

4. MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR

Como se ha planteado a lo largo de este trabajo, los objetivos fueron determinar la evolución de los elementos químicos y la predicción de regiones químicamente aptas para la formación de planetas que alberguen vida en la galaxia de Andrómeda. Lo anterior es lo que se considera la ZHG. Además, otro fenómeno que se consideró en la actual investigación, fue la Migración Radial Estelar (MRE) que es el movimiento de las estrellas en la galaxia debido a una *barra galáctica*. Recordando de la *sección 1.5*, las *barras* son un fenómeno común y se encuentran en todos los tipos de galaxias espirales como M31 (Beaton R. L., et al., 2007) y VL (Gerhard, Binney, & Zhao, 1998).

Las *barras* galácticas son estructuras formadas por estrellas que siguen un patrón de órbitas elongadas u ovaladas (Mihalas & McRae, 1968) que se concentra en regiones centrales, pudiendo contener así un *bulbo* esferoidal en el centro. No es claro aún, si el *bulbo* y la *barra* son componentes distintas, conjuntas o una sola. En el caso de M31, no se observa una diferencia entre el *bulbo* y la *barra* ya que el radio promedio en el que se localiza el primero es alrededor de 3 kpc y para la segunda es de hasta 5 kpc (Beaton R. L., et al., 2007). Debido a que las *barras* se localizan tanto en regiones del *bulbo* como del *disco*, estas constituyen un componente importante en la distribución de masa en una galaxia (Sellwood & Wilkinson, 1993), principalmente sobre el material estelar.

Para poder desarrollar este objetivo del trabajo, se utilizaron resultados de modelos que predicen el comportamiento de las partículas que conforman a una galaxia espiral con barra similar a M31. A continuación se describen las características y procedimientos que se siguieron.

4.1 SIMULACIONES Y MIGRACIÓN

Los resultados de los códigos de programación que predicen el comportamiento dinámico de las partículas que constituyen a una galaxia se le denominan simulaciones cosmológicas de n-cuerpos. En estos códigos se analizan las interacciones gravitacionales, hidrodinámicas y termodinámicas entre las partículas, o mejor dicho cúmulos de partículas, ya sean gas, estrellas o de materia oscura. El número de cúmulos que conforman a estas simulaciones puede ir desde unos cientos hasta millones (Sellwood & Wilkinson, 1993).

En este trabajo, se utilizaron las simulaciones hechas por Klypin *et al.* (2008), las cuales reproducen el comportamiento de una galaxia espiral barrada en un periodo de 5 Ga, es decir a partir de los 8 Ga de su formación hasta la actualidad, i. e. 13 Ga. La galaxia ya formada, se construyó al inicio por la acreción de flujos externos de material que se detuvo para mantener a la galaxia como un sistema cerrado. Por lo tanto, desde los 5 Ga hasta el presente, no recibió material externo y tampoco formó más estrellas manteniendo así, las que había formado desde el inicio.

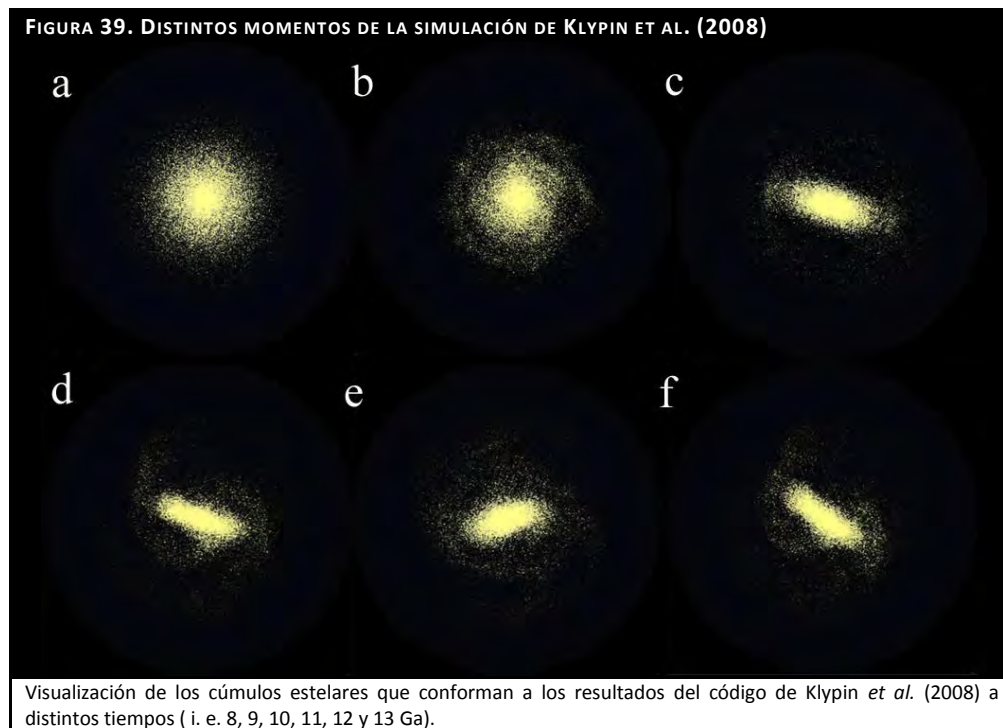
Las partículas que conforman a las simulaciones son poco más de 10^6 cúmulos, de los cuales 10^3 son cúmulos de estrellas de $10^5 M_{\odot}$ cada uno. Las estrellas que forman parte de esos

cúmulos, tiene $1 M_{\odot}$. Esto es consistente con el escenario de ARI propuesto por el modelo de EQ ya que dentro de esta aproximación, las estrellas que tienen una masa menor a $1 M_{\odot}$ viven por siempre, mientras las que tienen masa mayor a $1 M_{\odot}$ mueren instantáneamente.

Las componentes galácticas en esta simulación, fueron creadas por los mismos flujos iniciales de material en contraste a lo propuesto en el modelo de EQ que las forma de manera independiente por medio de un colapso monolítico bajo el escenario *dentro-fuera*. Al inicio de la simulación, es decir a los 5 Ga de la formación de la galaxia, se tienen solamente las componentes galácticas constituidas de materia bariónica²⁹. Mientras el *bulbo* y el *disco* acretan estrellas provenientes del *halo*, se van tornando más masivos, llegando al punto en donde se vuelven inestables gravitacionalmente afectando las órbitas estelares y dando paso a la formación de la *barra*.

Desde el momento en que la *barra* se forma, esta permanece en toda la simulación. Cabe destacar que la *barra* no es una condición que se imponga en la simulación, sino que se va dando como un fenómeno gravitacional natural debido a la inestabilidad de las regiones centrales de la galaxia.

En la *Figura 39*, se muestra la visualización de los cúmulos estelares que conforman a los resultados del código de Klypin, Valenzuela, Colín, & Quinn (2008) a distintos tiempos (i. e. 8, 9, 10, 11, 12 y 13 Ga). Como se puede apreciar en el primer tiempo de la simulación, es decir a 8 Ga (*Figura 42a*), el *disco* tiene simetría azimutal tal como se planteó en el modelo de EQ; sin embargo, conforme pasa el tiempo, la simetría desaparece.



²⁹ En las simulaciones también se toma en cuenta un *halo* de materia oscura, sin embargo esta no interviene directamente en la química de la galaxia.

4.2 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

Del modelo de EQ realizado en este trabajo, se escogieron los datos de abundancia química de Z/Z_{\odot} al tiempo de 8 Ga debido a que a partir de ese momento, la historia química de M31 no cambia demasiado y se encuentra en el intervalo de los gradientes que se utilizaron como restricciones observacionales (ver *Figuras 17 y 27*).

Para unir el modelo de EQ con la simulación cosmológica, se procedió con lo siguiente:

- I. Asignar a las cúmulos de estrellas del primer momento de la simulación ($t = 8$ Ga), una metalicidad (Z/Z_{\odot}) de acuerdo a su radio, ya que a cada radio del modelo de EQ tiene una abundancia química del gas del MIE.
- II. Dividir a la galaxia a ese tiempo (8 Ga) en anillos de 0.1 kpc de grosor.
- III. Calcular la metalicidad promedio de cada anillo con la expresión

$$\left\langle \frac{Z}{Z_{\odot}} \right\rangle = \frac{\sum_{i=1}^n Z/Z_{\odot}}{n} \quad (74)$$

Donde n es el número total de cúmulos que se encuentran en el anillo i .

- IV. Obtener el comportamiento radial del $\log Z/Z_{\odot}$ para ese radio y graficar (ver línea a 8 Ga de la gráfica superior *Figura 40 y Figura 41a*).
- V. Observar hacia donde se movieron las estrellas con abundancias químicas ya asignadas a distintos tiempos, tomando en cuenta que cada cúmulo estelar mantiene la misma abundancia química durante toda la simulación cosmológica (ver *Figura 41*).
- VI. Obtener el comportamiento radial del $\log (Z/Z_{\odot})$ para cada tiempo y graficar (ver gráfica superior de la *Figura 40*).
- VII. Ajustar rectas en tres regiones: *bulbo*, *disco* y periferia, para observar el cambio del gradiente en cada momento de la evolución cosmológica y graficar (ver gráfica inferior de la *Figura 40*).

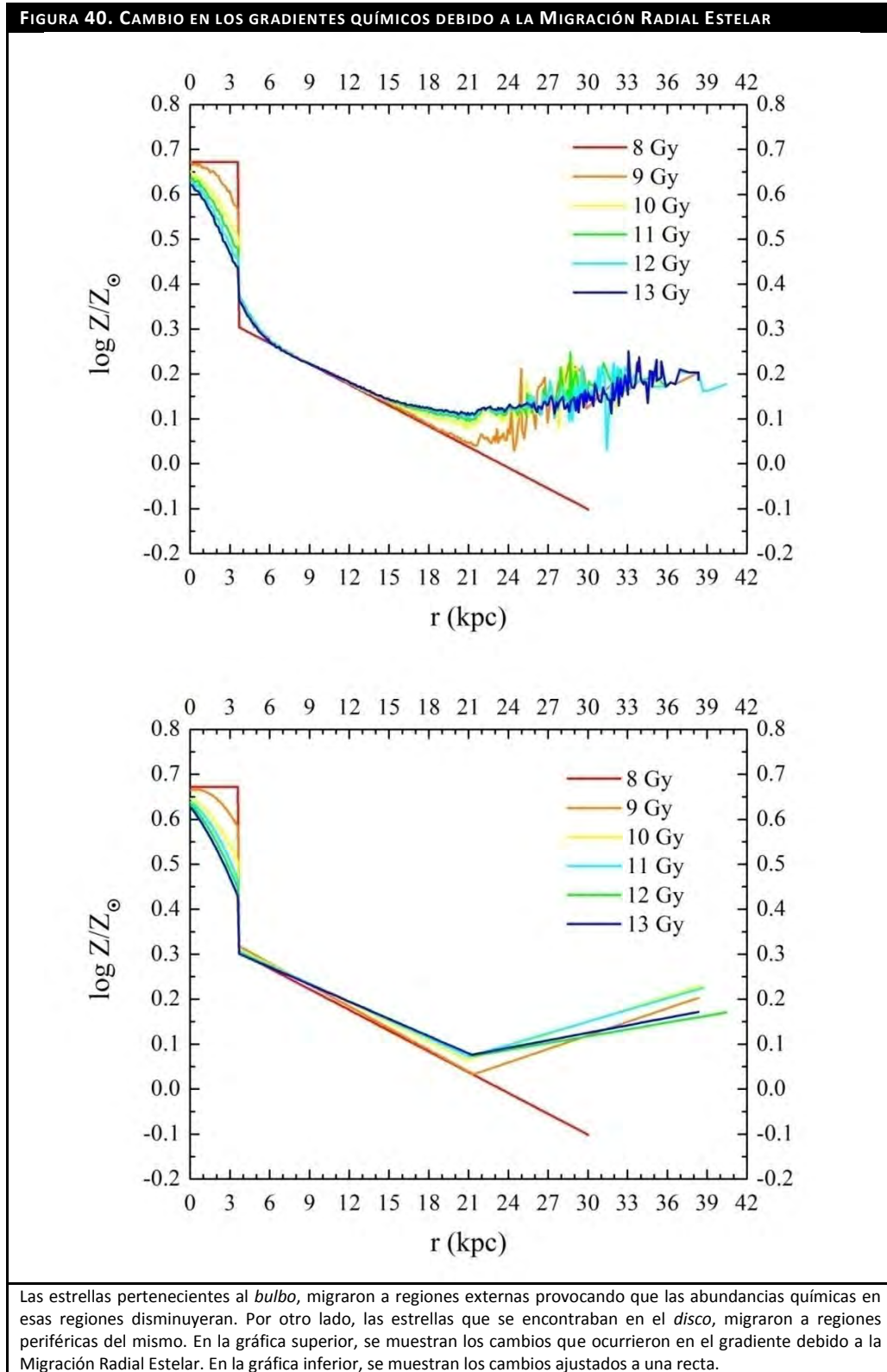
En las gráficas de la *Figura 40*, se muestran los cambios que se observaron en el gradiente.

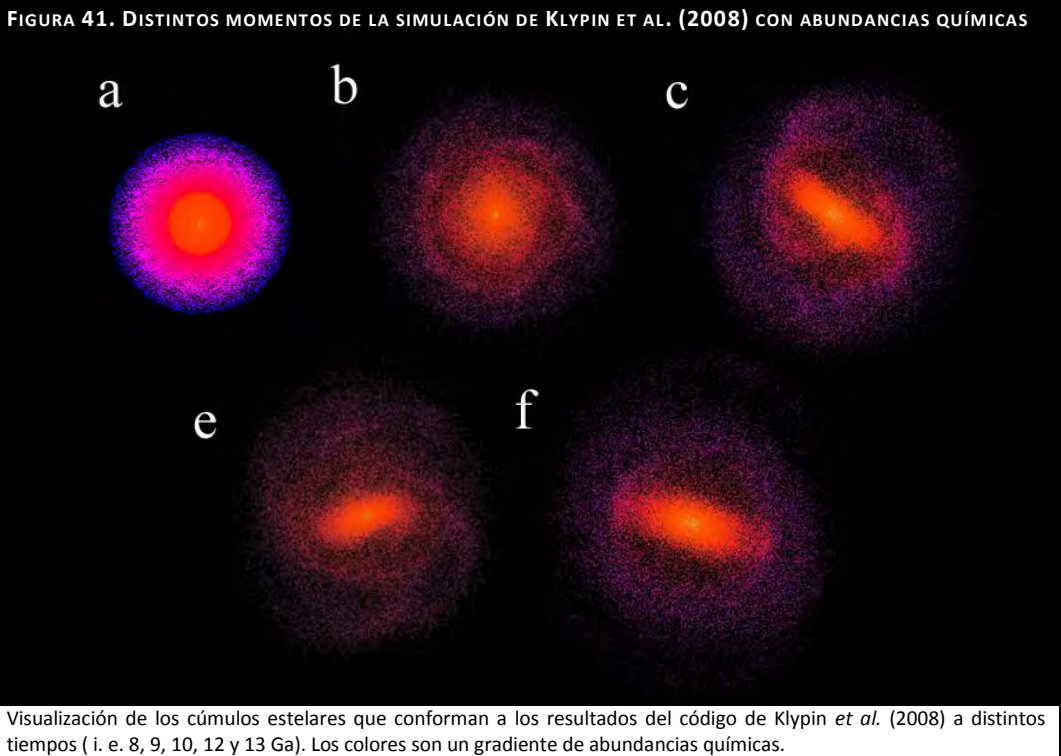
Lo que ocurrió debido a la MRE, fue que las estrellas pertenecientes al *bulbo*, migraron a regiones externas provocando que las abundancias químicas en esas regiones disminuyeran. Por otra parte, las estrellas que se encontraban en el *disco*, migraron a regiones periféricas del mismo.

En las imágenes de la *Figura 41*, se puede observar, por medio de la combinación de los colores, que cúmulos de estrellas pertenecientes al *bulbo*, migraron hacia regiones externas provocando que las abundancias químicas en esas regiones disminuyeran.

Por otro lado, los cúmulos de estrellas que se encontraban en el *disco*, migraron a regiones periféricas del mismo. A su vez, también se puede observar, por el mezclado de colores, que adicionalmente hubo movimiento de estrellas de las partes externas a las internas.

Al haber asignado abundancias químicas a la simulación cosmológica y al determinar cómo se modificó el gradiente, se procedió a aplicar las condiciones de la metalicidad de la ZHG a la galaxia que ha tenido MRE.





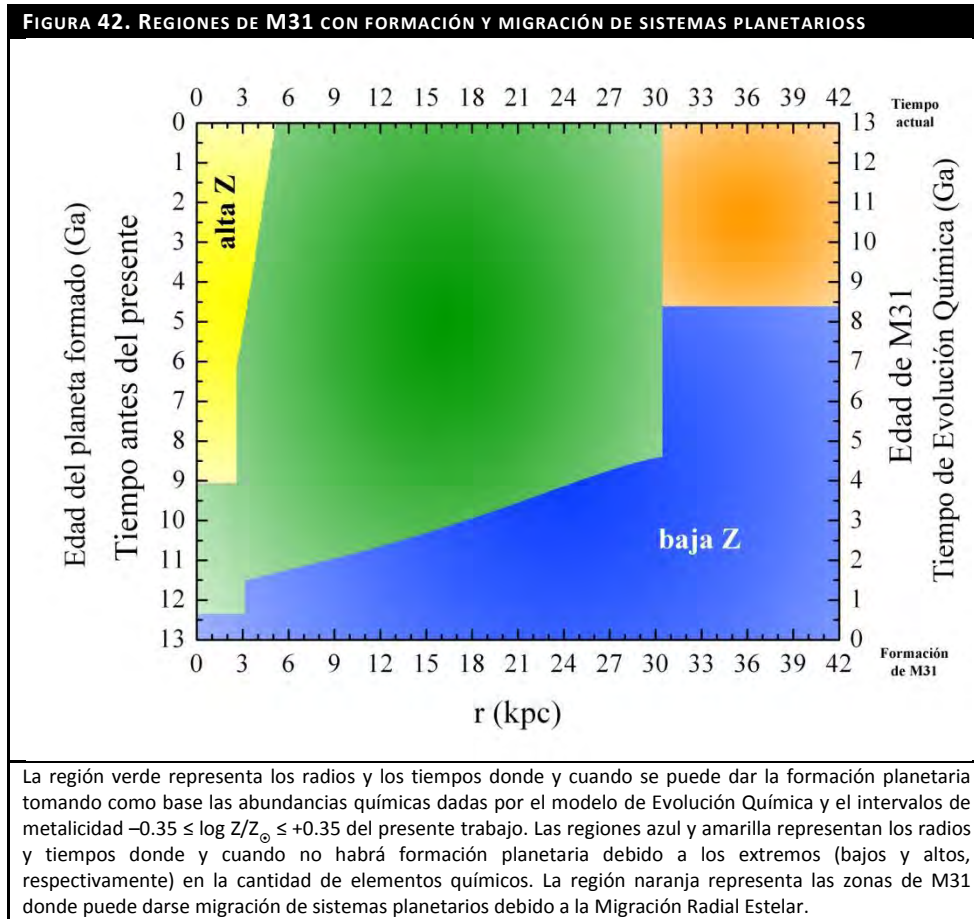
4.3 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y MIGRACIÓN DE SISTEMAS PLANETARIOS

Al obtener el cambio en el gradiente en cada momento de la simulación, se aplicaron las condiciones de metalicidad propuestas en este trabajo ($-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq 0.35$, ver *sección 3.1.1.1*) para obtener las regiones en las que se puede dar la migración de sistemas planetarios, debido a que anteriormente ya se han obtenido las regiones donde se puede dar la formación planetaria. Además, en la simulación sólo se tienen cúmulos de estrellas con abundancias químicas y no gas del cual se podrían formar sistemas planetarios. Por lo tanto, debido a la MRE, las estrellas que migraron pudieron haber llevado consigo el sistema planetario que ya se hubiese formado alrededor de ellas.

Recordando, la región verde representa los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales es posible la formación planetaria y que dependen de la condición de metalicidad impuesta. La región azul representa la zona y los tiempos en los que no se puede formar un planeta debido a la baja cantidad de elementos químicos que se encuentran. La región amarilla representa la zona y los tiempos en los que tampoco se puede dar formación planetaria por poseer una alta metalicidad. Los ejes de las ordenadas en la gráfica de la *Figura 42* (así como también de las gráficas de la *Figura 43*), representan los tiempos de la EQ que son a su vez, las edades de M31. Si se analizan hacia atrás los tiempos de estudio, se deducen las edades que tendrían los planetas formados en la actualidad. Los ejes de las abscisas representan a la distancia galactocéntrica, es decir el radio al cual se localizaría el planeta formado. Adicionalmente, a radios menores a 3 kpc se localiza el *bulbo*; a radios mayores a 3 kpc y

tiempos menores o iguales a 1 Ga, se encuentra el *halo* y a la misma distancia pero a tiempos mayores a 1 Ga está el *disco*.

En la *Figura 42*, se muestra la región naranja que representa las regiones externas del *disco* de M31 en donde puede darse la migración de sistemas planetarios por la MRE. Como se observa, la metalicidad del *bulbo* no se vio afectada por la MRE. En la actualidad, es decir a los 13 Ga de la EQ de M31, se encontrarían planetas con edades de hasta 12.5 Ga que migraron de regiones internas.



4.4 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA

Para poder involucrar a la MRE en la ZHG, el concepto de esta última debe ser ampliado ya que actualmente sólo se considera las regiones donde pueden formarse los sistemas planetarios (González, Brownlee, & Ward, 2001; Lineweaver, 2001; Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004). Por lo tanto, en este trabajo se plantea que la ZHG es cualquier región que cumpla con cualquiera de las siguientes dos condiciones:

- Suficiente abundancia de elementos químicos para formar sistemas planetarios donde planetas tipo Tierra son encontrados y son capaces de sostener vida.

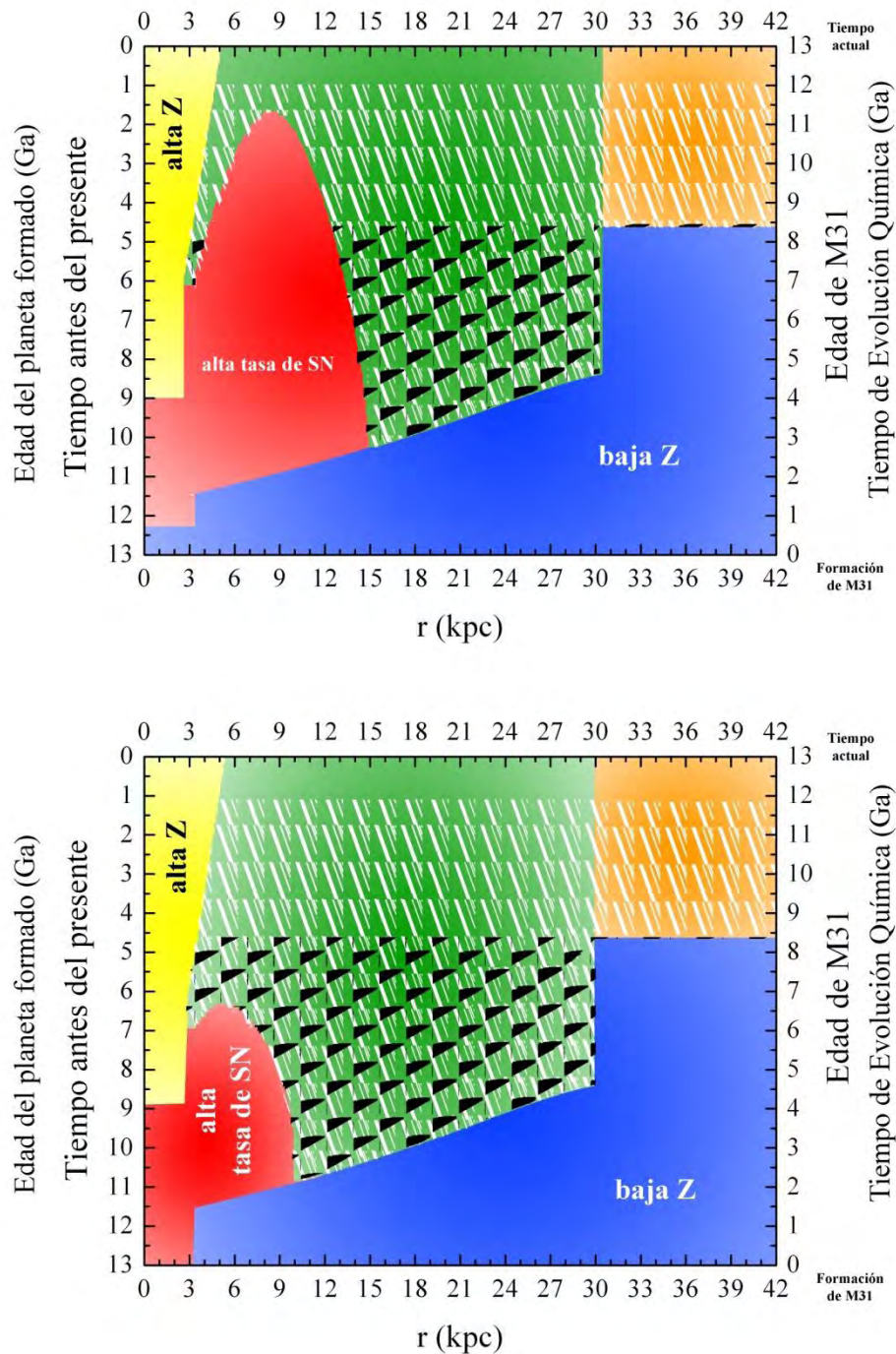
- Sistemas planetarios donde planetas tipo Tierra son encontrados y son capaces de sostener vida.

Con lo anterior y el haber encontrado las regiones donde puede haber migración de sistemas planetarios, se aplicaron las condiciones de sobrevivencia a SN propuestas en este trabajo para así encontrar ZHG que se muestran en la *Figura 43*.

Recordando, la región verde representa los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales es posible la formación planetaria y que dependen de la condición de metalicidad impuesta. La región roja muestra los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales los planetas formados sobrevivieron a la ocurrencia de SN dependiendo del escenario impuesto al modelo de EQ de M31. La región texturizada blanca indica los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y podrían contener vida simple en ellos. La región texturizada negra indica los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales se encuentran planetas que podrían contener vida desarrollada en ellos. Así mismo, la región azul representa la zona y los tiempos en los que no se puede formar un planeta debido a la baja cantidad de elementos químicos que se encuentran. La región amarilla representa la zona y los tiempos en los que tampoco se puede dar formación planetaria por poseer una alta metalicidad. Los ejes de las ordenadas en las gráficas de la *Figura 43*, representan los tiempos de la EQ que son a su vez, las edades de M31. Si se analizan hacia atrás los tiempos de estudio, se deducen las edades que tendrían los planetas formados en la actualidad. Los ejes de las abscisas representan a la distancia galactocéntrica, es decir el radio al cual se localizaría el planeta formado. Adicionalmente, a radios menores a 3 kpc se localiza el *bulbo*; a radios mayores a 3 kpc y tiempos menores o iguales a 1 Ga, se encuentra el *halo* y a la misma distancia pero a tiempos mayores a 1 Ga está el *disco*.

En la gráfica superior de la *Figura 43*, se muestra la ZHG considerando la primera condición propuesta de la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en toda la vida del planeta (ver *ecuación 71*) y las edades mínimas que deben tener los planetas formados para haber adquirido ya una órbita circular estable y podrían contener en ellos vida simple y vida desarrollada. En toda la región del *disco* de la misma gráfica, incluyendo las regiones que se encuentran a radios mayores a 30 kpc en donde hubo MRE, después de los 2 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas que cuentan con las condiciones adecuadas para la vida, ya sea simple o desarrollada. Sin embargo, tal vez se encuentren planetas, en esa misma región, que migraron desde el *bulbo* y regiones centrales del *disco*, y en ellos la posibilidad de vida ha sido ya anulada debido a la ocurrencia de SN. En la gráfica inferior de la *Figura 43*, se muestra la ZHG considerando la segunda condición propuesta de la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en cada uno de los instantes de la vida del planeta (ver *ecuación 73*) y las edades mínimas que deben tener los planetas formados para haber adquirido ya una órbita circular estable y contener en ellos vida simple y vida desarrollada. En la región del *disco* de la misma gráfica, incluyendo las regiones que se encuentran a radios mayores a 30 kpc en donde hubo MRE, después de los 3 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas que cuentan con las condiciones adecuadas para la vida, ya sea simple o desarrollada. Sin embargo, tal vez se encuentren planetas, en esa misma región, que migraron desde el *bulbo* y/o regiones centrales del *disco*, y en ellos la posibilidad de vida ha sido ya anulada debido a la ocurrencia de SN.

FIGURA 43 ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SN QUE PODRÍAN VIDA SIMPLE + COMPLEJA Y MRE

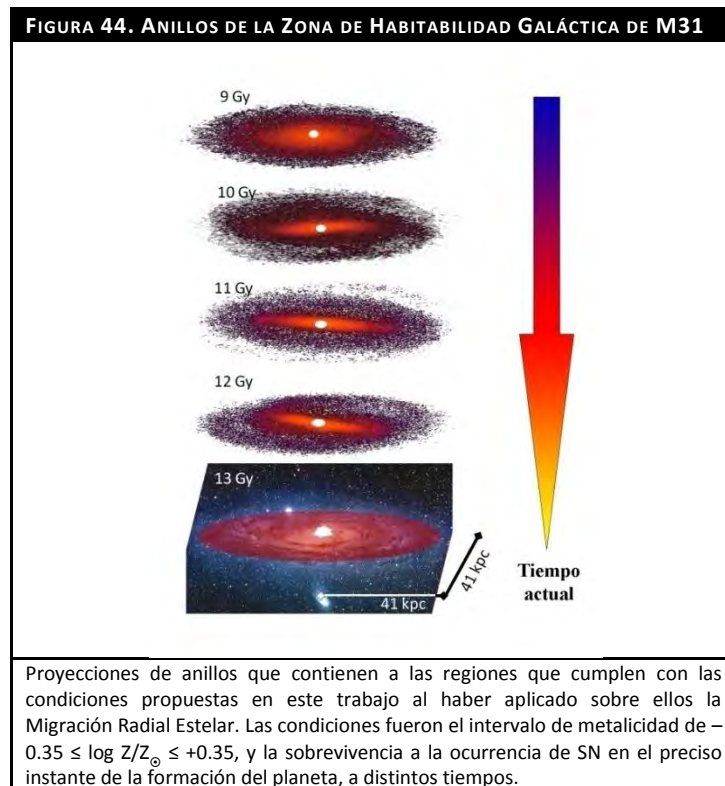


La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos propuestos de metalicidad, es decir: $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y, $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ del presente trabajo en la gráfica inferior. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos. La región roja representa los radios y los tiempos donde y cuando los planetas formados tuvieron: $\langle \xi(r,t) \rangle \geq 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$ en sus primeros 4.5 Ga de existencia de acuerdo con Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y, $\langle \xi(r,t) \rangle \geq \langle \xi_{\oplus} \rangle$ en cada uno de los instantes de la vida del planeta de acuerdo a lo propuesto en el presente trabajo y mostrado en la gráfica inferior. La región texturizada blanca representa a las zonas en donde se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y pueden contener vida simple en ellos. La región texturizada negra representa a las zonas en donde se encuentran planetas que pueden contener vida desarrollada en ellos. La región naranja representa las zonas de M31 donde puede darse migración de sistemas planetarios debido a la Migración Radial Estelar.

En la actualidad, es decir a los 13 Ga de la EQ de M31, tomando en cuenta cualquier escenario de metalicidad y sobrevivencia a la ocurrencia de SN, se encontrarían planetas que pueden contener tanto vida simple como desarrollada por el hecho de tener la edad mínima para esta condición, ya que las edades van desde 4.5 Ga hasta 11 Ga. Sin embargo, debido a que la región del *bulbo* y las regiones centrales del *disco*, tuvieron una alta ocurrencia de SN pudiendo no haber permitido la sobrevivencia la vida, representando así la razón por la cual en regiones externas de M31, no se encuentran planetas con vida, pese a que las condiciones podrían ser las adecuadas.

4.5 ANILLOS DE LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA A DISTINTOS TIEMPOS

Para poder ejemplificar de mejor manera cómo cambian las regiones donde puede darse la ZHG junto con la MRE en M31, se proyectaron anillos³⁰ que contienen a las regiones sobre el plano de la galaxia, a distintos tiempos, que cumplen con condiciones para la ZHG. En la *Figura 44*, se muestran los anillos proyectados a distintos tiempos de la EQ de M31 que cumplieron con las condiciones propuestas en este trabajo y a las que se les aplicó la MRE.



³⁰ Debido a la suposición del modelo de EQ de simetría azimutal/axial.

Las condiciones tomadas fueron el intervalo de metalicidad de $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$, y la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en el preciso instante de la formación del planeta (ver *ecuación 73*). Como se puede observar, conforme transcurrió la EQ, el ancho del anillo fue aumentando debido al incremento de las abundancias químicas.

La última imagen de la figura, muestra una imagen, en el óptico, de M31 a la que se le superpuso el anillo de la ZHG que tiene en la actualidad, i.e. a los 13 Ga de su formación. Actualmente, la ZHG de M31 es un anillo el cual inicia a 5 kpc desde el centro de la galaxia y termina, aproximadamente, a los 42 kpc lo que implica que tiene un grosor de ~ 25 kpc. La ZHG actual contendría planetas con edades de hasta 11 Ga los cuales ya cuentan con una órbita circular estable y podrían contener vida tanto simple como compleja.