesar de ser similares presentan medianas ligeramente diferentes, por un lado, el valor mediano de las HSB es de 0.257 mientras que el de las LSB está por debajo con 0.238. En ambos casos tenemos masas de bulbo pequeñas con respecto a la masa total de la galaxia. En la siguiente sección veremos cómo afectan estos valores a nuestra fracción de barras y si es un parámetro importante a considerar en particular para nuestra muestra.

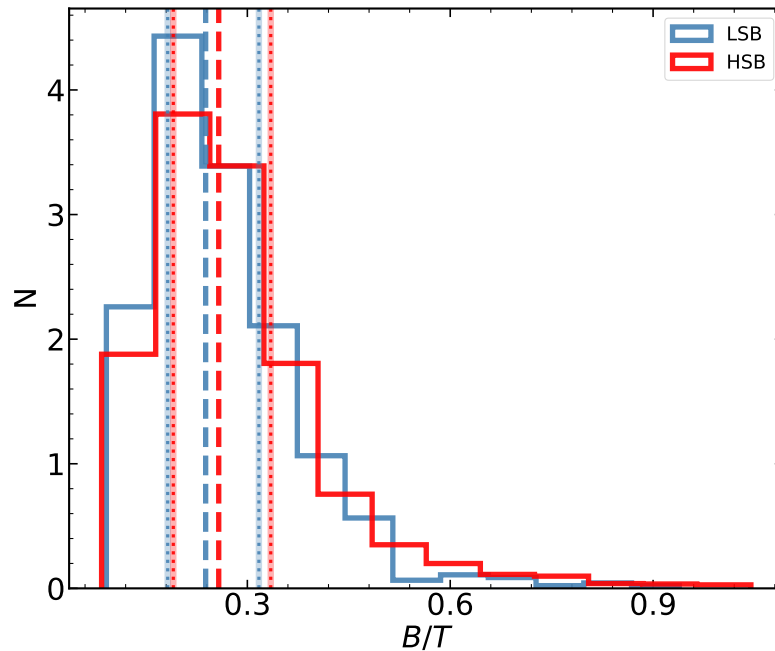


Figura 3.16: Distribución del parámetro de fracción de bulbo B/T en nuestra muestra de 4,224 galaxias segregadas entre LSB y HSB. Las líneas punteadas representan los valores de la mediana para las submuestras (0.257 y 0.238 para galaxias HSB y LSB, respectivamente). Las líneas sombreadas muestran los percentiles 25 y 75.

Adicionalmente a los tres principales parámetros mencionados anteriormente, también se obtuvo la distribución del parámetro k_{rot} para nuestras submuestras que se presenta en la figura 3.17. Como podemos ver, las galaxias de alto brillo superficial poseen principalmente valores bajos de k_{rot} con un valor mediano de 0.620, mientras que las LSBs se concentran principalmente

a valores más altos, con una mediana de 0.652. Este resultado es consistente con el trabajo de Pérez-Montaña et al. [2022], cuya distribución de valores de k_{rot} se muestra también en la figura 3.8 donde se aprecia que las LSBs tienen valores más altos de este parámetro, lo que indica que corresponden a tipos morfológicos más tardíos.

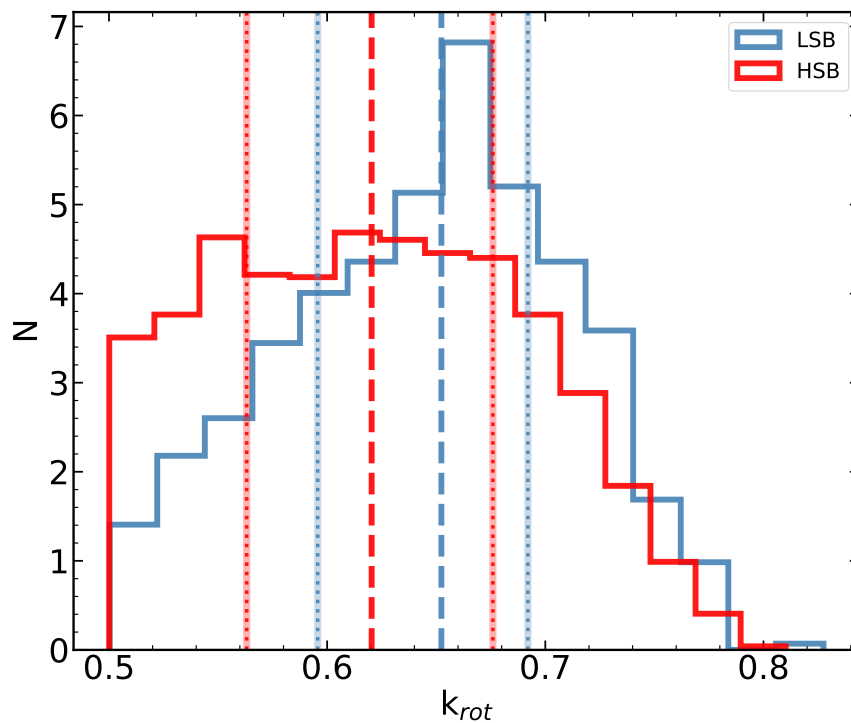


Figura 3.17: Distribución del parámetro k_{rot} para la muestra total de 4,224 galaxias, segregada en LSB y HSB. Las líneas punteadas representan los valores de la mediana para las submuestras (0.620 y 0.652 para galaxias HSB y LSB, respectivamente). Las líneas sombreadas señalan los percentiles 25 y 75.

Hasta ahora, hemos descrito cómo se obtuvo nuestra muestra final y cómo se calcularon o extrajeron los parámetros más importantes a analizar para nuestro propósito; en la siguiente sección de resultados se presentarán y se interpretarán de manera general las gráficas obtenidas y sus respectivos análisis, también veremos cómo las propiedades antes mencionadas están afectando la cantidad de barras encontradas para las submuestras HSB y LSB.

Resultados

Como se mencionó, la muestra construida para este trabajo se obtuvo haciendo uso de los catálogos descritos en la sección 3 y está conformada por un total de 4,224 galaxias a un corrimiento al rojo $z = 0$; De la muestra completa se encontró que el $27.75 \pm 0.68\%$ contienen barras, tal como se aprecia en la figura 4.1. La fracción de galaxias barradas encontrada es bastante cercana a los resultados obtenidos en trabajos observacionales previos como el de [Lee et al. \[2012\]](#), cuya muestra está conformada por 10,674 galaxias de tipo tardío extraídas del KIAS VAGC (Korea Institute for Advanced Study Value-Added Galaxy Catalog) y donde se usó como detección de barras la inspección visual encontrando una $f_{\text{bar}} = 20.4\%$. Nuestra fracción es también compatible con los resultados obtenidos por [Cervantes Sodi and Sánchez-García \[2017\]](#), en donde se estimó una fracción de galaxias barradas del 25%, en una muestra de 10,430 galaxias tomadas del proyecto Galaxy Zoo 2 (descrito en [Lintott et al. \[2008\]](#)). La identificación de la barra se lleva a cabo por internautas voluntarios que han completado un proceso de adiestramiento. Para esta muestra en particular se exigió un número mínimo de 20 votos por

galaxia con una fracción de votación mayor a ≥ 0.6 para la identificación de la barra estelar.

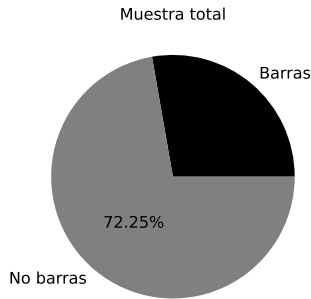


Figura 4.1: Fracción de galaxias barradas y no barradas de la muestra total construida por 4,224 galaxias.

Al segregar la muestra total en submuestras de galaxias LSB y HSB (con la condición de brillo superficial mencionada en la metodología para el valor límite de $\mu_r = 22 \text{ mag arcsec}^{-2}$), se espera una diferencia entre la fracción de galaxias barradas, debido a que en su naturaleza, las galaxias LSB y HSB tienen características inherentes diferentes, tal como se menciona en los capítulos previos. La diferencia en estas características pueden, ya sea inhibir o favorecer el crecimiento/formación de la barra estelar.

En teoría, se espera una mayor fracción de galaxias barradas en las HSB con respecto a las LSB (Cervantes Sodi and Sánchez-García [2017]) y es justamente lo que se aprecia en los gráficos de pastel de la figura 4.2. Se muestra que la fracción de galaxias barradas f_{bar} para la submuestra de 652 galaxias LSB es de $24.73 \pm 1.73 \%$, mientras que para las 3,572 galaxias HSB la fracción f_{bar} alcanza un valor de $28.11 \pm 0.79 \%$. Los valores encontrados para las submuestras son también compatibles con los obtenidos por Cervantes Sodi and Sánchez-García [2017]. Ellos encontraron una fracción de galaxias barradas para las LSBs de 20% , menor que el $\sim 30 \%$ encontrado para las HSBs. En la figura 4.3 podemos ver la dependencia entre la fracción de galaxias barradas y el brillo superficial en las bandas B y r (panel superior e inferior, respectivamente). La línea vertical en el panel superior indica la segregación entre las

galaxias LSB a la izquierda y las HSB a la derecha, este mismo valor límite se puede usar en la banda r . Observamos un comportamiento inversamente proporcional, para valores altos de brillo superficial, que corresponden a galaxias menos luminosas como las LSB, tenemos f_{bar} menores en comparación con las galaxias más brillantes o HSB. Esta tendencia no cambia al pasar de una banda a otra, sin embargo es ligeramente menos marcada si observamos la banda r donde la pendiente es menos pronunciada.

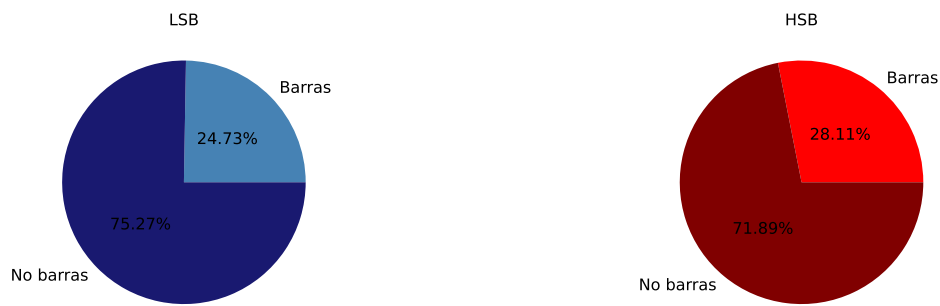


Figura 4.2: Fracción de galaxias barradas para las submuestras LSB (izquierda) y HSB (derecha), como se observa, las HSB presentan una mayor cantidad de barras con respecto a las LSB.

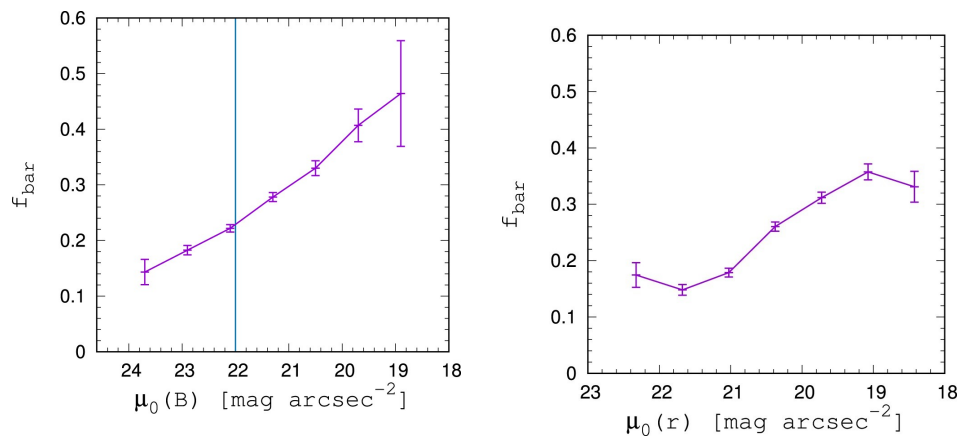


Figura 4.3: f_{bar} como función del brillo superficial en la banda B (panel izquierdo) y en la banda r (panel derecho) encontrada por [Cervantes Sodi and Sánchez-García \[2017\]](#).

La fracción de galaxias barradas como función de la masa estelar (M_*) en la muestra total se presenta en la figura 4.4.

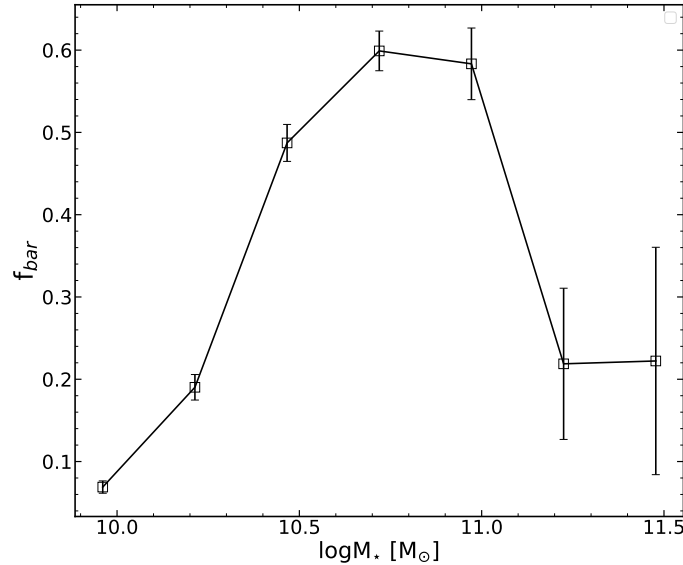


Figura 4.4: Fracción de galaxias barradas f_{bar} como función de la masa estelar M_* contenida en la galaxia para nuestra muestra total de 4,224 galaxias.

En la figura se observa un incremento de la fracción de galaxias barradas en el rango de masas $M_* = 10^{10} - 10^{10.7} M_\odot$, desde valores menores al 10 % hasta alcanzar un máximo de casi el 60 %. A masas por encima de este rango f_{bar} se desploma. El comportamiento es el mismo que el reportado originalmente por [Zhao et al. \[2020\]](#) (panel izquierdo de la figura 3.5) y consistente con los valores reportados por Zhao y Rosas-Guervara, quienes también emplean muestras provenientes de IllustrisTNG. Cualitativamente, el comportamiento reportado es también compatible con lo ampliamente reportado por estudios observacionales ([Eskridge et al. \[2000\]](#), [Lee et al. \[2012\]](#), [Cervantes Sodi et al. \[2015\]](#), [Erwin \[2019\]](#), [Díaz-García et al. \[2016\]](#)), donde se muestra que la fracción de galaxias barradas aumenta para el caso de galaxias masivas, éstas galaxias tienen discos grandes autogravitantes, lo que favorece la formación y crecimiento de las barras por inestabilidades gravitacionales ([Algorry et al. \[2017\]](#), [Rosas-Guevara et al.](#)

[2020]).

En la figura 4.5 se muestran los valores de f_{bar} para las submuestras LSBs y HSBs como función de la masa estelar donde se observa el mismo comportamiento que para la muestra total, un aumento de f_{bar} al incrementar la masa estelar. En el rango de 10^{10} - $10^{10.8}$ M_{\odot} se observa una clara diferencia entre las submuestras, con valores de f_{bar} sistemáticamente mayores para el caso de galaxias HSB en comparación con las LSBs, tal como esperábamos obtener considerando estudios previos con este tipo de galaxias. Galaxias de alto brillo superficial tienden a presentar una mayor cantidad de galaxias capaces de formar una barra estable (Masters et al. [2011], Pahwa and Saha [2018]). Sin embargo, a masas mayores ($> 10^{10.9}$) vemos que la tendencia de f_{bar} se invierte, mostrando que las LSBs presentan mayor cantidad de barras que sus contrapartes más brillantes.

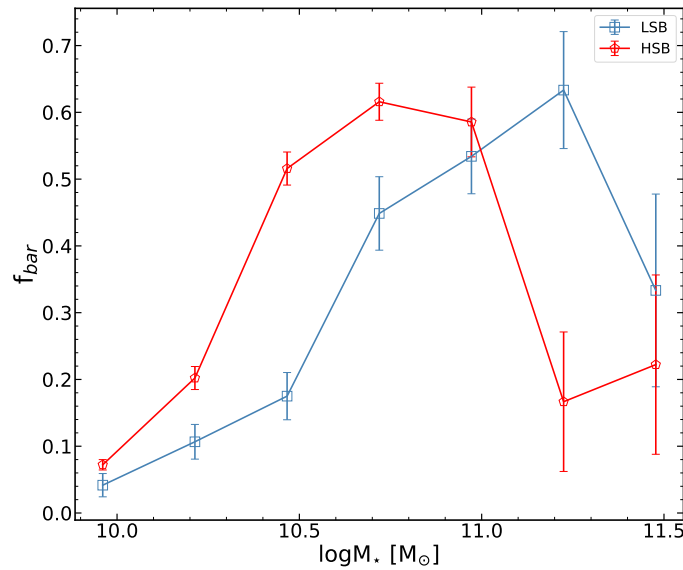


Figura 4.5: Fracción de galaxias barradas como función de la masa estelar para la segregación por brillo superficial (LSBs y HSBs) en nuestra muestra. La figura muestra el incremento de f_{bar} al incrementar la masa estelar de las galaxias para ambas submuestras. Sin embargo, estas fracciones son sistemáticamente menores para el caso de las LSBs en el rango $10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$, con una inversión en el comportamiento para masas mayores a este rango.

4.1 Dependencia de la f_{bar} con diferentes parámetros estructurales de la muestra.

Para entender el por qué diverge el valor de la fracción de galaxias barradas para las muestras de LSBs y HSBs a una masa constante, se exploró una serie de parámetros físicos de estos sistemas que podrían tener injerencia en la forma que las barras se forman y crecen. Los parámetros especificados en la sección 3.3.1 se analizarán para ver cómo influye en la cantidad de barras encontradas. Estos fueron la fracción de gas f_{gas} , el parámetro de espín adimensional λ y la fracción en masa del bulbo B/T .

4.1.1 f_{bar} vs fracción de gas f_{gas}

El primer parámetro que analizaremos es la fracción de gas f_{gas} (ecuación 3.5) presente en las galaxias de nuestra muestra. Una mayor cantidad de gas actúa como efecto inhibitor de la formación y crecimiento de las barras estelares (Masters et al. [2012], Rosas-Guevara et al. [2022]). En el trabajo realizado por Zhou et al. [2021] se encontró que las galaxias de baja masa y ricas en gas presentan barras cortas (~ 2 kpc), mientras que aquellas galaxias que tiene una mayor masa estelar y que son pobres en gas presentan longitudes mayores (2 – 6 kpc). A masas estelares fijas, la longitud relativa de la barra muestra un decremento con el aumento de la fracción de gas indicándonos el efecto supresor antes mencionado. La dependencia de f_{bar} con f_{gas} en nuestra muestra se presenta en el panel izquierdo de la figura 4.6, donde se aprecia que para toda la muestra, la fracción de galaxias barradas depende fuertemente de la fracción de gas. Comprobamos que, conforme aumenta el contenido de gas en la galaxia, nuestra fracción de galaxias barradas disminuye sistemáticamente tal como se reporta en la literatura citada previamente. Nuestra fracción de galaxias barradas f_{bar} decae en más de 40%.

En el panel derecho de la misma imagen apreciamos, para la muestra segregada en LSBs y HSBs, la fracción de gas como función de la masa estelar. Es notorio que en promedio, las LSBs poseen una f_{gas} tres veces mayor con respecto a las HSBs. Vemos también que en general, el contenido de gas disminuye hacia masas estelares mayores para ambas submuestras. Sin embargo, a $M_{\star} \geq 10^{10.6}$ y $M_{\star} \geq 10^{11.2} M_{\odot}$ para HSBs y LSBs, respectivamente, f_{gas} comienza a aumentar ligeramente, presentando un cruce en $M \sim 10^{11.2} M_{\odot}$. Es a partir de estos valores de M_{\star} donde tenemos nuestra inversión en la fracción de galaxias barradas de la muestra segregada. El contenido de gas en ambas galaxias es consistente con la teoría (De Blok et al. [1996], Burkholder et al. [2001]), con las LSBs siendo galaxias más extendidas, tenues y ricas en gas mientras que sus contrapartes HSBs son más compactas, brillantes y con un contenido de gas menor. Si nos fijásemos únicamente en su contenido de gas y dado el efecto inhibitor en la formación de barras del gas, podríamos esperar que las HSBs presenten mayor cantidad de barras que las LSBs.

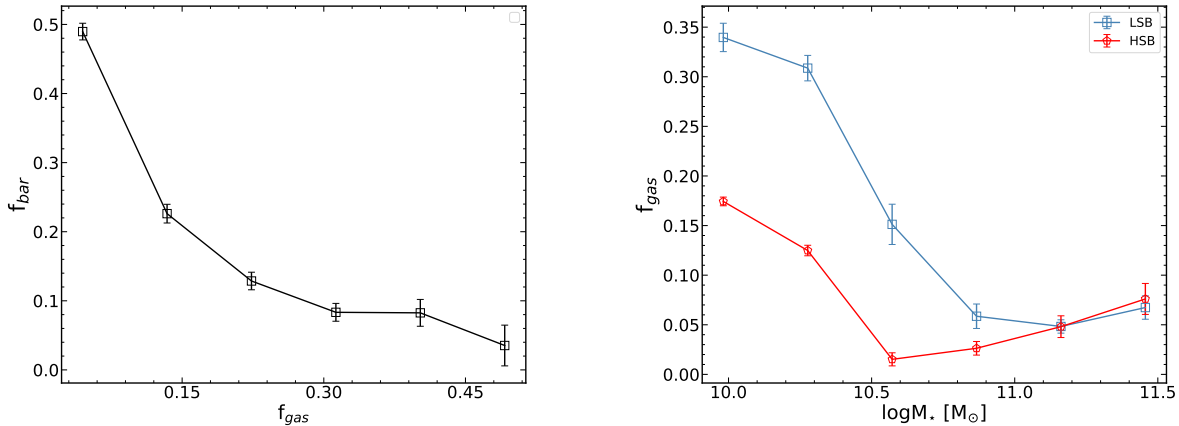


Figura 4.6: Izquierda: fracción de galaxias barradas como función de la fracción de gas para la muestra total. Derecha: Fracción de gas como función de la masa estelar para la segregación LSBs y HSBs.

4.1.2 f_{bar} vs parámetro de espín λ

El segundo parámetro a analizar para ver su influencia en la fracción de galaxias barradas es el parámetro adimensional de espín del halo de materia oscura λ (ecuación 3.6), en el cual está embebida la galaxia. El efecto o influencia del valor de λ en la barra estelar se estudia en Long et al. [2014], donde se construyeron modelos de galaxias usando simulaciones de N-cuerpos y estableciendo valores iniciales para diferentes parámetros; todos los modelos presentaban la misma distribución de masa, tanto estelar como de materia oscura pero con valores del parámetro de espín distintos. En el trabajo únicamente se analizaron valores de $\lambda \sim 0 - 0.09$, así, cualquier diferencia en la evolución de las galaxias debería estar relacionada con la distribución inicial de momento angular del halo y su redistribución dentro del sistema barra-disco-halo. Los resultados mostraron, como se observa en el panel superior de la figura 1.8, que existe una supresión en el crecimiento de las barras estelares en los halos de materia oscura con rotación importante. Esta inhibición se da en la fase de evolución secular. El estudio concluye que, a un valor de espín $\lambda \geq 0.03$, tenemos que se inhibe el crecimiento de la barra. En el panel superior observamos la evolución de la amplitud de la barra A_2/A_0 como función del tiempo en donde podemos apreciar que la formación de la barra y el máximo de la misma se obtiene para sistemas con valores elevados del espín. A tiempos posteriores, la barra se debilita y su amplitud se suprime conforme aumenta el valor de λ .

En particular, en este trabajo se calcularon los valores de λ para la muestra sin segregación, considerando exclusivamente galaxias centrales y para las submuestras LSBs y HSBs, como se mencionó en la metodología. La figura 4.7 muestra la fracción de galaxias barradas en función de λ (panel izquierdo), en donde se observa que f_{bar} decrece al aumentar el parámetro de espín en el rango $0 < \lambda < 0.07$, cayendo de un valor superior al 30 % a un no cerca de ~ 24 %, estabilizándose en ese valor. A comparación de la dependencia de la fracción de galaxias barradas

con la masa estelar o la fracción de gas, la dependencia con λ parece ser no tan relevante. En la misma figura pero ahora en el panel derecho, observamos los valores de espín que toman las submuestras segregadas LSBs y HSBs, como función de la masa estelar. Como se aprecia, las LSB tienen sistemáticamente valores de λ mayores, a todo el rango de masas, con respecto a los valores para las HSBs. A pesar de que a partir de $\sim 10^{10.4} M_{\star}$ se aprecia un aumento en el parámetro de espín de las galaxias de alto brillo, éstas no sobrepasan los valores de sus contrapartes de bajo brillo superficial. Habiendo mencionado que valores altos de espín suprimen la presencia o fuerza de las barras estelares, entonces es natural esperar que la fracción de galaxias barradas sea menor en el caso de las LSBs en comparación con las HSBs, analizando únicamente el parámetro de espín.

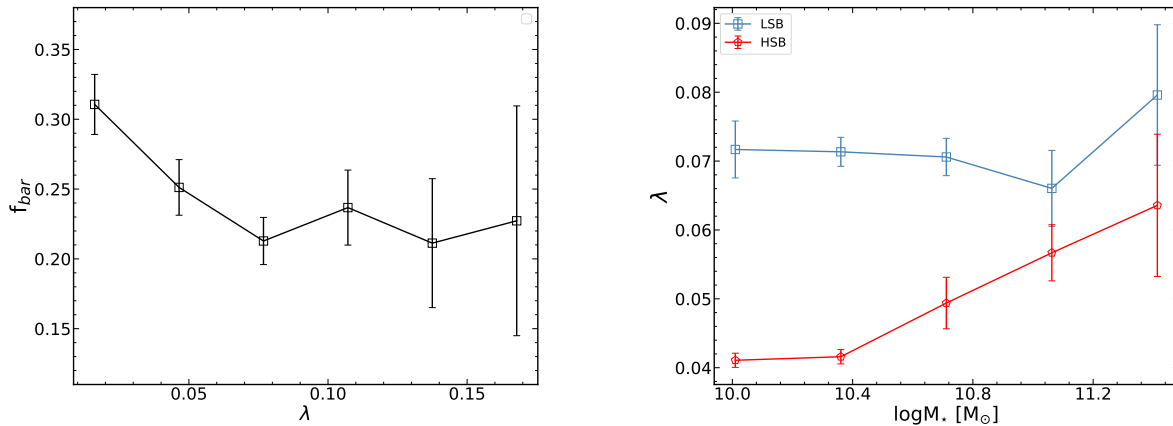


Figura 4.7: Fracción de galaxias barradas como función del parámetro de espín de la muestra de galaxias centrales (izquierda), donde se aprecia una caída moderada de f_{bar} para galaxias con valores moderados a altos de λ . En el panel derecho observamos los valores de f_{bar} de la muestra segregada como función de la masa estelar teniendo valores sistemáticamente mayores las LSB.

4.1.3 f_{bar} vs fracción de masa bulbo-total B/T

Finalmente analizamos otro parámetro que en principio podría afectar la cantidad de barras encontradas en nuestra muestra: la componente esferoidal central de la galaxia: el bulbo, más específicamente la fracción en masa bulbo-total.

En un estudio realizado por [Kataria and Das \[2018\]](#), se usaron simulaciones de N -cuerpos para estudiar dos tipos de muestras, una con bulbos densos y otra con protuberancias menos densas, con el fin de observar el efecto de esta componente central en la barra estelar de la galaxia. Encontrando que la fracción de galaxias barradas disminuye al aumentar la masa del bulbo. Para los modelos donde el bulbo es menos denso, la escala de tiempo de formación de barras aumenta conforme va aumentando la masa del bulbo y se encuentra que ya no se forman barras cuando la fracción bulbo-disco (B/D) > 0.6 . En la muestra donde se tienen bulbos densos se encontró que una barra estelar se forma antes para galaxias sin bulbo en comparación a las que sí los presentan, en este caso no se forman barras cuando $B/D > 0.3$. En el trabajo mencionado también se analizó la dependencia de la fuerza de la barra como función de la fuerza fraccional de la protuberancia ($F_{\text{bulge}}/F_{\text{tot}}$), la cual es directamente proporcional a la masa del bulbo, encontrando el comportamiento presentado en la figura 4.8. En esta figura observamos un decremento en la fuerza de la barra conforme aumenta $F_{\text{bulge}}/F_{\text{tot}}$.

Para explorar el impacto de la fracción bulbo-disco en las galaxias de nuestra muestra se usó la fracción de masa del bulbo presentada en el catálogo de [Genel et al. \[2015\]](#) en donde, como se mencionó en la sección anterior, proporcionan fracciones de bulbo con respecto a la masa total (B/T) de las galaxias que conforman la muestra. En el trabajo de [Genel et al. \[2015\]](#) se menciona que para clasificar entre galaxias difusas con bulbos pequeños y galaxias concentradas con bulbos significativos se usó la estadística de bulbo $F(G, M_{20})$ ([Snyder et al. \[2015\]](#)), donde valores de F positivos corresponde a una galaxia de bulbo dominante y valores negativos para

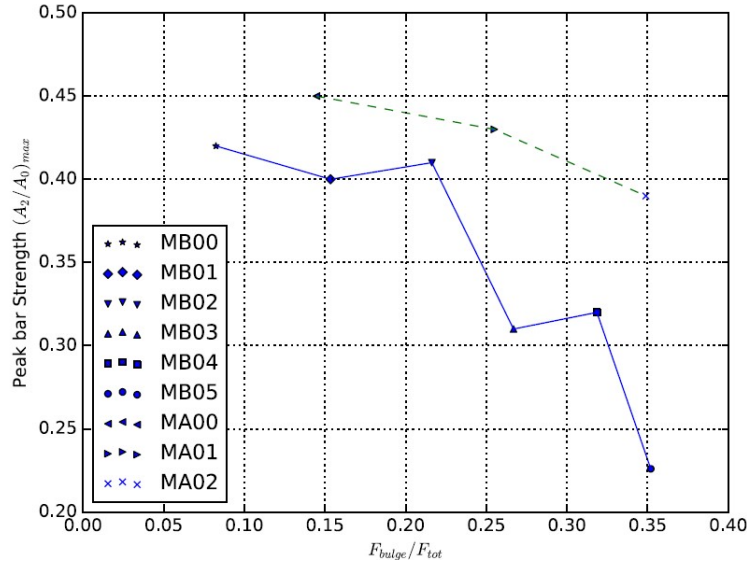


Figura 4.8: Fuerza de la barra como función de la fuerza fraccional del bulbo para todos los modelos de formación de barras de bulbos densos (línea punteada) y no tan densos (línea sólida) presentada en Kataria and Das [2018].

las disco dominante. A manera de recordatorio, en el trabajo de Genel se tomaron los valores de $F < -1$ y $F > 0.1$ para definir entre galaxias difusas y concentradas, respectivamente.

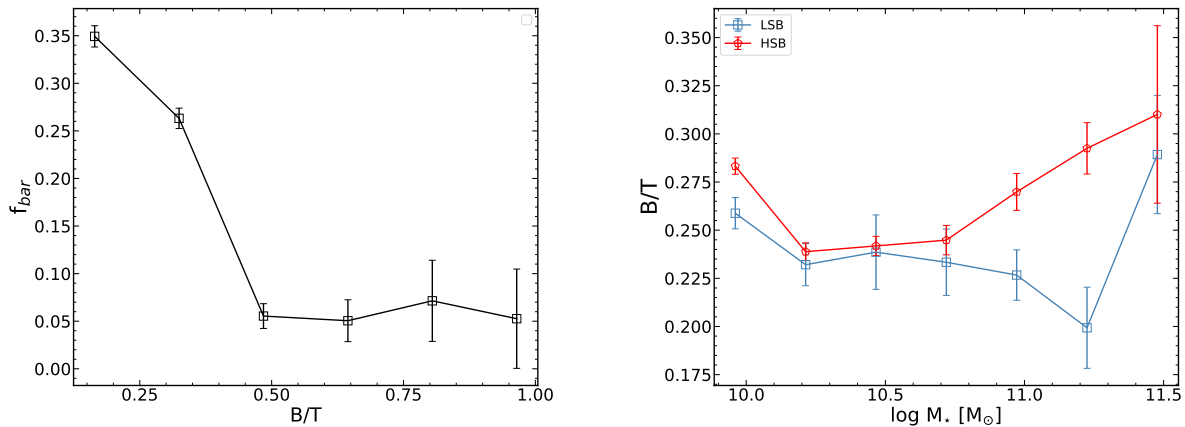


Figura 4.9: Izquierda: fracción de galaxias barradas como función de fracción de masa del bulbo-total para la muestra total de centrales y satélites. Derecha: Fracción de bulbo como función de la masa estelar para las submuestras LSBs y HSBs, los valores de B/T se obtuvieron de Genel et al. [2015].

En la figura 4.9 se presenta la fracción de barras como función de la fracción bulbo-total (panel izquierdo) para toda la muestra de galaxias centrales y satélites. Se aprecia una disminución pronunciada de f_{bar} especialmente a valores bajos de B/T (< 0.50). Después de esta caída la fracción de barras se aplanan y se mantiene más o menos constante hasta los valores más altos que alcanza la fracción de bulbo-total en la muestra. Tenemos entonces una relación inversamente proporcional entre la protuberancia y la fracción de barras. Este comportamiento es consistente con las conclusiones de [Kataria and Das \[2018\]](#), quienes encontraron que para fracciones de masa bulbo-disco > 0.6 no se presenta formación de barras.

En el panel derecho tenemos la fracción de masa de bulbo-total como función de la masa estelar. Observamos que a partir de masas estelares $\sim 10^{10.2}$ tenemos un aumento gradual en B/T para las HSB, presentando su valor más alto en el último bin con $B/T \sim 0.3$. Las LSB van decreciendo y tienen una caída significativa en fracción de bulbo hasta una masa estelar $\sim 10^{11.2}$, aproximadamente a este valor de masa es donde presentamos la inversión en nuestra fracción de galaxias barradas (Figura 4.5). Dado que una fracción de bulbo menor fortalece el nacimiento y crecimiento de las barras entonces con la caída de B/T en LSB tendremos, a esas masas correspondientes, una mayor fracción de galaxias barradas en LSB que en HSB, por la influencia de la componente esferoidal central. Mientras que para las HSB B/T aumenta a casi todo el rango de masas, para las LSB en general disminuye aunque en los últimos dos bins aumente considerablemente. Es importante hacer notar que el incremento súbito de la fracción B/T que presenta la muestra de galaxias LSB a altas masas es inusual y no parece reproducir el comportamiento observado en galaxias observadas en el universo local, en donde las galaxias LSB tienden a tener una fracción B/T menor a la presentada por las galaxias HSB, incluso para el caso de altas masas ([Pahwa and Saha \[2018\]](#)).

Otro catálogo público que nos proporciona los valores de B/T es el de [Du et al. \[2019\]](#), con el que podemos comparar los comportamientos obtenidos por Genel. Para esto tomamos la

clasificación 1 de Du, la cual descompone la galaxia en diferentes componentes (disco frío, disco caliente, bulbo y halo), y consideramos el valor dentro de 3 veces el radio de media masa estelar. Con estas consideraciones, se encontraron los comportamientos presentados en la Figura 4.10, para la el panel izquierdo, podemos ver la fracción de galaxias barradas como función de la fracción B/T para la muestra total donde se aprecia una caída significativa en la fracción de barras al incrementar B/T . Sin embargo, para valores de $B/T > 0.4$ vemos que hay un ligero aumento de f_{bar} para luego decaer nuevamente. En el panel derecho observamos la dependencia de la fracción de masa bulbo-total como función de la masa estelar. Es notorio que conforme aumentamos M_* tenemos una fracción de masa bulbo-total menor. Se esperaría que a mayores masas estelares, B/T aumente, sin embargo esto no se ve reflejado en la figura. Lo que sí se aprecia es que a casi todo el rango de masas, tenemos una fracción bulbo mayor para las LSBs mientras que las HSBs presentan un valor menor pudiendo indicar bulbos no tan prominentes.

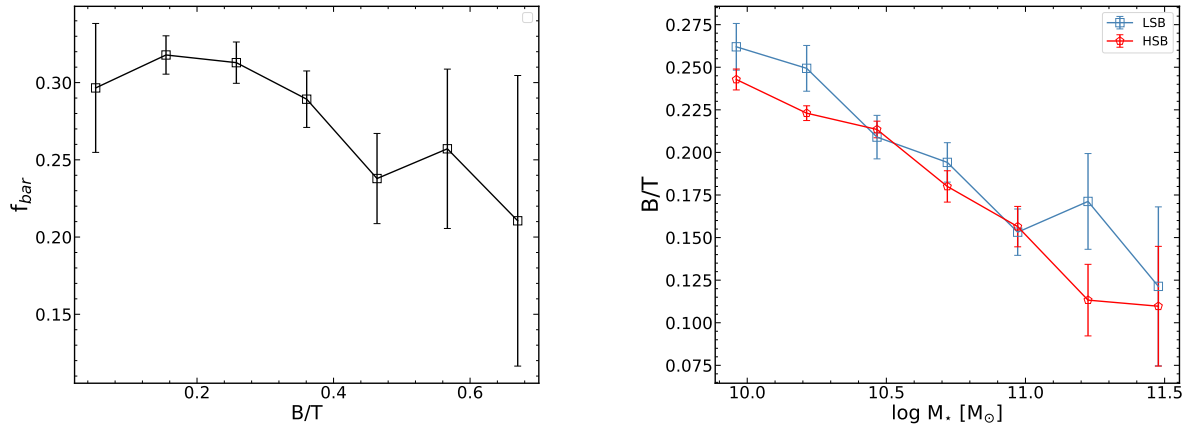


Figura 4.10: Panel izquierdo: fracción de galaxias barradas como función de fracción de masa del bulbo-total para la muestra total. Panel derecho: Fracción de bulbo como función de la masa estelar para las submuestras, los valores de B/T se obtuvieron del catálogo de [Du et al. \[2019\]](#).

Usando el catálogo de [Du et al. \[2019\]](#) tenemos que B/T disminuye al aumentar la masa estelar. Con respecto al valor de f_{bar} como función de la fracción de masa bulbo-total, se aprecia

una ligera disminución conforme aumentamos B/T aunque no se aprecia un comportamiento claro. Estos comportamientos se explican en el trabajo de [Du et al. \[2019\]](#), en donde se menciona que el método usado para la identificación de estructuras cinemáticas falla para el caso de galaxias barradas. Lo anterior debido a la complejidad de la cinemática de las partículas que se mueven en órbitas de barra. Por ello, el citado trabajo se centra en el estudio (principalmente) de galaxias no barradas y no es conveniente el uso de su catálogo para nuestro fin. Dado que las partículas de barra pueden contaminar significativamente componentes, como el disco caliente o el bulbo, se podría esperar por ejemplo, una sobre estimación en la masa de este último. El comportamiento mostrado en el panel derecho de la Figura 4.10 también se aprecia en el trabajo de [Du et al. \[2019\]](#).

4.2 Muestras de control

En la sección anterior analizamos cómo se comportaba la fracción de galaxias barradas en nuestra muestra total y segregada ante diferentes propiedades de las galaxias (masa estelar, contenido de gas, parámetro de espín y la fracción de bulbo). En esta sección se generarán muestras de control que nos ayudarán a ver cómo cambia f_{bar} controlando estos parámetros, cuyas distribuciones originales para nuestra muestra se encuentran en la sección 3 de metodología.

Para todas las muestras de control se tomó como base las galaxias de bajo brillo superficial dado que es el caso en particular que nos interesa; así, para cada galaxia LSB, se busca una galaxia de la submuestra de HSB cuyas características caigan dentro de cierto valor definido, de tal manera que ambas compartan parámetros similares en valor y así analizar si controlando estas cantidades cesa la diferencia entre la fracción de galaxias barradas en las submuestras; especialmente a masas grandes donde tenemos la inversión de la tendencia. Dado que las HSB no se pueden repetir en la muestra de control, idealmente deberíamos obtener una nueva muestra

del tamaño de la población de las galaxias de bajo brillo superficial y entre ambas (LSB y HSB), sus características deben ser muy similares.

4.2.1 Primera muestra de control

La primera muestra de control (**MC1**) se construyó tomando los primeros 3 parámetros mencionados anteriormente: masa estelar, fracción de gas y el parámetro adimensional de espín. Aquí estamos suponiendo que la diferencia en la fracción de galaxias barradas se debe a estos tres parámetros, ya que, como apreciamos en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7, f_{bar} tiene una tendencia marcada con estos parámetros. La cantidad de barras aumenta para galaxias con masas estelares más altas, es decir, más masivas, pero con respecto a f_{gas} vemos una relación inversamente proporcional, mayor contenido de gas indica menos presencia de barras. Aunque la fracción de galaxias barradas como función del parámetro de espín no sea muy marcada (ya que vemos un comportamiento casi lineal), es importante estudiar al menos para nuestra muestra que tanto afecta este factor. Las tres cantidades se consideran de tal manera que la diferencia entre los parámetros de las LSB y HSB tengan una buena concordancia, es decir, que estén lo suficientemente próximos. Para la masa estelar se buscaron galaxias de alto brillo superficial tal que $\Delta M_{\star} = 0.1$ dex, tolerancia de masa usada comúnmente en galaxias en otros trabajos del área como en [Ellison et al. \[2013\]](#). Para la cantidad de gas presente se usó $\Delta M_{\text{gas}} = 0.1$ dex y para el parámetro de espín se tomaron valores dentro del rango $\Delta \lambda = 0.01$ teniendo en cuenta que los valores que toma λ son del orden de 10^{-2} . Debido a que el parámetro de espín únicamente está bien definido para galaxias centrales, entonces para MC1 se usó nuestra muestra filtrada de 2,261, que consta de 489 LSB y 1,772 HSB centrales. Para MC1 se encontraron 393 parejas LSB-HSB que cumplen con las condiciones establecidas.

Para verificar que las distribuciones de las propiedades involucradas en la muestra de control hayan sido extraídas de la misma población original correspondiente, se realizó la prueba de

Kolmogorov-Smirnov (KS) que nos proporciona la probabilidad (p) de que esto sea cierto. Altas probabilidades nos da un buen indicio de que los parámetros de las parejas obtenidas provengan de la misma muestra. Los valores obtenidos para MC1 se muestran en la tabla 4.1. En la figura 4.11 presentamos las distribuciones de la masa de gas (panel izquierdo) y del parámetro de espín (panel derecho) obtenidas para MC1. Como era de esperarse y por las condiciones establecidas, las distribuciones son prácticamente iguales para ambas submuestras. La mayoría de las galaxias presentan masas de gas mayores a $\sim 10^8 M_{\odot}$ y parámetros de espín de ~ 0.06 .

Cuadro 4.1: Valores de probabilidad p de la pruebas KS para los parámetros utilizados en MC1.

Parámetro	p
M_{\star}	0.63
M_{gas}	0.98
λ	0.62

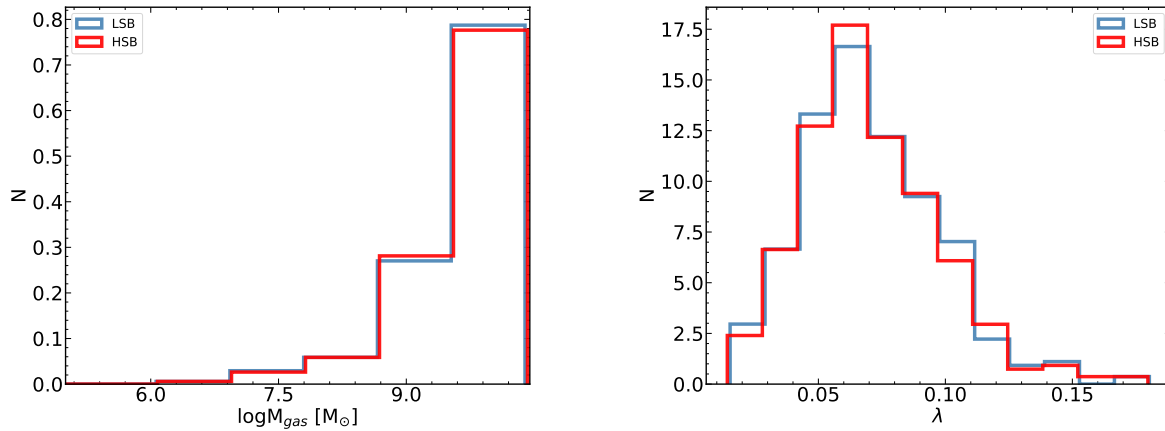


Figura 4.11: Distribuciones obtenidas de masa de gas (panel izquierdo) y parámetro de espín (panel derecho) para la primera muestra de control MC1. Como se observa, en ambos casos las distribuciones son prácticamente iguales.

El resultado de f_{bar} para MC1 se presenta en la figura 4.12 donde observamos que para la muestra segregada, el valor de f_{bar} colapsa a masas pequeñas, de hecho, los primeros cuatro

bines tienen prácticamente los mismos valores. Si tomamos en cuenta las barras de error obtenemos fracciones iguales hasta $M_{\star} \sim 10^{10.6} M_{\odot}$. A partir de $\sim 10^{10.8} M_{\odot}$ observamos que las galaxias de bajo brillo superficial siguen presentando una f_{bar} mayor. Sin embargo, si tomamos en consideración nuestras barras de error se podría decir que los valores se acercan considerablemente. En general, se presenta una menor discrepancia entre las fracciones barradas con respecto a la figura 4.5, donde notamos una diferencia más marcada. MC1 nos indica que en realidad los 3 parámetros considerados sí están teniendo una influencia en f_{bar} y que si nuestras galaxias de alto y bajo brillo superficial se pareciesen en estas cantidades, entonces encontraríamos un número prácticamente igual de barras en LSB que en HSB, especialmente si nos enfocamos en el rango de masas bajas.

4.2.2 Segunda muestra de control

A pesar de que controlando el valor de la masa estelar, la fracción de gas y el espín galáctico, la fracción de galaxias barradas entre nuestras submuestras de LSBs y HSBs es prácticamente el mismo, aún nos falta identificar el parámetro responsable de la diferencia en el rango de altas masa. Es por ello que la segunda muestra de control (**MC2**) generada tomó en cuenta únicamente la fracción de masa bulbo-total B/T , usando los valores presentados en el catálogo de Genel et al. [2015]. Como se mencionó anteriormente, el parámetro B/T tiene una influencia marcada en la fracción de galaxias barradas, conforme consideramos bulbos más grandes tenemos un decremento constante en f_{bar} a todo el rango de masas y presentando sistemáticamente una mayor cantidad de barras en las HSBs. Es por ello que el tamaño del bulbo en la galaxia es un factor importante a considerar en la presencia de barras estelares, un bulbo extendido o denso podría desestabilizar o desintegrar a la barra por afectaciones en el potencial. Para ver cómo afecta este parámetro se tomó una $\Delta B/T = 0.005$ usando nuestra muestra total que considera galaxias centrales y satélites. La muestra MC2 contempla 652 pares de galaxias LSB-HSB que

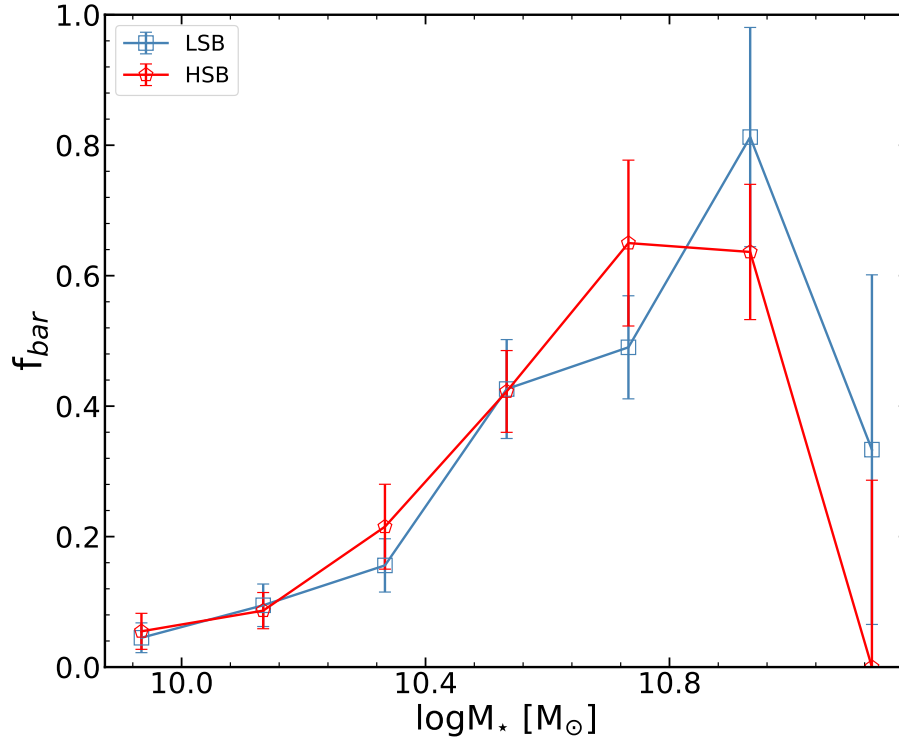


Figura 4.12: Fracción de galaxias barradas como función de la masa estelar controlando M_* , f_{gas} y λ .

cumplen con la condición establecida. La prueba KS para MC2 arroja un valor de probabilidad p como se muestra en la tabla 4.2.

Cuadro 4.2: Valores de probabilidad p de la pruebas KS para los parámetros utilizados en MC2.

Parámetro	p
B/T	0.99

La distribución obtenida de B/T para MC2 se presenta en la figura 4.13 donde vemos que las submuestras presentan prácticamente las mismas distribuciones, ambas parecen estar encimadas con la mayoría de las galaxias presentando valores de $B/T \sim 0.25$.

En la figura 4.14 se muestra la fracción de galaxias barradas como función de la masa estelar

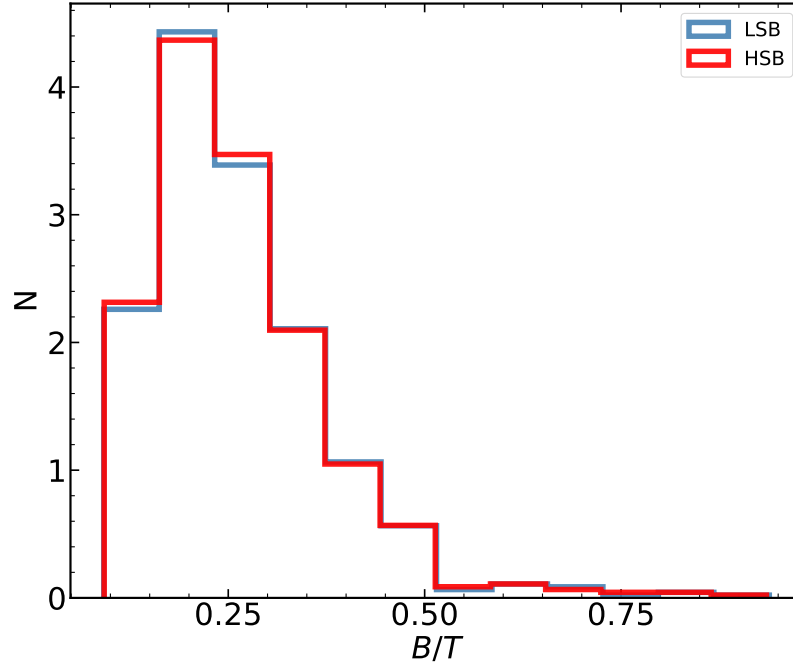


Figura 4.13: Distribución de la fracción en masa bulbo-total para la segunda muestra de control.

obtenida para MC2. Al controlar la componente esferoidal del bulbo, observamos como a masas menores a $\log M_{\star} < 11$ tenemos una mayor cantidad de barras estelares para las HSBs con respecto a las LSBs. Para masas mayores a $10^{11} M_{\odot}$, encontramos que el valor de f_{bar} para las dos submuestras es compatible, considerando la extensión de las barras de error, lo que nos indica que las diferencias en f_{bar} en este rango de masas es mayormente debido a la diferencia de la fracción B/T.

4.2.3 Tercera muestra de control

Finalmente construimos una tercera muestra de control (**MC3**) considerando los parámetros que parecen tener más influencia en la fracción de galaxias barradas: la masa estelar, la fracción

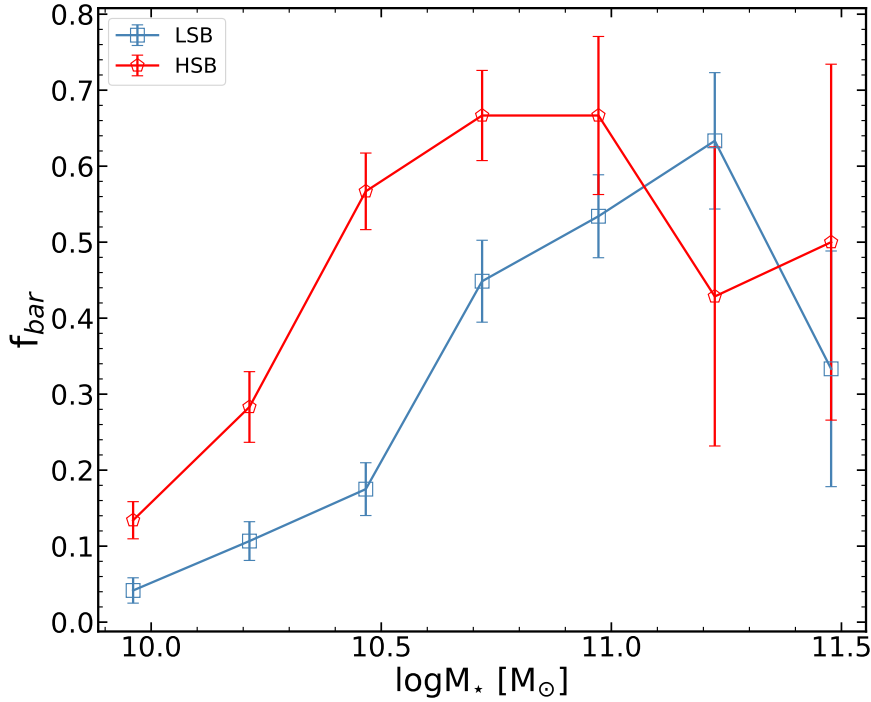


Figura 4.14: fracción de galaxias barradas como función de la masa estelar para la muestra de control considerando la fracción de bulbo B/T .

de gas y la fracción de bulbo. En este caso excluimos λ ya que como se apreció en la figura 4.7, en nuestra muestra en particular, no parece tener una influencia apreciable con la fracción de galaxias barradas ya que notamos un comportamiento casi constante y sólo se aprecia una pequeña disminución de f_{bar} al aumentar λ . Sin embargo el decremento no es muy significativo; al no considerar el espín entonces podemos tomar nuestra muestra total de 4224 galaxias, sin limitarla a galaxias centrales.

Los valores de las diferencias (Δ) usadas son las mismas que las mencionadas para las muestras de control anteriores (0.1 dex para M_* y M_{gas} , y 0.005 para la fracción de masa bulbo-total B/T). Para esta muestra, de las 652 galaxias de bajo brillo superficial, se encontraron 398

parejas LSB-HSB que cumplen con los rangos especificados. Los valores para la prueba KS para los parámetros considerados en MC3 se encuentran en la tabla 4.3.

Cuadro 4.3: Valores de probabilidad p de la pruebas KS para los parámetros utilizados en MC3.

Parámetro	p
M_{\star}	0.75
M_{gas}	0.86
B/T	0.99

Las distribuciones de la masa de gas (panel izquierdo) y la fracción de bulbo (panel derecho) de esta última muestra de control se presentan en la figura 4.15. Notamos que la mayoría de las galaxias para MC3 presentan valores de M_{gas} mayores a $10^8 M_{\odot}$ y $B/T \sim 0.16$, para ambas submuestras las distribuciones son muy parecidas como también se comprobó con la prueba KS.

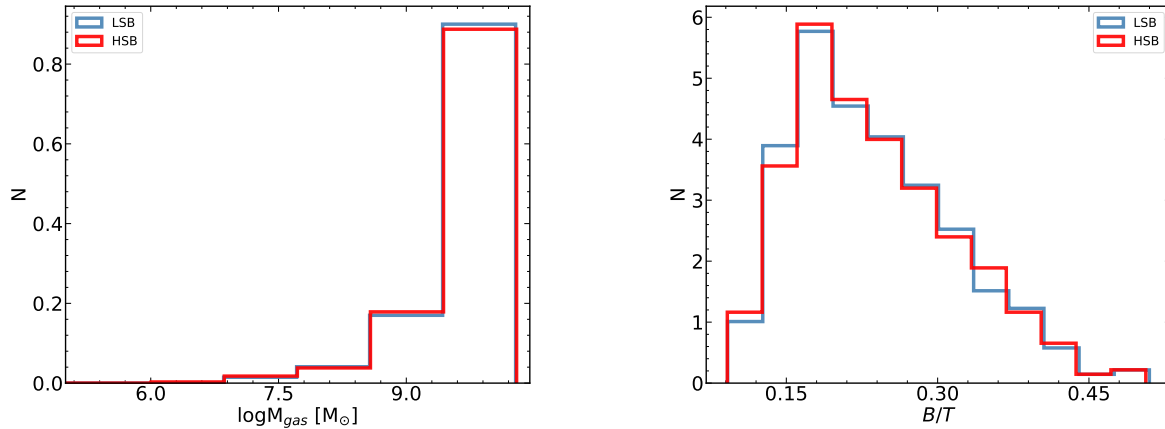


Figura 4.15: Distribuciones obtenidas de masa de gas (panel izquierdo) y fracción de masa bulbo-total (panel derecho) para la tercera muestra de control MC3. Como se observa, las submuestras presentan distribuciones muy similares.

En la figura 4.16 se muestra el comportamiento de f_{bar} como función de la masa estelar para MC3, como se aprecia, esta muestra de control presentó mejores resultados.

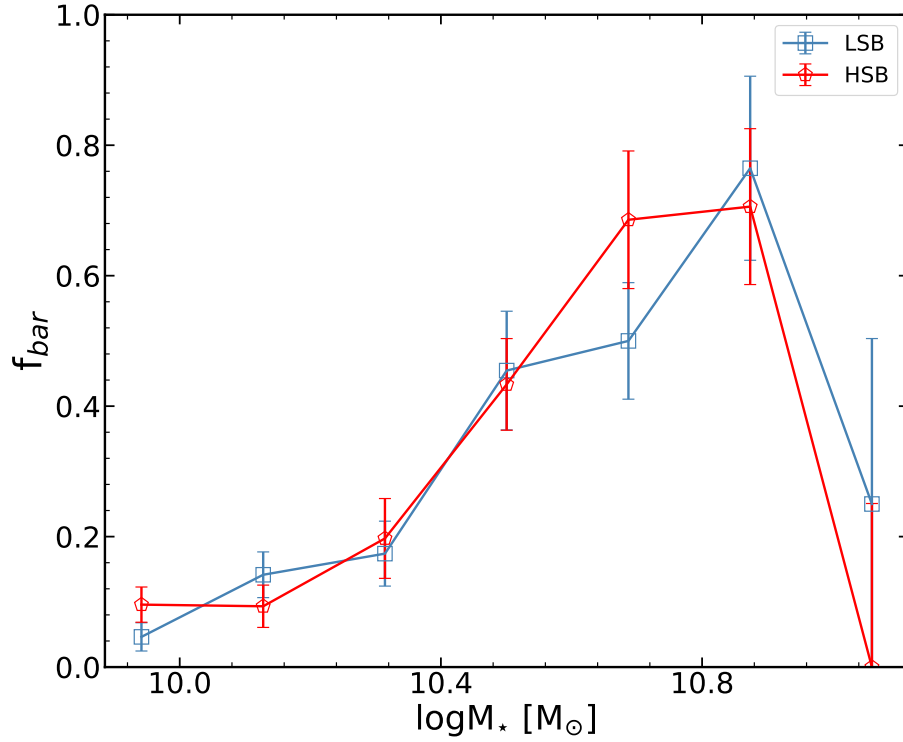


Figura 4.16: fracción de galaxias barradas como función de la masa estelar para la muestra de control considerando B/T , M_* y f_{gas} .

La tercera muestra de control fue la que presentó mejores resultados debido a que, como se observa, a todo el rango de masas estelares presentamos cantidades encontradas de barras estelares prácticamente iguales. La mejor concordancia la presentamos nuevamente a masas bajas ($< 10^{10.6} M_\odot$), para $M_* \sim 10^{10.75} M_\odot$ vemos que las HSBs tienen una f_{bar} más grande en comparación a las LSB, comportamiento esperado y respaldado por la teoría. A $M_* > 10^{10.8} M_\odot$, correspondiente a los dos últimos bins, tenemos una ligera inversión. Sin embargo, las barras de error presentadas están prácticamente sobrepuestas por lo que se podría tener prácticamente el mismo valor. Podemos señalar entonces que los parámetros principales que influyen en la cantidad de galaxias barradas encontradas en nuestra muestra son, primeramente, la propiedad

más importante en cualquier objeto astronómico: la masa, a mayor masa estelar tendremos un aumento de f_{bar} . La cantidad de gas presente en las galaxias también influye en los resultados ya que como mencionamos con anterioridad, funciona como un factor inhibidor del crecimiento de la barra. Finalmente, la fracción de bulbo-total, al igual que dos parámetros anteriores, jugó un papel importante ya que la cantidad de barras parece tener una correlación negativa con este parámetro. Haciendo un control de estas 3 cantidades, las galaxias de alto y bajo brillo superficial se comportan básicamente de la misma manera con respecto a su presencia de barras estelares.

En la tabla 4.4 se presenta un compilado de valores de p obtenidos para las pruebas Kolmogorov-Smirnov, aplicadas a los respectivos parámetros utilizados en las tres muestras de control presentadas anteriormente. Observamos que los mejores valores de p se obtienen para la tercera muestra con valores mayores a 0.7. Para MC2 y MC3 tenemos que el parámetro de B/T es el que presenta los valores de probabilidad más altos tal como se pudo apreciar en sus respectivas distribuciones obtenidas.

Cuadro 4.4: Valores de probabilidad p de las pruebas K-S para los parámetros utilizados en las tres muestras de control realizadas.

Parámetro	MC1	MC2	MC3
M_{\star}	0.63	-	0.75
M_{gas}	0.98	-	0.86
λ	0.62	-	-
B/T	-	0.99	0.99

Discusión y conclusiones.

En este trabajo se empleó la simulación cosmológica TNG100 del proyecto IllustrisTNG para estudiar y analizar la presencia de barras estelares en galaxias de bajo brillo superficial (LSBs), en contraposición de galaxias de alto brillo (HSBs). Con base en algunos de los catálogos públicos presentes en el sitio oficial del proyecto IllustrisTNG, se generó la muestra final utilizada en este trabajo; recordando que la identificación de la barra se obtuvo con el método de ajuste de elipses y para la segregación entre LSBs y HSBs, se empleó valor límite para el brillo superficial central de $22 \text{ mag arcsec}^{-2}$ en la banda r . Nuestra muestra total entonces está compuesta por una total de 4,224 galaxias de disco a un corrimiento al rojo $z = 0$ y con masas $M_{\star} \geq 10^{10} M_{\odot}$, de las cuales 652 corresponde a galaxias LSB y 3,572 son HSBs.

Entre los resultados obtenidos, se encontró que de la muestra total, 1,172 galaxias presentan barras estelares, esto nos da una fracción de galaxias barradas del 27.75%. Este resultado es consistente con trabajos observacionales como los de [Masters et al. \[2011\]](#) y [Vera et al. \[2016\]](#) quienes reportaron fracciones de galaxias barradas de $\sim 29\%$ y 25.82% , respectivamente.

También es consistente con trabajos teóricos como el de [Rosas-Guevara et al. \[2022\]](#) quien encontró, para la simulación TNG50, una $f_{\text{bar}} = 30\%$ para galaxias a $z = 0$. El trabajo de [Cavanagh et al. \[2022\]](#), usando la simulación EAGLE, encontró la misma fracción de galaxias barradas ($\sim 30\%$). En nuestra muestra, f_{bar} aumenta con la masa estelar hasta alcanzar un máximo de $\sim 60\%$ a $M_{\star} \sim 10^{10.6} M_{\odot}$, este valor resulta ser consistente con el trabajo de [Eskridge et al. \[2000\]](#) quien encontró esta misma fracción para galaxias observadas en el infrarrojo cercano. A masas mayores tenemos que la fracción se desploma hasta tomar valores del $\sim 20\%$.

Analizando nuestras submuestras de galaxias LSB y HSB, encontramos que las galaxias de alto brillo superficial presentan una fracción de galaxias barradas del 28.11% , lo que indica que de las 3,572 galaxias que conforman la submuestra, 1,011 presentan estructura de barra. De la submuestra de galaxias de bajo brillo tenemos una $f_{\text{bar}} = 24.73\%$, con 161 galaxias barradas de la submuestra total de 652. Estos valores son consistentes con los resultados presentados en el trabajo de [Cervantes Sodi and Sánchez-García \[2017\]](#), quienes reportaron fracciones de galaxias barradas del 30% y 20% para las HSBs y LSBs, respectivamente; en [Masters et al. \[2011\]](#) y [Pahwa and Saha \[2018\]](#) se concluye también que las galaxias de alto brillo superficial tienden a presentar mayor cantidad de galaxias que pueden formar una barra estable. El hecho de que las HSBs presenten una mayor cantidad de barras con respecto a sus contrapartes LSBs en nuestra muestra, indica que las diferencias entre los parámetros estructurales de cada tipo de galaxias puede influenciar la cantidad de barras encontradas. En particular se analizaron 4 parámetros: masa estelar M_{\star} , fracción de gas f_{gas} , fracción de masa bulbo-total B/T y el parámetro adimensional de espín λ .

Con respecto a la dependencia de f_{bar} con M_{\star} , a casi todo el rango de masas, la fracción de galaxias barradas aumenta con el incremento de la masa estelar, tal como se presentó en la figura 4.4. Esto es consistente con trabajos previos como [Cervantes Sodi \[2017\]](#), [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#), [Zhao et al. \[2020\]](#) quienes presentan el mismo comportamiento. La dependencia del

número de barras encontradas en función de la masa es muy marcada ya que a masas pequeñas presenta un aumento significativo y luego tiene una caída a masas grandes. Para la segregación de nuestra muestra en LSBs y HSBs se tiene el mismo comportamiento. A masas estelares entre $10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$, las LSBs presentan menores fracciones de galaxias barradas que las HSB sin embargo se observa una inversión en la tendencia a masas más grandes. La dependencia de la fracción de galaxias barradas con la masa estelar suele atribuirse a la necesidad de tener un disco autogravitante, lo suficientemente masivo para que, una vez que se presente una inestabilidad gravitacional, ésta se amplifique y pueda dar pie a la formación de la barra. En este sentido, mientras más masiva sea la galaxia, más probable es que estas inestabilidades se presenten y amplifiquen. El hecho de que f_{bar} sea menor para la submuestra de galaxias LSB a masa estelar fija puede también atribuirse a que, aunque la galaxia tenga suficiente masa para albergar y amplificar inestabilidades de barra, el disco estelar es tan poco denso que la inestabilidad es suprimida por algún otro factor (i.e. el halo de materia oscura o la componente de gas).

De acuerdo con diversos trabajos ([Masters et al. \[2012\]](#), [Cervantes Sodi \[2017\]](#), [Rosas-Guevara et al. \[2022\]](#)), el contenido del gas en la galaxia actúa como un efecto inhibitorio en la formación y crecimiento de la barra estelar, a mayor contenido de gas tendremos una f_{bar} más pequeña. De acuerdo con [Cervantes Sodi \[2017\]](#), la fracción de gas decrece al incrementar la masa estelar, por lo que el hecho de que f_{bar} disminuya al aumentar el contenido de gas puede ser una consecuencia de la dependencia de la fracción de galaxias barradas con M_{\star} previamente mencionada. El comportamiento de f_{bar} con f_{gas} para nuestra muestra es consistente con la teoría ya que también presentamos una disminución significativa de f_{bar} a fracciones de gas grandes, tal como se muestra en la [Figura 4.6](#). En nuestras submuestras, las LSBs presentan sistemáticamente una mayor cantidad de gas con respecto a las HSBs, por lo que es de esperar que las LSBs tengan una menor cantidad de barras que sus contrapartes HSBs. En el trabajo de [Shlosman and Noguchi \[1993\]](#) concluyeron que un alto contenido en gas forma cúmulos de esta componente gaseosa

que son capaces de interactuar con la componente estelar y generar un aumento considerable en la dispersión de velocidades del disco galáctico lo que provoca una disminución o supresión completa de la inestabilidad de la barra.

Por otro lado, [Villa-Vargas et al. \[2010\]](#), a través de experimentos numéricos, analizó el efecto del contenido de gas (f_g) y de la resolución espacial (ϵ_{grav}) del gas en la evolución de la barra. Para modelos pobres y ricos en gas encontró que la fuerza de la barra tiene una evolución inicial correspondiente a etapa dinámica similar en todos los modelos, independientemente de su contenido en gas: se muestra un crecimiento acelerado y un pico seguido de una caída que denota la inestabilidad de pandeo, que conduce a un debilitamiento de la barra pero no la disuelve completamente ([Martinez-Valpuesta and Shlosman \[2004\]](#)). El pico es más alto para los tres modelos pobres en gas ($f_g < 0.15$) con respecto a los modelos ricos en gas, lo que indica una mayor fuerza de la barra. El contenido de gas no afecta la evolución dinámica para modelos pobres a cualquier resolución pero en los modelos ricos la dependencia varía dependiendo de la resolución. Después del pandeo, durante la evolución secular, para los modelos pobres en gas la barra reanuda su crecimiento pero a un ritmo más gradual en comparación con el crecimiento dinámico mientras que en los modelos ricos en gas la fuerza disminuye durante el tiempo de simulación y el crecimiento se estanca. [Berentzen et al. \[1998\]](#) explica que las inestabilidades dinámicas se vuelven más leves con la presencia de gas, con órbitas estelares desestabilizadas conforme se acumula gas en el centro, provocando una barra de menor amplitud y debilitándola sustancialmente. Con respecto al tamaño de la barra, [Villa-Vargas et al. \[2010\]](#) concluye que los modelos ricos en gas presentan barras sustancialmente más pequeñas durante la fase secular en comparación con los modelos pobres en gas.

[Athanassoula et al. \[2013\]](#) también estudió el efecto del gas en la barra a través de simulaciones de N-cuerpos, concluyendo que los modelos ricos en gas presentan discos que mantienen sus simetría axisimétrica por más tiempo con respecto a los pobres en gas, y cuando la barra

comienza a crecer, lo hace de forma más lenta. Así, para discos con mayor cantidad de gas, las barras se forman más tarde y resultan más débiles al final de la simulación mientras que para los modelos pobres o sin gas la barra crece hasta hacerse más larga presentando una mayor amplitud. En este trabajo se enfatiza que no sólo la fracción de gas da estos efectos, en las simulaciones sin gas, las características de la barra como el tamaño y la fuerza están más relacionadas con el momento angular redistribuido en la galaxia.

En el presente trabajo se encontró también que la dependencia de la fracción de galaxias barradas con el espín es inversamente proporcional. En la figura 4.7 se observó que f_{bar} disminuye con el aumento de λ , comportamiento consistente con el presentado en la literatura ([Saha and Naab \[2013\]](#), [Long et al. \[2014\]](#)) donde además se concluye que para valores de espín crecientes, se apaga el crecimiento en tamaño y fuerza de la barra. En nuestra muestra, a pesar de que se observa la disminución en f_{bar} , el decremento no parece ser muy significativo, especialmente a valores medios y altos de espín. Para nuestras submuestras obtuvimos que las LSBs presentan sistemáticamente mayores valores λ en comparación a las HSBs, por lo que, teniendo en cuenta este parámetro se tendrán f_{bar} menores para las galaxias de bajo brillo superficial comparado con sus contrapartes de alto brillo. En [Long et al. \[2014\]](#) se muestra que un halo con parámetro de espín elevado tendrá una capacidad menor para absorber momento angular en comparación con un halo con espín menor. Dado que para formar barras estelares, las partículas estelares deben perder momento angular y así caer en órbitas elípticas al centro de la distribución liberándose alrededor de la barra, la limitante que pone tener un halo de alto espín naturalmente inhibe la formación de barras o, en su caso, limita su crecimiento. En las gráficas presentadas por Long et al. (figura 1.8), se observa la ganancia/pérdida de momento angular y se distingue claramente que el mayor intercambio se logra con un halo de λ pequeño. Al tener valores altos de espín también tendremos discos espacialmente más dispersos lo que hace que las inestabilidades se supriman o amortigüen provocando una disminución en la cantidad de galaxias barradas (e.g.

[Cervantes Sodi et al. \[2013\]](#)).

Finalmente, para la dependencia de f_{bar} con la fracción de masa bulbo-total, también se encontró una dependencia inversamente proporcional (Figura 4.9), con una disminución de la fracción de galaxias barradas con el aumento de B/T para la muestra total. Para la muestra segregada se obtiene que las HSBs tienen sistemáticamente bulbos más grandes en comparación a las LSBs, sin embargo, las LSBs presentan una caída prominente a masas grandes en B/T . El efecto del bulbo sobre la barra es también presentado en [Kataria and Das \[2018\]](#) quien concluye, a través de simulaciones, que hay valores límite en la fracción de masa bulbo-disco (B/D) para los cuales las barras no pueden ser formadas. Este valor es más pequeño para bulbos densos en comparación con aquellos de menor densidad. Lo anterior es consecuencia de que la transferencia de momento angular entre los componentes de la galaxia se amortigua al aumentar la dispersión de velocidades de las estrellas cuando hay un bulbo masivo por lo que protuberancias fuertes no formarán barras fácilmente en sus discos. Un bulbo prominente hace que el disco sea extremadamente estable. Un resultado en dirección opuesto es presentado por [Athanassoula and Martinet \[1980\]](#), [Pierre \[1995\]](#) y [Athanassoula \[2003\]](#) quienes muestran una correlación entre la longitud de la barra y el tamaño del bulbo, una componente del bulbo más grande absorberá una mayor cantidad de momento angular (junto con el halo) y, a medida que la barra pierda momento, se volverá más fuerte y girará más lento. De hecho, las barras son más fuertes en galaxias tipo temprano las cuales presentan bulbos más fuertes (más masivos o más densos). Con respecto a los pseudobulbos, estudios observacionales como el de [Cheung et al. \[2013\]](#) apuntan a que son más masivos en galaxias que tienen más probabilidades de albergar barras, ya que recordemos que el pseudobulbo es el resultado de la evolución de la barra cuando ésta empuja material hacia la parte central del disco.

Para demostrar que efectivamente los parámetros antes mencionados están afectando la fracción de galaxias barradas encontradas en la muestra, se procedió a generar 3 muestras de

control, denominadas MC1, MC2 y MC3. En cada una se controlaron diferentes parámetros para estudiar la dependencia de f_{bar} con los parámetros en cuestión. Se tomaron como base las galaxias de bajo brillo superficial y se buscó encontrar pares de galaxias LSB y HSB que tengan parámetros similares de manera que las distribuciones de los parámetros controlados en ambas muestras también fueran similares estadísticamente. Las condiciones usadas fueron $\Delta M_{\star} \leq 0.1$ dex, $\Delta M_{\text{gas}} \leq 0.1$ dex, $\Delta \lambda \leq 0.01$ y $\Delta B/T \leq 0.005$.

En MC1 se controló por masa estelar, masa de gas y parámetro de espín. Dado que λ solo está bien definido para las galaxias centrales, se usaron únicamente las 2,261 galaxias de nuestra muestra total que corresponden a galaxias centrales. Imponiendo las condiciones para los tres parámetros encontramos el mismo valor f_{bar} para las submuestras LSBs y HSBs de la MC1 en el rango de bajas masas ($10^{10} - 10^{10.6} M_{\odot}$), tal como se aprecia en la figura 4.12. A masas mayores, las galaxias LSB siguen presentando f_{bar} mayores a las HSB, aunque esta diferencia es menos marcada que con la muestra original. El hecho de que hayamos presentado una disminución significativa en la diferencia de las f_{bar} para las submuestras nos indica que efectivamente, estos tres parámetros están influyendo en la cantidad de barras encontradas.

Para analizar el cuarto parámetro, en MC2 se tomó la fracción en masa bulbo-total B/T como parámetro de control, obteniendo que la fracción de galaxias barradas, a casi todo el rango de masas es mayor para las HSBs que para las LSBs (figura 4.14), como se encuentra en la literatura. Sin embargo, para esta muestra de control f_{bar} no colapsa en las dos submuestras aunque sí parece tener una influencia en su valor, ya que a masas grandes $> 10^{11} M_{\odot}$ la inversión en la tendencia original se amortigua.

La mejor muestra de control obtenida fue MC3, en la que se toma como parámetros de control la masa estelar, el contenido de gas y la fracción de bulbo. Con estos parámetros, de las 652 galaxias de bajo brillo superficial, se encontraron 398 pares LSB-HSB que cumplen con las condiciones establecidas y se obtuvo (figura 4.16) que la fracción de galaxias barradas colapsa

para ambas submuestras a todo el rango de masas, es decir, la diferencia de f_{bar} para las LSBs y HSBs desaparece si controlamos estos parámetros. Concluimos entonces que para nuestra muestra, los parámetros (en conjunto) que más parecen estar influyendo en la f_{bar} son M_{\star} , M_{gas} y B/T , que en la literatura también se encuentra que influyen significativamente en la formación y crecimiento de las barras estelares.

Aunque se ha comprobado que los parámetros antes mencionados afectan nuestros resultados, no son los únicos. Hay una correlación entre el agujero negro supermasivo de las galaxias y las barras. En el trabajo de [Rosas-Guevara et al. \[2020\]](#) quienes usan la simulación TNG100, se muestra que las galaxias con barras fuertes tienen una masa del agujero negro central mayor que aquellas galaxias sin barras. Debido que las barras transfieren gas al centro de la galaxia, éste puede ser usado como material para alimentar el agujero negro central, volviéndose más masivo, lo que parece explicar el resultado encontrado en el trabajo antes citado.

El medio ambiente en el que se desarrollan las galaxias también tiene efectos importantes en el crecimiento/formación de las barras. Dado que las galaxias de bajo brillo superficial crecen en ambientes aislados, interacciones con otras galaxias no son comunes. Sin embargo, se ha visto que las interacciones de galaxias afectan directamente a la barra. Observacionalmente, trabajos como los de [Lee et al. \[2012\]](#) y [Lin et al. \[2014\]](#) han encontrado que la formación/crecimiento de la barra puede verse suprimida en aquellas galaxias que están experimentando algún tipo de interacción con un vecino cercano y que las barras fuertes se destruyen por fuertes interacciones de mareas. En simulaciones se han encontrado diferentes efectos de las interacciones. Por un lado, en el trabajo de [Zana et al. \[2018\]](#) se concluye que, independientemente de las interacciones, un disco lo suficiente masivo, formará una barra inevitablemente y que de hecho, una interacción podría retrasar el tiempo de formación de la barra. Por otro lado, [Lokas et al. \[2016\]](#) encuentran que las barras inducidas por efecto de mareas resultan ser más fuertes, más largas y su formación se da en tiempos anteriores, por lo que las interacciones favorecen el crecimiento/formación de

la barra. En el presente trabajo no se analizó el efecto de las interacciones pero en la siguiente sección sobre trabajo a futuro se expresa la intención de hacerlo debido a su importancia, al igual de cómo varía la fracción de galaxias barradas como función de la distancia al centro de grupos a los cuales pertenecen porque estaría influenciada por las interacciones.

Trabajo Futuro.

A pesar de que los resultados obtenidos en el presente trabajo nos ayudan a comprender los factores que influyen en la formación (o no) de barras estelares, en galaxias de bajo brillo superficial, aún quedan varios aspectos por analizar.

A futuro y como continuación de este trabajo, se espera estudiar la formación y crecimiento de la barra a través del tiempo, es decir, observar cómo evolucionan las galaxias barradas y sus respectivos parámetros que las describen a través de diferentes corrimientos al rojo, tomando así un enfoque evolutivo. Una de las líneas de investigación abiertas en el tema de galaxias barradas es su proceso de formación. A pesar de que existen modelos que nos plantean escenarios de formación de barras, aún no se sabe con exactitud cómo las galaxias (en este caso, de bajo brillo superficial), llegan a desarrollar estructuras de barra en su centro. Es crucial investigar qué condiciones físicas y mecanismos controlan el proceso de formación de este tipo de estructuras dinámicas, que suelen ser comunes en galaxias de tipo tardío en el universo observable.

Por todo lo anterior, se buscará estudiar y analizar el proceso de evolución de galaxias barradas a través de diferentes tiempos cósmicos y comparar si, a día de hoy, los resultados

obtenidos concuerdan con el universo observable. Para nuestro caso en particular, estudiaremos la naturaleza del brillo superficial de nuestras galaxias, con el fin de determinar si las barras detectadas en la submuestra de LSBs se formaron en galaxias que ya eran LSBs o, si la formación se llevó a cabo en una etapa en la que estos sistemas eran más propensos a la formación de barras presentando altos brillos superficiales (y por consiguiente, altas densidades de masa estelar). Con este enfoque estudiaremos, en diferentes rangos de masa estelar, la evolución de las galaxias LSB barradas y no barradas, el intercambio de momento angular entre sus componentes, su medio ambiente y sus historias de formación estelar. Como se expresó al final de la discusión y dada la importancia del medio ambiente en el que se desarrollan las galaxias, se pretende estudiar las interacciones y sus efectos en la formación de barras. También exploraremos el efecto del bulbo en la formación y evolución de la barra considerando el tipo de bulbo presente. Todo lo anterior con miras a tener un esquema bien estructurado para entender los mecanismos de formación y crecimiento de barras en galaxias LSB y el efecto de éstas en sus poblaciones estelares.

Referencias

- Aguerri (1999). A strong correlation between bar strength and global star forming activity in isolated barred galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 351:43–46. [25](#)
- Aguerri and González-García, A. C. (2009). On the origin of dwarf elliptical galaxies: the fundamental plane. *Astronomy & Astrophysics*, 494(3):891–904. [21](#)
- Aguerri, Muñoz-Tunón, C., Varela, A., and Prieto, M. (2000). Characterizing bar structures: application to ngc 1300, ngc 7479 and ngc 7723. *Astronomy and Astrophysics*, 361:841–849. [23](#), [24](#), [25](#)
- Algorry, D. G., Navarro, J. F., Abadi, M. G., Sales, L. V., Bower, R. G., Crain, R. A., Dalla Vecchia, C., Frenk, C. S., Schaller, M., Schaye, J., et al. (2017). Barred galaxies in the eagle cosmological hydrodynamical simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(1):1054–1064. [73](#)
- Athanassoula, E. (1983). Iau symp. vol. 100, internal kinematics and dynamics of galaxies. [20](#)
- Athanassoula, E. (2003). What determines the strength and the slowdown rate of bars? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341(4):1179–1198. [12](#), [18](#), [98](#)
- Athanassoula, E. (2005). On the nature of bulges in general and of box/peanut bulges in particular: input from n-body simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 358(4):1477–1488. [10](#), [12](#)

- Athanassoula, E. (2016). Galactic bulges ed e. laurikainen, r. peletier and d. gadotti. *Astrophys. Space Sci. Lib*, 418:391. [18](#)
- Athanassoula, E., Machado, R. E., and Rodionov, S. (2013). Bar formation and evolution in disc galaxies with gas and a triaxial halo: morphology, bar strength and halo properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429(3):1949–1969. [14](#), [15](#), [16](#), [96](#)
- Athanassoula, E. and Martinet, L. (1980). A correlation between the lengths of bars and the sizes of bulges. *Astronomy and Astrophysics*, 87(3):L10. [98](#)
- Athanassoula, E. and Misiriotis, A. (2002). Morphology, photometry and kinematics of n-body bars—i. three models with different halo central concentrations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 330(1):35–52. [18](#), [19](#)
- Ayromlou, M., Nelson, D., Yates, R. M., Kauffmann, G., Renneby, M., and White, S. D. (2021). Comparing galaxy formation in the l-galaxies semi-analytical model and the illustrisng simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502(1):1051–1069. [63](#)
- Baes, M., Davies, J. I., Dejonghe, H., Sabatini, S., Roberts, S., Evans, R., Linder, S. M., Smith, R. M., and De Blok, W. (2003). Radiative transfer in disc galaxies—iii. the observed kinematics of dusty disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 343(4):1081–1094. [52](#)
- Baes, M., Verstappen, J., De Looze, I., Fritz, J., Saftly, W., Pérez, E. V., Stalevski, M., and Valcke, S. (2011). Efficient three-dimensional nlte dust radiative transfer with skirt. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 196(2):22. [52](#)
- Barazza, F. D., Jogee, S., and Marinova, I. (2008). Bars in disk-dominated and bulge-dominated galaxies at $z \sim 0$: New insights from ~ 3600 sdss galaxies. *The Astrophysical Journal*, 675(2):1194. [45](#)

- Berentzen, I., Heller, C., Shlosman, I., and Fricke, K. (1998). Gas-driven evolution of stellar orbits in barred galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 300(1):49–63. [14](#), [96](#)
- Bertone, G. and Hooper, D. (2018). History of dark matter. *Reviews of Modern Physics*, 90(4):045002. [10](#)
- Binney, J. and Tremaine, S. (2011). *Galactic dynamics*, volume 13. Princeton university press. [3](#), [4](#)
- Boissier, S., Monnier Ragaigne, D., Prantzos, N., Van Driel, W., Balkowski, C., and O’Neil, K. (2003). Chemical and spectrophotometric evolution of low surface brightness galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 343(2):653–664. [28](#)
- Bruzual, G. and Charlot, S. (2003). Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344(4):1000–1028. [52](#)
- Bullock, J. S., Kolatt, T. S., Sigad, Y., Somerville, R. S., Kravtsov, A. V., Klypin, A. A., Primack, J. R., and Dekel, A. (2001). Profiles of dark haloes: evolution, scatter and environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 321(3):559–575. [63](#)
- Burkholder, V., Impey, C., and Sprayberry, D. (2001). High and low surface brightness galaxies in the local universe. v. optical and hi properties. *The Astronomical Journal*, 122(5):2318. [76](#)
- Buta, R. and Block, D. (2001). A dust-penetrated classification scheme for bars as inferred from their gravitational force fields. *The Astrophysical Journal*, 550(1):243. [25](#)
- Camps, P. and Baes, M. (2015). Skirt: An advanced dust radiative transfer code with a user-friendly architecture. *Astronomy and Computing*, 9:20–33. [52](#)

- Cavanagh, M. K., Bekki, K., Groves, B. A., and Pfeffer, J. (2022). The evolution of barred galaxies in the eagle simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 510(4):5164–5178. [94](#)
- Cervantes Sodi, B. (2017). Stellar, gas, and dark matter content of barred galaxies. *The Astrophysical Journal*, 835(1):80. [17](#), [94](#), [95](#)
- Cervantes Sodi, B., Li, C., and Park, C. (2015). Dark matter halos of barred disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 807(1):111. [45](#), [73](#)
- Cervantes Sodi, B., Li, C., Park, C., and Wang, L. (2013). On the galactic spin of barred disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 775(1):19. [20](#), [31](#), [98](#)
- Cervantes Sodi, B. and Sánchez-García, O. (2017). Do low surface brightness galaxies host stellar bars? *The Astrophysical Journal*, 847(1):37. [29](#), [30](#), [70](#), [71](#), [72](#), [94](#)
- Ceverino, D. and Klypin, A. (2007). Resonances in barred galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 379(3):1155–1168. [11](#)
- Chapelon, S., Contini, T., and Davoust, E. (1999). Starbursts in barred spiral galaxies. v. morphological analysis of bars. *arXiv preprint astro-ph/9902174*. [21](#)
- Cheung, E., Athanassoula, E., Masters, K. L., Nichol, R. C., Bosma, A., Bell, E. F., Faber, S., Koo, D. C., Lintott, C., Melvin, T., et al. (2013). Galaxy zoo: observing secular evolution through bars. *The Astrophysical Journal*, 779(2):162. [98](#)
- Collaboration, P., Prusti, T., de Bruijne, J., et al. (2016). Astronomy & astrophysics, 594. *A13*, 6. [34](#)
- Collier, A. (2020). Violent buckling benefits galactic bars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(2):2241–2249. [18](#)

- Combes, F., Debbasch, F., Friedli, D., and Pfenniger, D. (1990). Box and peanut shapes generated by stellar bars. *Astronomy and Astrophysics*, 233:82–95. [18](#)
- Combes, F. and Elmegreen, B. (1993). Bars in early type and late type galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 271:391. [20](#)
- Croton, D. J., Farrar, G. R., Norberg, P., Colless, M., Peacock, J. A., Baldry, I. K., Baugh, C. M., Bland-Hawthorn, J., Bridges, T., Cannon, R., et al. (2005). The 2df galaxy redshift survey: luminosity functions by density environment and galaxy type. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 356(3):1155–1167. [5](#), [6](#)
- Dalcanton, J. J., Spergel, D. N., and Summers, F. (1997). The formation of disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 482(2):659. [28](#)
- Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., and White, S. D. (1985). The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *The Astrophysical Journal*, 292:371–394. [36](#)
- De Blok, W., McGaugh, S., and Van der Hulst, J. (1996). H i observations of low surface brightness galaxies: probing low-density galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 283(1):18–54. [76](#)
- De Blok, W., McGaugh, S. S., and Rubin, V. C. (2001). High-resolution rotation curves of low surface brightness galaxies. ii. mass models. *The Astronomical Journal*, 122(5):2396. [27](#)
- de Jong, R. S. (1996). Near-infrared and optical broadband surface photometry of 86 face-on disk dominated galaxies. iv. using color profiles to study stellar and dust content of galaxies. *arXiv preprint astro-ph/9604010*. [8](#)

- De Naray, R. K., McGaugh, S. S., and De Blok, W. (2004). Oxygen abundances and chemical evolution in low surface brightness galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 355(3):887–898. [27](#)
- Debattista, V. P., Mayer, L., Carollo, C. M., Moore, B., Wadsley, J., and Quinn, T. (2006). The secular evolution of disk structural parameters. *The Astrophysical Journal*, 645(1):209. [18](#)
- Debattista, V. P. and Sellwood, J. (1998). Dynamical friction and the distribution of dark matter in barred galaxies. *The Astrophysical Journal*, 493(1):L5. [19](#)
- Díaz-García, S., Salo, H., Laurikainen, E., and Herrera-Endoqui, M. (2016). Characterization of galactic bars from 3.6 μm s4g imaging. *Astronomy & Astrophysics*, 587:A160. [13](#), [73](#)
- Dolag, K., Borgani, S., Murante, G., and Springel, V. (2009). Substructures in hydrodynamical cluster simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(2):497–514. [36](#)
- Du, M., Ho, L. C., Zhao, D., Shi, J., Debattista, V. P., Hernquist, L., and Nelson, D. (2019). Identifying kinematic structures in simulated galaxies using unsupervised machine learning. *The Astrophysical Journal*, 884(2):129. [viii](#), [81](#), [82](#), [83](#)
- Dubinski, J., Berentzen, I., and Shlosman, I. (2009). Anatomy of the bar instability in cuspy dark matter halos. *The Astrophysical Journal*, 697(1):293. [19](#)
- Durbala, A., Buta, R., Sulentic, J., and Verdes-Montenegro, L. (2009). Fourier photometric analysis of isolated galaxies in the context of the amiga project. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 397(4):1756–1775. [24](#)
- Efstathiou, G., Lake, G., and Negroponte, J. (1982). The stability and masses of disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 199(4):1069–1088. [19](#)

- Ellison, S. L., Mendel, J. T., Patton, D. R., and Scudder, J. M. (2013). Galaxy pairs in the sloan digital sky survey–viii. the observational properties of post-merger galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(4):3627–3638. [84](#)
- Elmegreen, B. G. and Elmegreen, D. M. (1985). Properties of barred spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 288:438–455. [21](#)
- Englmaier, P. and Gerhard, O. (1997). Two modes of gas flow in a single barred galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 287(1):57–68. [12](#)
- Erwin, P. (2019). What determines the sizes of bars in spiral galaxies? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489(3):3553–3564. [38](#), [39](#), [73](#)
- Eskridge, P. B., Frogel, J. A., Pogge, R. W., Quillen, A. C., Davies, R. L., DePoy, D., Houdashelt, M. L., Kuchinski, L. E., Ramírez, S. V., Sellgren, K., et al. (2000). The frequency of barred spiral galaxies in the near-infrared. *The Astronomical Journal*, 119(2):536. [29](#), [73](#), [94](#)
- Fall, S. M. and Efstathiou, G. (1980). Formation and rotation of disc galaxies with haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 193(2):189–206. [28](#)
- Fall, S. M. and Romanowsky, A. J. (2013). Angular momentum and galaxy formation revisited: effects of variable mass-to-light ratios. *The Astrophysical Journal Letters*, 769(2):L26. [57](#), [66](#)
- Finkelstein, K. (2014). Coma cluster of galaxies. *AstroEdu*, (2):1410–1410. [4](#)
- Galaz, G., Villalobos, A., Infante, L., and Donzelli, C. (2006). Bulge evolution in face-on spiral and low surface brightness galaxies. *The Astronomical Journal*, 131(4):2035. [67](#)
- Genel, S., Fall, S. M., Hernquist, L., Vogelsberger, M., Snyder, G. F., Rodriguez-Gomez, V., Sijacki, D., and Springel, V. (2015). Galactic angular momentum in the illustris simulation:

- Feedback and the hubble sequence. *The Astrophysical Journal Letters*, 804(2):L40. [viii](#), [42](#), [54](#), [56](#), [57](#), [65](#), [67](#), [79](#), [80](#), [86](#)
- Genel, S., Vogelsberger, M., Springel, V., Sijacki, D., Nelson, D., Snyder, G., Rodriguez-Gomez, V., Torrey, P., and Hernquist, L. (2014). Introducing the illustris project: the evolution of galaxy populations across cosmic time. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445(1):175–200. [32](#)
- Hawarden, T., Mountain, C., Leggett, S., and Puxley, P. (1986). Enhanced star formation—the importance of bars in spiral galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 221(1):41P–45P. [20](#)
- Henriques, B. M., White, S. D., Thomas, P. A., Angulo, R., Guo, Q., Lemson, G., Springel, V., and Overzier, R. (2015). Galaxy formation in the planck cosmology—i. matching the observed evolution of star formation rates, colours and stellar masses. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451(3):2663–2680. [63](#)
- Hinz, J., Rieke, M., Rieke, G., Willmer, C., Misselt, K., Engelbracht, C., Blaylock, M., and Pickering, T. (2007). Spitzer observations of low-luminosity isolated and low surface brightness galaxies. *The Astrophysical Journal*, 663(2):895. [27](#)
- Holley-Bockelmann, K., Weinberg, M., and Katz, N. (2005). Bar-induced evolution of dark matter cusps. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 363(3):991–1007. [12](#)
- Honey, M., Das, M., Ninan, J., and Manoj, P. (2016). Near-infrared imaging of barred halo-dominated low surface brightness galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(2):2099–2121. [29](#)
- Honey, M., van Driel, W., Das, M., and Martin, J. (2018). A study of the h i and optical

- properties of low surface brightness galaxies: spirals, dwarfs, and irregulars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476(4):4488–4500. [27](#)
- Impey, C. and Bothun, G. (1997). Low surface brightness galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 35(1):267–307. [26](#)
- Izquierdo-Villalba, D., Bonoli, S., Rosas-Guevara, Y., Springel, V., White, S. D., Zana, T., Dotti, M., Spinoso, D., Bonetti, M., and Lupi, A. (2022). Disc instability and bar formation: view from the illustrating simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 514(1):1006–1020. [19](#)
- Jimenez, R., Padoan, P., Matteucci, F., and Heavens, A. F. (1998). Galaxy formation and evolution: low-surface-brightness galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 299(1):123–138. [28](#)
- Jogee, S., Scoville, N., and Kenney, J. D. (2005). The central region of barred galaxies: Molecular environment, starbursts, and secular evolution. *The Astrophysical Journal*, 630(2):837. [21](#)
- Kalnajs, A. (1973). Spiral structure viewed as a density wave. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2(4):174–177. [12](#)
- Kataria, S. K. and Das, M. (2018). A study of the effect of bulges on bar formation in disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(2):1653–1664. [60](#), [79](#), [80](#), [81](#), [98](#)
- Khoperskov, S., Haywood, M., Di Matteo, P., Lehnert, M., and Combes, F. (2018). Bar quenching in gas-rich galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 609:A60. [12](#)
- Kim, J.-h. and Lee, J. (2013). How does the surface density and size of disc galaxies measured

- in hydrodynamic simulations correlate with the halo spin parameter? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 432(2):1701–1708. [28](#)
- Kormendy, J., Falcón-Barroso, J., and Knapen, J. (2013). Secular evolution in disk galaxies. *Secular Evolution of Galaxies*, page 1. [10](#), [12](#)
- Kulier, A., Galaz, G., Padilla, N. D., and Trayford, J. W. (2020). Massive low-surface-brightness galaxies in the eagle simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496(3):3996–4016. [52](#)
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., and Knapen, J. (2009). Bars, ovals, and lenses in early-type disk galaxies: probes of galaxy evolution. *The Astrophysical Journal*, 692(1):L34. [21](#)
- Lee, G.-H., Park, C., Lee, M. G., and Choi, Y.-Y. (2012). Dependence of barred galaxy fraction on galaxy properties and environment. *The Astrophysical Journal*, 745(2):125. [70](#), [73](#), [100](#)
- Lin, C. and Shu, F. H. (1987). On the spiral structure of disk galaxies. In *Selected Papers of CC Lin with Commentary: Vol. 1: Fluid Mechanics Vol. 2: Astrophysics*, pages 561–570. World Scientific. [9](#)
- Lin, L., Li, C., He, Y., Xiao, T., and Wang, E. (2017). Bar-induced central star formation as revealed by integral field spectroscopy from califa. *The Astrophysical Journal*, 838(2):105. [21](#)
- Lin, Y., Sodi, B. C., Li, C., Wang, L., and Wang, E. (2014). The environment of barred galaxies in the low-redshift universe. *The Astrophysical Journal*, 796(2):98. [100](#)
- Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Land, K., Bamford, S., Thomas, D., Raddick, M. J., Nichol, R. C., Szalay, A., Andreescu, D., et al. (2008). Galaxy zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 389(3):1179–1189. [70](#)

- Łokas, E. L. (2019). Buckling instability in tidally induced galactic bars. *Astronomy & Astrophysics*, 624:A37. [18](#)
- Łokas, E. L., Ebrova, I., Del Pino, A., Sybilska, A., Athanassoula, E., Semczuk, M., Gajda, G., and Fouquet, S. (2016). Tidally induced bars of galaxies in clusters. *The Astrophysical Journal*, 826(2):227. [100](#)
- Long, S., Shlosman, I., and Heller, C. (2014). Secular damping of stellar bars in spinning dark matter halos. *The Astrophysical Journal Letters*, 783(1):L18. [13](#), [14](#), [15](#), [60](#), [77](#), [97](#)
- Marinacci, F., Vogelsberger, M., Pakmor, R., Torrey, P., Springel, V., Hernquist, L., Nelson, D., Weinberger, R., Pillepich, A., Naiman, J., et al. (2018). First results from the illustriatng simulations: radio haloes and magnetic fields. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480(4):5113–5139. [32](#)
- Martin, G., Kaviraj, S., Laigle, C., Devriendt, J., Jackson, R., Peirani, S., Dubois, Y., Pichon, C., and Slyz, A. (2019). The formation and evolution of low-surface-brightness galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485(1):796–818. [27](#)
- Martinet, L. and Friedli, D. (1997). Bar strength and star formation activity in late-type barred galaxies. *arXiv preprint astro-ph/9701091*. [21](#)
- Martinez-Valpuesta, I. and Shlosman, I. (2004). Why buckling stellar bars weaken in disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 613(1):L29. [96](#)
- Martinez-Valpuesta, I., Shlosman, I., and Heller, C. (2006). Evolution of stellar bars in live axisymmetric halos: recurrent buckling and secular growth. *The Astrophysical Journal*, 637(1):214. [48](#)

- Masters, K. L., Nichol, R. C., Haynes, M. P., Keel, W. C., Lintott, C., Simmons, B., Skibba, R., Bamford, S., Giovanelli, R., and Schawinski, K. (2012). Galaxy zoo and alfalfa: atomic gas and the regulation of star formation in barred disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(3):2180–2192. [17](#), [60](#), [75](#), [95](#)
- Masters, K. L., Nichol, R. C., Hoyle, B., Lintott, C., Bamford, S. P., Edmondson, E. M., Fortson, L., Keel, W. C., Schawinski, K., Smith, A. M., et al. (2011). Galaxy zoo: bars in disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411(3):2026–2034. [10](#), [17](#), [74](#), [93](#), [94](#)
- Mayer, L. and Wadsley, J. (2004). The formation and evolution of bars in low surface brightness galaxies with cold dark matter haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 347(1):277–294. [30](#)
- McGaugh, S. and Bothun, G. (1993). Structural characteristics and stellar composition of low surface brightness disk galaxies. *arXiv preprint astro-ph/9311003*. [28](#)
- McGaugh, S., Schombert, J., and Bothun, G. (1995). The morphology of low surface brightness disk galaxies. *arXiv preprint astro-ph/9501085*. [26](#)
- McGaugh, S. S. and De Blok, W. (1997). Gas mass fractions and the evolution of spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 481(2):689. [8](#), [60](#)
- Menéndez-Delmestre, K., Sheth, K., Schinnerer, E., Jarrett, T. H., and Scoville, N. Z. (2007). A near-infrared study of 2mass bars in local galaxies: an anchor for high-redshift studies. *The Astrophysical Journal*, 657(2):790. [21](#), [29](#)
- Mihos, J. C., McGaugh, S. S., and De Blok, W. (1997). Dynamical stability and environmental influences in low surface brightness disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 477(2):L79. [28](#), [29](#), [30](#)

- Mo, H., Mao, S., and White, S. D. (1998). The formation of galactic discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 295(2):319–336. [19](#), [28](#)
- Mo, H., Van den Bosch, F., and White, S. (2010). *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press. [3](#), [4](#), [6](#), [8](#), [9](#)
- Naiman, J. P., Pillepich, A., Springel, V., Ramirez-Ruiz, E., Torrey, P., Vogelsberger, M., Pakmor, R., Nelson, D., Marinacci, F., Hernquist, L., et al. (2018). First results from the illustriatng simulations: A tale of two elements—chemical evolution of magnesium and europium. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477(1):1206–1224. [32](#)
- Nair, P. B. and Abraham, R. G. (2010a). A catalog of detailed visual morphological classifications for 14,034 galaxies in the sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 186(2):427. [12](#)
- Nair, P. B. and Abraham, R. G. (2010b). On the fraction of barred spiral galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, 714(2):L260. [12](#), [45](#)
- Nelson, D., Pillepich, A., Genel, S., Vogelsberger, M., Springel, V., Torrey, P., Rodriguez-Gomez, V., Sijacki, D., Snyder, G. F., Griffen, B., et al. (2015). The illustris simulation: Public data release. *Astronomy and Computing*, 13:12–37. [33](#)
- Nelson, D., Pillepich, A., Springel, V., Weinberger, R., Hernquist, L., Pakmor, R., Genel, S., Torrey, P., Vogelsberger, M., Kauffmann, G., et al. (2018). First results from the illustriatng simulations: the galaxy colour bimodality. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(1):624–647. [32](#), [44](#), [59](#)
- Nelson, D., Springel, V., Pillepich, A., Rodriguez-Gomez, V., Torrey, P., Genel, S., Vogelsberger, M., Pakmor, R., Marinacci, F., Weinberger, R., et al. (2019). The illustriatng simulations: public data release. *Computational Astrophysics and Cosmology*, 6(1):1–29. [40](#)

- Ohta, K., Hamabe, M., and Wakamatsu, K.-I. (1990). Surface photometry of barred spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 357:71–90. [23](#), [24](#)
- O’Neil, K., Bothun, G., Van Driel, W., and Ragaigine, D. M. (2004). A new hi catalog of low surface brightness galaxies out to $z=0.1$ -tripling the number of massive lsb galaxies known. *Astronomy & Astrophysics*, 428(3):823–835. [62](#)
- Pahwa, I. and Saha, K. (2018). Structural properties of faint low-surface-brightness galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478(4):4657–4668. [74](#), [81](#), [94](#)
- Pérez-Montaño, L. E., Rodriguez-Gomez, V., Cervantes Sodi, B., Zhu, Q., Pillepich, A., Vogelsberger, M., and Hernquist, L. (2022). The formation of low surface brightness galaxies in the illustriatng simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 514(4):5840–5852. [6](#), [26](#), [28](#), [29](#), [51](#), [53](#), [54](#), [55](#), [63](#), [64](#), [65](#), [66](#), [67](#), [69](#)
- Peters, W. and Kuzio de Naray, R. (2018). Characterizing bars in low surface brightness disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476(3):2938–2961. [22](#), [25](#), [30](#)
- Peters, W. and Kuzio de Naray, R. (2019). Bar properties and photometry of barred low surface brightness disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484(1):850–868. [26](#)
- Pierre, M. (1995). Quantitative morphology of bars in spiral galaxies. *The Astronomical Journal*, 109:2428. [12](#), [25](#), [98](#)
- Pillepich, A., Nelson, D., Hernquist, L., Springel, V., Pakmor, R., Torrey, P., Weinberger, R., Genel, S., Naiman, J. P., Marinacci, F., et al. (2018a). First results from the illustriatng simulations: the stellar mass content of groups and clusters of galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(1):648–675. [32](#), [33](#), [35](#), [37](#)

- Pillepich, A., Springel, V., Nelson, D., Genel, S., Naiman, J., Pakmor, R., Hernquist, L., Torrey, P., Vogelsberger, M., Weinberger, R., et al. (2018b). Simulating galaxy formation with the illustriTNG model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(3):4077–4106. [33](#), [35](#)
- Romanowsky, A. J. and Fall, S. M. (2012). Angular momentum and galaxy formation revisited. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 203(2):17. [56](#)
- Rosas-Guevara, Y., Bonoli, S., Dotti, M., Izquierdo-Villalba, D., Lupi, A., Zana, T., Bonetti, M., Nelson, D., Springel, V., Hernquist, L., et al. (2022). The evolution of the barred galaxy population in the tng50 simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 512(4):5339–5357. [75](#), [94](#), [95](#)
- Rosas-Guevara, Y., Bonoli, S., Dotti, M., Zana, T., Nelson, D., Pillepich, A., Ho, L. C., Izquierdo-Villalba, D., Hernquist, L., and Pakmor, R. (2020). The buildup of strongly barred galaxies in the tng100 simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(2):2547–2564. [vii](#), [13](#), [38](#), [42](#), [43](#), [44](#), [45](#), [46](#), [47](#), [49](#), [50](#), [51](#), [73](#), [94](#), [100](#)
- Roshan, M., Ghafourian, N., Kashfi, T., Banik, I., Haslbauer, M., Cuomo, V., Famaey, B., and Kroupa, P. (2021). Fast galaxy bars continue to challenge standard cosmology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 508(1):926–939. [13](#), [45](#)
- Saha, K. and Naab, T. (2013). Spinning dark matter haloes promote bar formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434(2):1287–1299. [19](#), [97](#)
- Schombert, J., Maciel, T., and McGaugh, S. (2011). Stellar populations and the star formation histories of lsb galaxies—part i: Optical and $h\alpha$ imaging. *Advances in Astronomy*, 2011. [27](#)
- Schombert, J. M., Bothun, G. D., Schneider, S. E., and McGaugh, S. S. (1992). A catalog of low surface brightness galaxies: List ii. [60](#)

- Schwarz, M. (1981). The response of gas in a galactic disk to bar forcing. *The Astrophysical Journal*, 247:77–88. [10](#)
- Sellwood, J. (1980). Galaxy models with live halos. *Astronomy and Astrophysics*, 89:296–307. [12](#)
- Sellwood, J. A. and Wilkinson, A. (1993). Dynamics of barred galaxies. *Reports on Progress in Physics*, 56(2):173. [10](#)
- Sheth, K., Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., Capak, P., Abraham, R. G., Athanassoula, E., Ellis, R. S., Mobasher, B., Salvato, M., Schinnerer, E., et al. (2008). Evolution of the bar fraction in cosmos: quantifying the assembly of the hubble sequence. *The Astrophysical Journal*, 675(2):1141. [9](#)
- Sheth, K., Melbourne, J., Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., Athanassoula, E., Abraham, R. G., and Weiner, B. J. (2012). Hot disks and delayed bar formation. *The Astrophysical Journal*, 758(2):136. [12](#)
- Shlosman, I. and Noguchi, M. (1993). Effects of gas on the global stability of galactic disks-radial flows. *The Astrophysical Journal*, 414:474–486. [14](#), [95](#)
- Sijacki, D., Vogelsberger, M., Genel, S., Springel, V., Torrey, P., Snyder, G. F., Nelson, D., and Hernquist, L. (2015). The illustris simulation: the evolving population of black holes across cosmic time. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(1):575–596. [32](#)
- Smirnov, A. A. and Sotnikova, N. Y. (2019). Is the late buckling stage inevitable in the bar life? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485(2):1900–1905. [18](#)
- Snyder, G. F., Torrey, P., Lotz, J. M., Genel, S., McBride, C. K., Vogelsberger, M., Pillepich, A., Nelson, D., Sales, L. V., Sijacki, D., et al. (2015). Galaxy morphology and star formation

- in the illustris simulation at $z=0$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454(2):1886–1908. [56](#), [79](#)
- Spinoso, D., Bonoli, S., Dotti, M., Mayer, L., Madau, P., and Bellovary, J. (2016). Bar-driven evolution and quenching of spiral galaxies in cosmological simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465(3):3729–3740. [22](#)
- Springel, V. (2010). E pur si muove: Galilean-invariant cosmological hydrodynamical simulations on a moving mesh. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 401(2):791–851. [32](#)
- Springel, V., Pakmor, R., Pillepich, A., Weinberger, R., Nelson, D., Hernquist, L., Vogelsberger, M., Genel, S., Torrey, P., Marinacci, F., et al. (2018). First results from the illustris simulation: matter and galaxy clustering. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(1):676–698. [32](#)
- Springel, V., White, S. D., Tormen, G., and Kauffmann, G. (2001). Populating a cluster of galaxies—i. results at $z=0$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3):726–750. [36](#), [37](#)
- Vaucouleurs, G. d. (1959). Classification and morphology of external galaxies. In *Astrophysik iv: Sternsysteme/astrophysics iv: Stellar systems*, pages 275–310. Springer. [25](#)
- Vera, M., Alonso, S., and Coldwell, G. (2016). Effect of bars on the galaxy properties. *Astronomy & Astrophysics*, 595:A63. [10](#), [21](#), [22](#), [93](#)
- Véron-Cetty, M.-P. and Véron, P. (2010). A catalogue of quasars and active nuclei. *Astronomy & Astrophysics*, 518:A10. [7](#)
- Villa-Vargas, J., Shlosman, I., and Heller, C. (2010). Dark matter halos and evolution of bars

- in disk galaxies: varying gas fraction and gas spatial resolution. *The Astrophysical Journal*, 719(2):1470. [14](#), [18](#), [96](#)
- Vogelsberger, M., Genel, S., Springel, V., Torrey, P., Sijacki, D., Xu, D., Snyder, G., Nelson, D., and Hernquist, L. (2014). Introducing the illustris project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444(2):1518–1547. [32](#), [57](#)
- Weinberger, R., Springel, V., Hernquist, L., Pillepich, A., Marinacci, F., Pakmor, R., Nelson, D., Genel, S., Vogelsberger, M., Naiman, J., et al. (2016). Simulating galaxy formation with black hole driven thermal and kinetic feedback. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465(3):3291–3308. [33](#), [35](#)
- Wozniak, H., Friedli, D., Martinet, L., Martin, P., and Bratschi, P. (1995). Disc galaxies with multiple triaxial structures. i. bvri and halpha surface photometry. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 111:115. [23](#)
- Young, J. and Scoville, N. (1991). Molecular gas in galaxies. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 29:581–625. [8](#)
- Zana, T., Dotti, M., Capelo, P. R., Bonoli, S., Haardt, F., Mayer, L., and Spinoso, D. (2018). External versus internal triggers of bar formation in cosmological zoom-in simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(2):2608–2621. [100](#)
- Zavala, J., Frenk, C. S., Bower, R., Schaye, J., Theuns, T., Crain, R. A., Trayford, J. W., Schaller, M., and Furlong, M. (2016). The link between the assembly of the inner dark matter halo and the angular momentum evolution of galaxies in the eagle simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460(4):4466–4482. [66](#)

- Zhao, D., Du, M., Ho, L. C., Debattista, V. P., and Shi, J. (2020). Barred galaxies in the illustriTNG simulation. *The Astrophysical Journal*, 904(2):170. [vii](#), [13](#), [38](#), [42](#), [47](#), [49](#), [50](#), [51](#), [59](#), [73](#), [94](#)
- Zhou, Z., Ma, J., and Wu, H. (2021). On the correlation between atomic gas and bars in galaxies. *The Astronomical Journal*, 161(6):260. [75](#)
- Zhou, Z.-B., Zhu, W., Wang, Y., and Feng, L.-L. (2020). Barred galaxies in the illustriS-1 and tng100 simulations: A comparison study. *The Astrophysical Journal*, 895(2):92. [49](#)
- Zhu, Q., Xu, D., Gaspari, M., Rodriguez-Gomez, V., Nelson, D., Vogelsberger, M., Torrey, P., Pillepich, A., Zjupa, J., Weinberger, R., et al. (2018). Formation of a malin 1 analogue in illustriTNG by stimulated accretion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 480(1):L18–L22. [36](#)