



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

Instituto de Astronomía (IA-CU)

**HISTORIAS QUÍMICAS DE DOS GALAXIAS ENANAS ESFEROIDALES
AISLADAS DEL GRUPO LOCAL: TUCANA Y CETUS**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (ASTRONOMÍA)

PRESENTA

NANCY HAYDEÉ ÁVILA VERGARA

TUTOR

DRA. LETICIA CARIGI
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

MÉXICO, D. F., junio 2014.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice general

Índice general	III
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ECUACIONES DE LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN QUÍMICA	5
2.1. Ecuaciones de los Modelos de Evolución Química con IRA	5
2.2. Suposiciones para los Modelos de Evolución Química	7
3. HISTORIAS QUÍMICAS PARA TUCANA	15
3.1. MODELOS SIMPLES	15
3.2. MODELOS COMPLEJOS	18
3.2.1. Modelo de Dilución Gaseosa	18
3.2.2. Modelo de Pérdida de Metales	19
3.3. PROLONGACIÓN DEL VIENTO BIEN MEZCLADO	23
3.4. REPRODUCIENDO LA MASA DE GAS ACTUAL	26
4. HISTORIAS QUÍMICAS PARA CETUS	28
4.1. MODELOS COMPLEJOS	28
4.1.1. Modelo de Dilución Gaseosa	29
4.1.2. Modelo de Pérdida de Metales	29
4.2. PROLONGACIÓN DEL VIENTO BIEN MEZCLADO	33
4.3. INFIRIENDO LA MASA DE GAS	33
5. DISCUSIÓN	36
6. CONCLUSIONES	41

Bibliografía**43**

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El modelo cosmológico más aceptado actualmente es el llamado Λ CDM. Este modelo es exitoso pues es capaz de reproducir una gran cantidad de observaciones tales como: la estructura a gran escala, la expansión del universo y el fondo cósmico de microondas. No obstante enfrenta problemas al explicar el número de galaxias enanas satélites, pues el modelo predice en la Vía Láctea un número de galaxias un orden de magnitud mayor que el observado.

A fin de dar solución al problema se han propuesto diferentes escenarios, como el que supone que la discrepancia se debe a que no se han observado muchas de estas galaxias, debido a que el número de estrellas que se formaron en ellas fue muy bajo, por lo que este tipo de galaxias son difíciles de detectar y de bajo brillo superficial. Debido a que los pozos de potencial gravitatorio de las galaxias enanas son pequeños, se cree que la ausencia o disminución en la formación estelar puede deberse al calentamiento o pérdida del gas al medio intergaláctico causado por diversos factores tal como; el feedback por supernovas, el fondo cósmico UV procedente de la época de la reionización o a las interacciones gravitacionales entre ellas y sus galaxias anfitrionas.

Por lo tanto el estudio detallado de los procesos que determinan la evolución y formación de este tipo de galaxias es de gran interés e importancia para explicar las diferencias entre el número de galaxias satélites que predice el Λ CDM y las observaciones.

El proyecto LCID (Local Cosmology from Isolate Dwarfs, I.P.: Carme Gallart, Antonio Aparicio y Andrew Cole) ha observado, usando el HST, seis galaxias enanas aisladas del Grupo Local. El objetivo del proyecto ha sido obtener la

historia de formación estelar (*HFE*) y gradientes de poblaciones en estas galaxias a partir de diagramas color-magnitud profundos. Con la intención de estudiar los procesos internos de formación y evolución de cada galaxia independientes de interacciones gravitacionales fuertes con galaxias mayores, el proyecto LCID seleccionó galaxias enanas aisladas, es decir, galaxias del Grupo Local suficientemente lejanas de la Vía Láctea y M31. Se analizaron seis galaxias enanas de diferente tipo morfológico: dos enanas esferoidales (dSphs): Tucana y Cetus, dos enanas irregulares (dIrrs): IC1613 y Leo A y dos enanas de transición (dTrs): LGS-3 y Phoenix.

A continuación presentamos algunas de las propiedades generales de las galaxias enanas.

- Las dSphs se caracterizan por tener forma esferoidal y estar virializadas, además de la ausencia de gas neutro y regiones HII. No muestran formación estelar reciente y contienen poblaciones estelares principalmente viejas.
- Las dIrrs se caracterizan por presentar formación estelar reciente espacialmente irregular y no estar virializadas, además de presentar gas neutro y abundantes regiones HII. Muestran formación estelar reciente y contienen poblaciones estelares de todas las edades.
- Las dTrs comparten características de las dSphs y las dIrr, contienen muy poco gas neutro y tienen ausencia de regiones HII. Muestran formación estelar reciente y contienen poblaciones estelares de todas las edades.

Una fuerte motivación para el estudio de este tipo de galaxias, es el determinar si en épocas tempranas tuvieron un origen común que eventualmente evolucionó en una de las diversas morfologías que ahora se observan, o bien si desde su origen son distintas. La información referente a los procesos de formación y evolución de las galaxias enanas sería de gran interés para dicho propósito.

Como mencionamos antes, es de interés conocer los procesos que definieron la formación y evolución de este tipo de galaxias, para lo que es necesario calcular modelos de evolución química que sean capaces de reproducir las observaciones, como la historia de la metalicidad de las galaxias.

En esta tesis desarrollamos modelos de evolución química para dos galaxias enanas esferoidales, Tucana y Cetus. En particular consideramos las historias de formación estelar, obtenidas por Monelli et al. 2010, a fin de inferir las historias

químicas de este par de galaxias.

La ubicación de las galaxias Tucana y Cetus en el Grupo Local se muestra en la Figura 1.1.

Es importante hacer notar que este trabajo es totalmente novedoso ya que se cuenta por primera vez con las historias de formación estelar y de la metalicidad obtenidas de análisis de diagramas color magnitud. En la literatura se pueden encontrar modelos previos de evolución química para dSphs (Romano & Starkenburg 2013; Carigi, Hernández & Gilmore 2002, por ejemplo), en la mayoría de esos estudios se desconocía la historia de formación estelar y en todos la historia de metalicidad. Asimismo no se encuentran modelos previos de evolución química para Tucana y Cetus en la literatura.

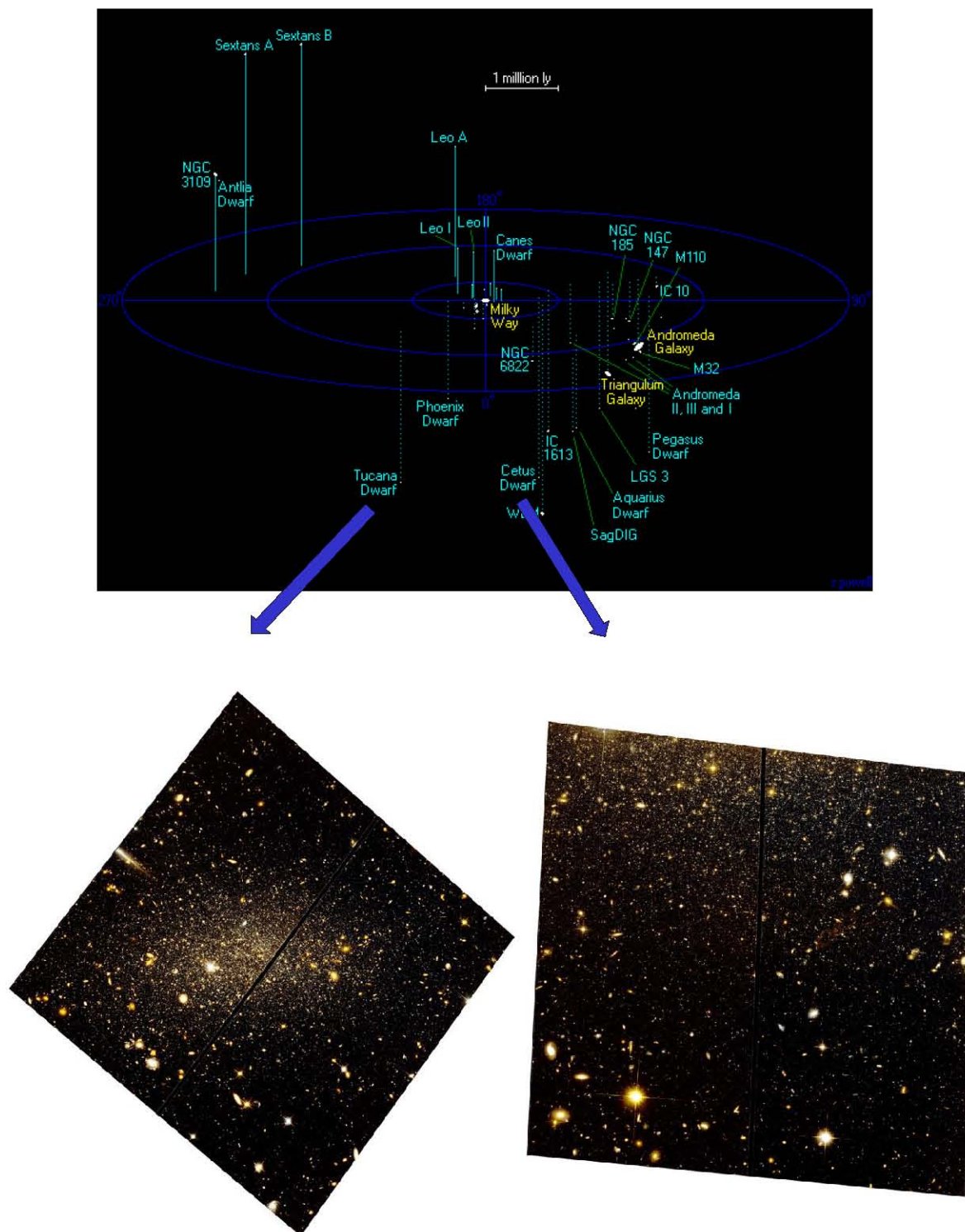


Figura 1.1: Arriba: Representación del Grupo Local, por Richard Powell (www.atlasoftheuniverse.com). Izquierda: Imagen en el óptico de Tucana por Monelli et al. 2010a. Derecha: Imagen en el óptico de Cetus por Monelli et al. 2010b

Capítulo 2

ECUACIONES DE LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN QUÍMICA

Las ecuaciones, y por ende los modelos, de evolución química toman en cuenta distintos parámetros astrofísicos, como: acreción galáctica (A), viento galáctico (W), tasas de formación estelar (ψ , SFR), función inicial de masa (ϕ), eficiencia estelar de producir y eyectar metales o yield (p_z), entre otros.

Nuestros modelos de evolución química (CEMs) se enfocan en dos galaxias enanas esferoidales (dSphs): Tucana y Cetus, ubicadas en el Grupo Local (LG) fuera del radio virial de Andrómeda y de la Vía Láctea (McConnachie 2012). Estos modelos fueron construidos para reproducir tres restricciones observacionales: masas actuales de gas y estrellas y la historia de la metalicidad (Ver figuras 2.3 y 2.4).

2.1. Ecuaciones de los Modelos de Evolución Química con IRA

Las ecuaciones de evolución química son ecuaciones integrodiferenciales que sólo pueden resolverse numéricamente. Sin embargo, estas ecuaciones pueden solucionarse de manera analítica, si es considerada la aproximación de reciclaje instantáneo (IRA). Esta aproximación supone que el tiempo de vida de todas las estrellas más masivas que $1 M_{\odot}$ es despreciable comparado con la edad de la galaxia (Tinsley 1980). Bajo la IRA las ecuaciones de evolución de masa bariónica

(M_{bar}), masa de gas (M_{gas}), masa de estrellas (M_*) y metalicidad (Z) son:

$$\frac{dM_{bar}(t)}{dt} = \frac{d(M_*(t) + M_{gas}(t))}{dt} = A(t) - W(t) \quad (2.1)$$

$$\frac{dM_*(t)}{dt} = (1 - R)\psi(t) \quad (2.2)$$

$$\frac{dM_{gas}(t)}{dt} = -(1 - R)\psi(t) + A(t) - W(t) \quad (2.3)$$

$$\frac{d(Z(t)M_{gas}(t))}{dt} = -Z(t)(1-R)\psi(t) + (1-R)Y_Z\psi(t) + Z_A(t)A(t) - Z_W(t)W(t) \quad (2.4)$$

donde R es la fracción del material devuelto al medio interestelar por todas las estrellas mayores de $1 M_\odot$ que mueren inmediatamente después de nacer y $(1-R)Y_Z$ es la fracción de metales producidos por todas las estrellas mayores a $1 M_\odot$ y eyectados cuando ellas mueren. Mientras que la metalicidad del material que cae a o pierde la galaxia es Z_A y Z_W , respectivamente.

R y Y_Z pueden ser expresados como la suma de las contribuciones respectivas por parte de las estrellas de baja masa e intermedia (LIMS) y de las estrellas masivas (MS), de tal manera que:

$$R = R_{LIMS} + R_{MS} \quad (2.5)$$

y

$$Y_Z = \frac{P_{Z,MS} + P_{Z,LIMS}}{1 - R} \quad (2.6)$$

donde

$$R_{LIMS} = \int_{1M_\odot}^{M_{supLIMS}} (m - m_r)\phi(m)dm \quad (2.7)$$

$$R_{MS} = \int_{M_{supLIMS}}^{M_{sup}} (m - m_r)\phi(m)dm \quad (2.8)$$

$$P_{Z,LIMS} = \int_{1M_\odot}^{M_{supLIMS}} mp_z(m)\phi(m)dm \quad (2.9)$$

$$P_{Z,MS} = \int_{M_{supLIMS}}^{M_{sup}} mp_z(m)\phi(m)dm \quad (2.10)$$

donde m es la masa inicial de cada estrella y m_r la masa de su remanente. Con

$M_{supLIMS}$ y M_{sup} las masas superiores consideradas para las LIMS y las MS, respectivamente.

2.2. Suposiciones para los Modelos de Evolución Química

Los modelos de evolución química que presentamos en esta tesis se realizaron bajo las suposiciones generales descritas a continuación:

1. Aproximación de reciclaje instantáneo.
2. La masa dinámica es constante en el tiempo, es decir, $M_{din}(t) = cte$.
 M_{din} está relacionada con la masa bariónica, a través de la fracción bariónica, f_b . En particular, $f_b(0) = \frac{M_{bar}(0)}{M_{din}}$.
3. Inicialmente la masa bariónica está formada sólo por gas, $M_{bar}(0) \equiv M_{gas}(0)$.
4. Los valores de R_{MS} , R_{LIMS} , P_{ZMS} y P_{ZLIMS} fueron tomados de Hernández-Martínez et al. (2011). Ellos consideraron la función inicial de masa de Kroupa et al. (1993) desde una masa inferior igual a $0.1 M_{\odot}$ hasta una masa superior M_{sup} y supusieron $M_{supLIMS} = 7.5 M_{\odot}$. Nosotros elegimos los datos, $R = 0.25839$ y $Y_Z = 9.4564 \times 10^{-3}$, para $Z_i = 4.0 \times 10^{-3}$ y $M_{sup} = 40 M_{\odot}$.
5. La tasa de formación estelar en función del tiempo $\psi(t)$ viene dada por Monelli et al. 2010. (Ver Figuras 2.1 y 2.2 en esta tesis)
6. La masa de estrellas se expresa como función de la tasa de formación estelar por:

$$M_*(t) = (1 - R) \int_0^t \psi(t) dt \quad (2.11)$$

Debido a que la ecuación de M_* sólo depende de la *SFR* y ésta es fija para cada galaxia, $M_*(t)$ será la misma para todos los modelos químicos de una misma galaxia.

7. La edad de la galaxia es $t_g \equiv 13.5 Ga$.
-

En base a estas suposiciones desarrollamos modelos simples, considerando un mismo escenario galáctico durante toda la evolución de la galaxia. En cada uno de los cuatro escenarios las propiedades de la acreción y los vientos son distintas.

Los modelos simples de evolución desarrollados son:

- A) modelo de caja cerrada (CBM),
- B) modelo de acreción primigenia (PAM),
- C) modelo de viento galáctico bien mezclado (WWM) y
- D) modelo con yield reducido (RYM).

A continuación se describen las suposiciones específicas de cada modelo simple:

A) El CBM considera que ni cae a, ni escapa de, la galaxia gas, es decir, $A(t) = W(t) = 0$. Entonces la evolución de M_{bar} , M_{gas} y Z se expresa como:

$$M_{bar}(t) = M_{bar}(0) = M_{gas}(0) = cte \quad (2.12)$$

$$M_{gas}(t) = M_{gas}(0) - (1 - R) \int_0^t \psi(t) dt \quad (2.13)$$

$$Z(t) = -Y_Z \ln \mu(t) \quad (2.14)$$

donde $\mu(t) = \frac{M_{gas}(t)}{M_{bar}(0)}$.

B) El PAM supone que la galaxia se forma por acreción, $A(t) \neq 0$, de material primigenio, $Z_A(t) = 0$, pero no pierde gas al medio intergaláctico, $W(t) = 0$. Consideramos que la tasa de acreción $A(t)$ es proporcional a la SFR, $A(t) = a(1 - R)\psi(t)$ y por lo tanto la evolución de M_{bar} , M_{gas} y Z se expresa como:

$$M_{bar}(t) = M_{bar}(0) + a(1 - R) \int_0^t \psi(t) dt \quad (2.15)$$

$$M_{gas}(t) = M_{gas}(0) + (a - 1)(1 - R) \int_0^t \psi(t) dt \quad (2.16)$$

$$Z(t) = \frac{Y_Z}{a} [1 - \mu(t)^{\frac{a}{1-a}}] \quad (2.17)$$

con a la eficiencia de acreción.

C) El WWM toma en cuenta que la galaxia pierde gas, $W(t) \neq 0$, pero no cae gas del medio intergaláctico, $A(t) = 0$. Suponemos que el material eyectado por las MS y las LIMS, se mezcla con el medio interestelar antes de ser expulsado al medio intergaláctico a través de vientos, $Z_W(t) = Z(t)$. Tomamos en cuenta que la tasa de pérdida de gas $W(t)$ es proporcional la *SFR*, $W(t) = w(1 - R)\psi(t)$, por lo que la evolución de M_{bar} , M_{gas} y Z se expresa como:

$$M_{bar}(t) = M_{bar}(0) - w(1 - R) \int_0^t \psi(t)dt \quad (2.18)$$

$$M_{gas}(t) = M_{gas}(0) - (1 + w)(1 - R) \int_0^t \psi(t)dt \quad (2.19)$$

$$Z(t) = -\frac{Y_Z}{(1 + w)} \ln[\mu(t)] \quad (2.20)$$

con w la eficiencia del viento.

D) El RYM adopta un yield reducido por un factor de e , en las ecuaciones del CBM. Este factor es obtenido para reproducir la historia química de la galaxia. Físicamente la reducción del yield puede deberse a dos factores, principalmente: 1) vientos selectivos, cuando la *SFR* es alta, o 2) efectos estocásticos en la *IMF*, cuando la *SFR* es baja.

1) Cuando la *SFR* es elevada, el número de SNs es alto y una asociación de estrellas OB en sus últimos estados evolutivos son capaces de crear burbujas galácticas. A través de estas burbujas un porcentaje de los elementos químicos producidos por las MS, e incluso por las LIMS de alta masa, es eyectado al medio intergaláctico sin mezclarse previamente con el medio interestelar de la galaxia (Rodríguez-González et al. 2011). El porcentaje de metales perdidos es: $100(1 - \frac{1}{e})\%$, produciendo un enriquecimiento químico menor en la galaxia.

2) Cuando la *SFR* es pequeña, el número de estrellas masivas formadas es baja considerando la pobre cantidad de gas que se convierte en estrellas. Esto origina efectos estocásticos en la *IMF*, específicamente en el intervalo de estrellas masivas, por lo que el enriquecimiento de la galaxia se debe principalmente a las estrellas de menor masa (Carigi & Hernández 2008). Por lo tanto:

$$M_{bar}(t) = cte \quad (2.21)$$

$$M_{gas}(t) = M_{gas}(0) - (1 - R) \int_0^t \psi(t)dt \quad (2.22)$$

$$Z(t) = -\frac{Y_Z}{e} \ln \mu(t) \quad (2.23)$$

Queremos hacer notar que las ecuaciones anteriores son equivalentes a las ecuaciones canónicas escritas por Tinsley (1980) y presentadas, por ejemplo, en Matteucci (2001). En esta tesis las $Z(t)$ son expresadas en función de $\mu(t) \equiv \frac{M_{gas}(t)}{M_{bar}(0)}$, mientras que las $Z(t)$ canónicas son expresadas en función de $\mu(t) = \frac{M_{gas}(t)}{M_{bar}(t)}$. Nosotros preferimos las primeras ya que $M_{bar}(0)$ es un parámetro libre de los modelos y las ecuaciones son más concisas.

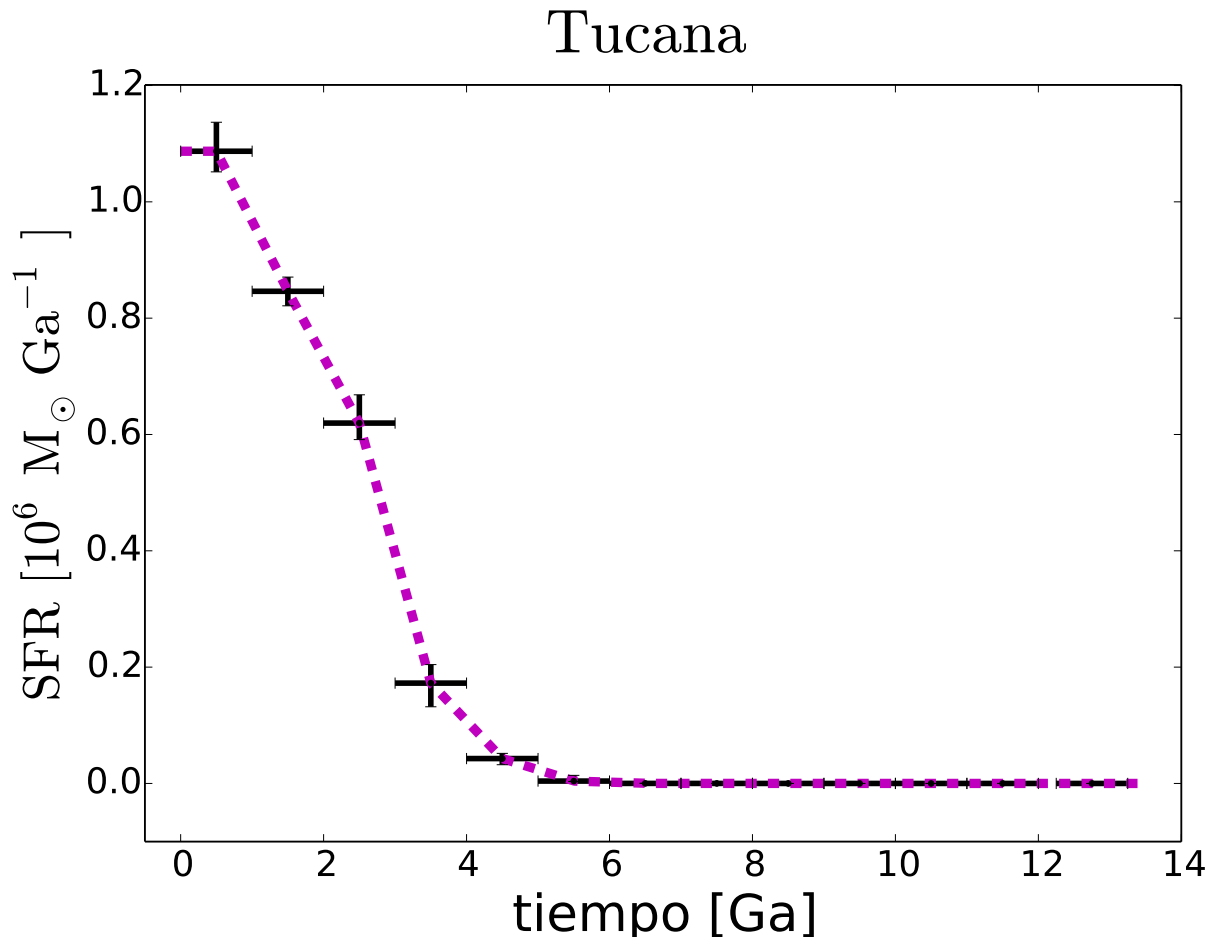


Figura 2.1: Valores inferidos de la tasa de formación estelar de Tucana en función del tiempo (línea a trazos magenta). La $SFR(t) = 0$ a $t > 7.5$ Ga. Datos por Monelli et al. 2010a.

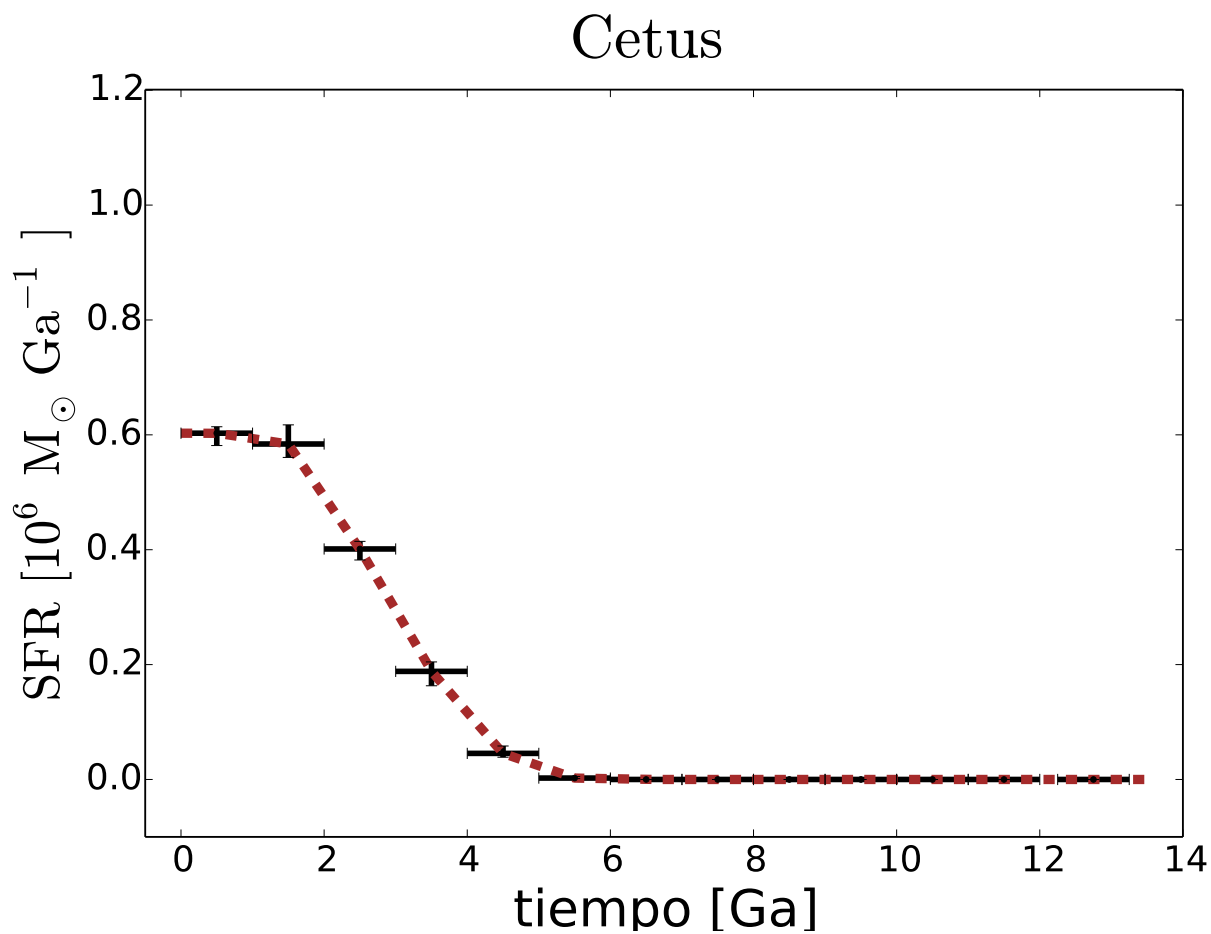


Figura 2.2: Valores inferidos de la tasa de formación estelar de Cetus en función del tiempo (línea a trazos café). La $SFR(t) = 0$ a $t > 6.5$ Ga. Datos por Monelli et al. 2010b.

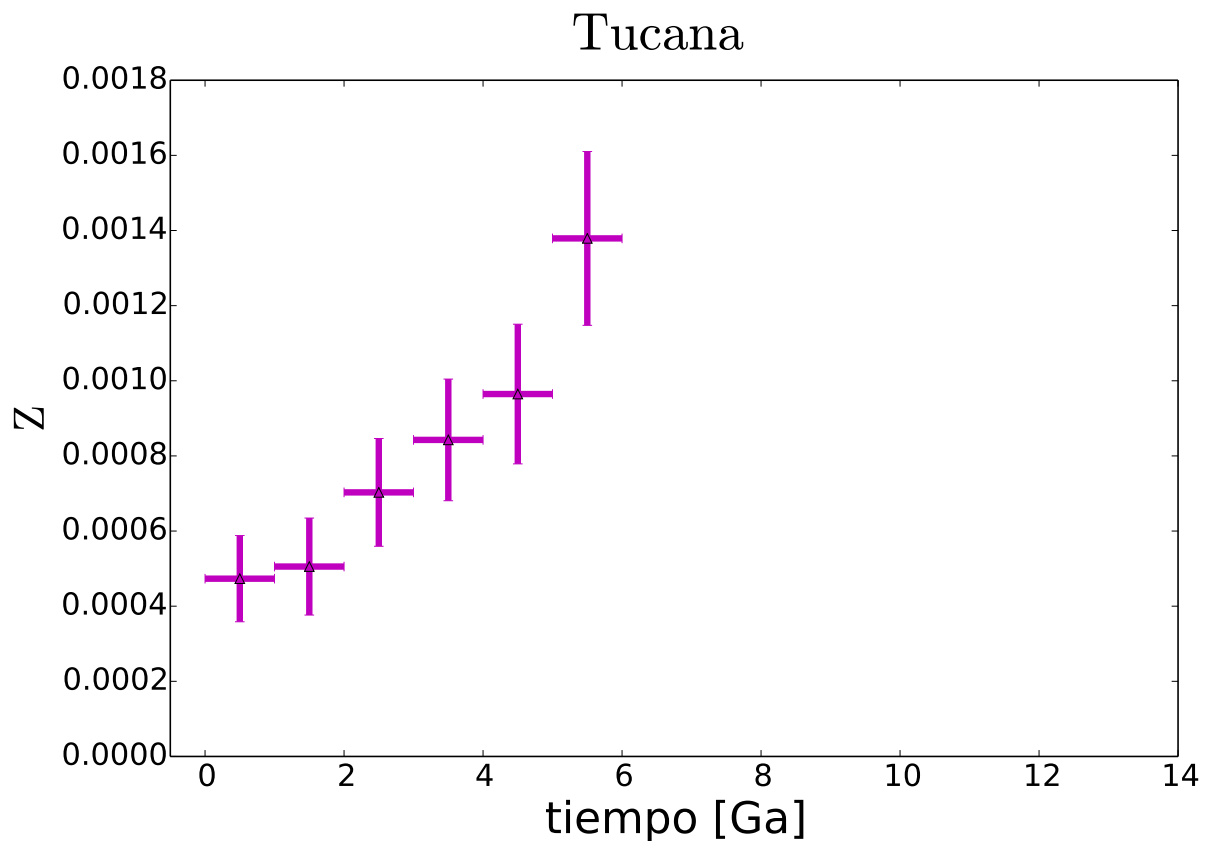


Figura 2.3: Valores inferidos de la metalicidad de las estrellas formadas en Tucana, por Monelli et al. 2010a.

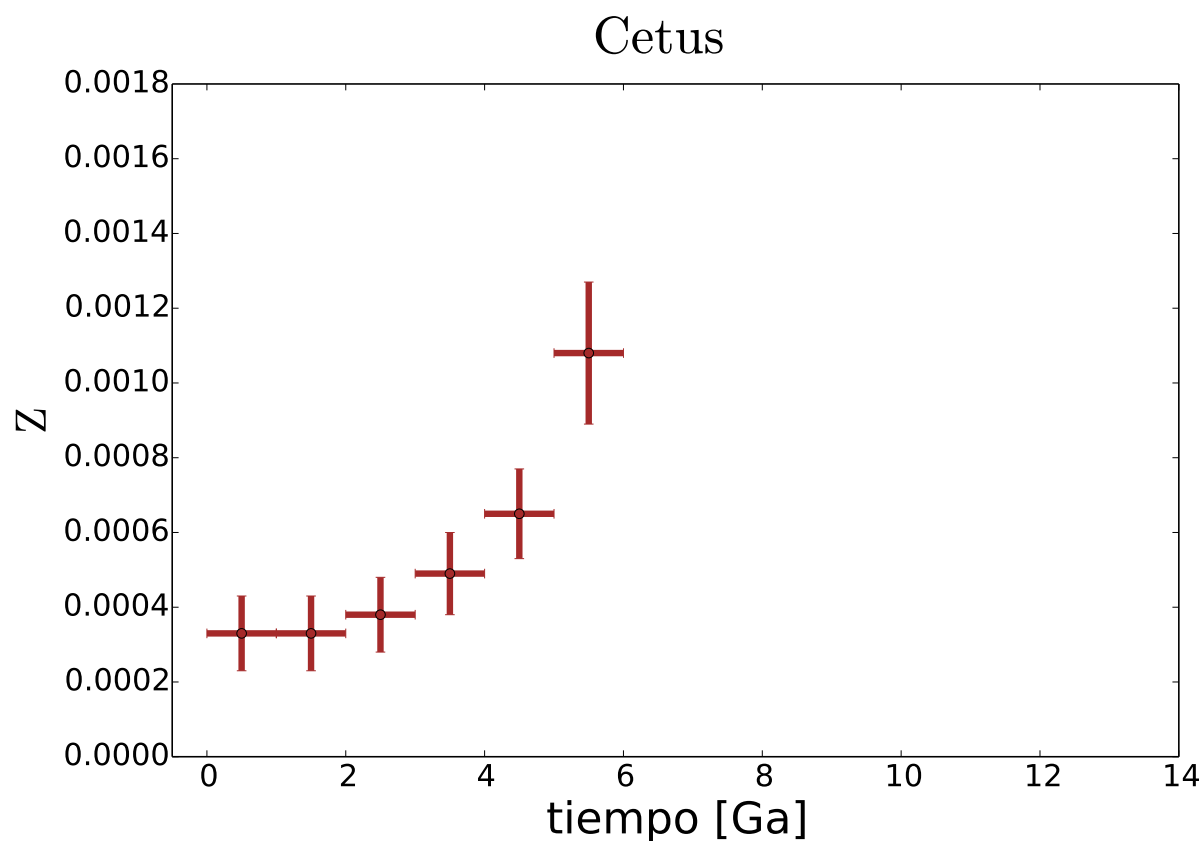


Figura 2.4: Valores inferidos de la metalicidad de las estrellas formadas en Cetus, por Monelli et al. 2010b.

Capítulo 3

HISTORIAS QUÍMICAS PARA TUCANA

Inicialmente nos enfocamos en el estudio de la galaxia enana esferoidal Tucana. Tucana está localizada a 0.9 Mpc de la Vía Láctea y a 1.3 Mpc de M31.

Los datos observacionales de esta galaxia que fueron usados para restringir los modelos de evolución química se muestran en la tabla 3.1.

Cuadro 3.1: Datos observacionales^a

	<i>Tucana</i>
$M_{gas} (10^4 M_{\odot})$	1.5 ^b
$M_{*} (10^6 M_{\odot})$	1.86
$M_{din} (10^7 M_{\odot})$	6
$Z_{obs}(5.5Ga)$	0.001379 ± 0.0002314

(a) Monelli et al. (2010a).

(b) Oosterloo et al. (1996).

3.1. MODELOS SIMPLES

Inicialmente probamos modelos simples donde supusimos un sólo escenario de evolución química para toda la vida de la galaxia, variando los parámetros de cada modelo, la fracción bariónica inicial, $f_b(0)$, la eficiencia de acreción y de vientos, a y w , respectivamente (Ver Tabla 3.2). Los modelos intentan reproducir los observables M_{gas} actual y Z a 5.5 Ga. Los escenarios que probamos fueron:

1. CBM, con $f_b(0)$ entre 0.0345 y 0.218
2. PAM, con $f_b(0)$ de 0.10 y 0.15
3. WWM, con $f_b(0)$ de 0.10, 0.15 y 0.30
4. RYM, con $f_b(0)$ de 0.10 y 0.15

Los valores de $f_b(0)$ fueron elegidos para reproducir la M_{gas} actual o Z y en otros casos fueron los aceptados actualmente en la literatura (por ejemplo, González-Samaniego et al. 2014).

Los modelos más representativos se muestran en la tabla 3.2.

Ningún modelo que considera un único escenario en toda la evolución galáctica fue exitoso. A continuación se muestran las razones por las que esos modelos fueron descartados. Nos referiremos a la metalicidad inferida con nuestros modelos como Z_{Mod} .

1. CBM

- a) Para reproducir $M_{gas}(13.5 Ga)$, debimos suponer una fracción bariónica inicial de 0.0345, pero $Z_{Mod} = 33Z_{Obs}$.
- b) Pudimos reproducir Z_{Obs} aumentando la fracción bariónica inicial a 0.22, pero la fracción bariónica es absurda (González-Samaniego et al. 2014) y $M_{gas}(13.5 Ga) = 735 M_{gas}^{Obs}$.
- c) Suponiendo fracción bariónica inicial de 0.10 ~ 0.15, obtuvimos $M_{gas}(13.5 Ga) = (263 \sim 463) M_{gas}(Obs)$ y $Z_{Mod} = (2.8 \sim 1.7)Z_{Obs}$.

2. PAM

- a) Suponiendo fracción bariónica inicial $f_{bar}(0) = 0.10$ y eficiencia de acreción $a = 10$ y 11, logamos reproducir los Z_{Obs} , sólo entre $t = 0$ y 3 Ga. En este caso la $M_{gas}(13.5 Ga) \sim 1630 M_{gas}^{Obs}$.
- b) Suponiendo $f_{bar}(0) = 0.15$ y $a = 7$, se logra reproducir también los Z_{Obs} sólo entre $t = 0$ y 3 Ga. En este caso la $M_{gas}(13.5 Ga) = 1420 M_{gas}^{Obs}$.

3. WWM

- a) Para reproducir $M_{gas}(13.5 Ga)$, debimos suponer una eficiencia de viento $w \sim 1.9$ y 3.3, para $f_{bar}(0) = 0.10$ y 0.15, pero obtuvimos $Z_{Mod} = (13 \sim 9.4)Z_{Obs}$. La eficiencia del viento se determinó a partir de la fracción bariónica inicial y la M_{gas} observada.

b) Pudimos reproducir $\sim Z_{Obs}$ dentro del error, aumentando la fracción bariónica inicial y suponiendo $w = 2$, pero la fracción bariónica inicial y la M_{gas} actual son absurdas (González-Samaniego et al. 2014), siendo estas 0.30 y $789M_{gas}^{Obs}$ respectivamente.

4. RYM

Para reducir Z_{Mod} obtenidos con el CBM, considerando $f_{bar}(0) = 0.10$, multiplicamos los yields por un factor de 0.22 y logramos reproducir los Z_{Obs} sólo entre $t = 1.5$ y 5.0 Ga.

En conclusión, asumir un único escenario de enriquecimiento químico para toda la vida de la galaxia no reproduce las observaciones o lleva a establecer parámetros físicos difícilmente aceptables.

Cuadro 3.2: Parámetros de entrada y resultados de los modelos simples para Tucana.

Modelo	$f_b(0)$	a	w	e	$M_{gas}(13.5 Ga)(10^4 M_\odot)$	$Z_{Mod}(5.5 Ga)$
CBM	0.0345	0	0	1	1.5	0.0462
CBM	0.2180	0	0	1	1102	0.0016
PAM	0.10	10	0	1	2450	0.0007
PAM	0.15	7	0	1	2133	0.0008
WWM	0.15	0	3.3	1	1.54	0.0130
WWM	0.30	0	2.0	1	1183	0.0013
RYM	0.10	0	0	4.5	394	0.0009
RYM	0.0345	0	0	33.0	1.5	0.0014
<i>Tucana</i>	–	–	–	–	1.5^b	0.0014 ± 0.0002^a

Columna 1: Nombre del modelo. Columnas 2, 3, 4 y 5: parámetros de entrada del modelo: fracción bariónica inicial, eficiencia de acreción, eficiencia de viento y factor de reducción del yield, respectivamente. Columnas 6 y 7: valores de salida del modelo: masa de gas actual y metalicidad de las estrellas más jóvenes.

(a) Z_{obs} por Monelli et al. 2010a.

(b) Oosterloo et al. (1996).

3.2. MODELOS COMPLEJOS

Basándonos en los resultados de la sección anterior, aunado al comportamiento de la $SFR(t)$ y $Z(t)$, marcadamente diferente antes y después de $t \sim 4$ Ga, decidimos probar con modelos que combinan los escenarios previamente expuestos en Tucana.

Con este propósito, analizamos la historia de formación estelar y química de Tucana y notamos que ambas historias podrían estar indicando procesos galácticos diferentes en tres etapas distintas, como se describe a continuación:

- Entre 0 y 2 Ga la tasa de formación estelar es la más intensa, mientras que la metalicidad permanece casi constante.
- Entre 2 y 4 Ga la tasa de formación estelar continúa pero con menor intensidad, disminuyendo hasta casi llegar a su valor mínimo, mientras que la metalicidad muestra un incremento suave.
- Entre 4 y 13.5 Ga la tasa de formación estelar se reduce hasta volverse nula a $t \sim 6$ Ga, mientras que la metalicidad aumenta drásticamente hasta alcanzar su valor máximo a $t \sim 6$ Ga.

Considerando estas tres etapas, así como los escenarios expuestos previamente en los modelos simples, los dos modelos complejos más exitosos propuesto para Tucana se describen a continuación.

3.2.1. Modelo de Dilución Gaseosa

Este modelo supone:

1. Fracción bariónica inicial de 0.10.
 2. Acreción primigenia (PAM) durante los primeros 2 Ga con una eficiencia de acreción igual a 10.
 3. Caja cerrada (CBM) de 2 Ga a 4.5 Ga.
 4. Un viento bien mezclado (WWM) a 4.5 Ga.
 5. Caja cerrada (CBM) de 4.5 Ga a 13.5 Ga.
-

A lo largo de los primeros 2 Ga, la galaxia se formó por un evento de acreción de material primigenio (H y He), que diluyó los metales eyectados por las estrellas formadas y muertas durante este período de máxima *SFR* (ver figura 3.1).

Entre los 2 y 4.5 Ga, la formación estelar continuó con menor intensidad, a causa de la disminución del gas proveniente del medio intergaláctico. Así, al morir las estrellas, los metales eyectados por éstas se mezclaron con el medio interestelar, incrementando la metalicidad como en Monelli et al. 2010a.

Al morir las estrellas calentaron el gas hasta que a $t \sim 4.5$ Ga, la energía térmica del medio interestelar supera la energía gravitacional y se produce un viento galáctico bien mezclado. A través de este viento, se perdió 98.5 % del gas al medio intergaláctico.

Con el restante 1.5 % del gas y los metales eyectados por las estrellas entre 4.5 y 5.5 Ga, se crea la última generación estelar a $t \sim 6$ Ga con una metalicidad $Z \sim 0.0016$, de manera que $M_{gas}(13.5\text{Ga}) = 2.59 \times 10^5 M_{\odot}$, un orden de magnitud mayor al observado.

Para poder reproducir la masa de gas actual, la galaxia debería perder más del 99 % de su gas en el viento, no el 98.5 %. Con el 99 % de gas perdido, se predice $Z(5.5\text{Ga}) = 0.0019$, el cual es $0.8 Z_{Obs}(5.5\text{Ga})$ y $M_{gas}(13.5\text{Ga}) = 1.62 \times 10^5 M_{\odot}$, comparable con lo observado. Analizando ambas posibilidades de pérdida de gas, preferimos el modelo que reproduce Z en lugar del modelo que reproduce M_{gas} , ya que no hay datos confiables para la M_{gas} actual en esta galaxia.

En resumen, encontramos bajo el escenario de la dilución gaseosa que el modelo que más ajusta las observaciones de la metalicidad supone, una acreción primigenia los primeros 2 Ga de vida de la galaxia, una caja cerrada durante los siguientes 2.5 Ga, seguido de una fuerte pérdida de gas a través de un viento bien mezclado centrado en 4 Ga con 1Ma de duración y continuando con una caja cerrada hasta la actualidad. Sin embargo en este modelo se tiene dificultad en el ajuste de la masa de gas actual de la galaxia.

3.2.2. Modelo de Pérdida de Metales

Este modelo supone:

1. Fracción bariónica inicial de 0.10.

2. Acreción primigenia (PAM) durante el primer Ga con una eficiencia de acreción igual a 10.
3. Yield reducido (RYM) de 1 Ga a 3 Ga, con un yield igual al 40 % del original o equivalentemente una pérdida del 60 % de los metales.
4. Caja cerrada (CBM) de 3 Ga a 4.5 Ga.
5. Un viento bien mezclado (WWM) a 4.5 Ga.
6. Caja cerrada (CBM) de 4.5 Ga a 13.5 Ga.

Durante el primer Ga la galaxia se formó por un evento de acreción de material primigenio (H y He). Ver figura 3.2.

Entre 1 y 3 Ga, la formación estelar continuó disminuyendo su intensidad, y al morir las estrellas durante este periodo estimamos que se perdió el 60 % de los metales eyectados por éstas al medio intergaláctico, sin antes mezclarse con el medio interestelar, debido a un viento selectivo, incrementando la metalicidad gradualmente como en Monelli et al. (2010a).

De 3 a 4.5 Ga continuó la formación estelar con su valor mínimo incrementando la metalicidad, así al seguir muriendo las estrellas calentaron el gas hasta que a $t \sim 4.5$ Ga, la energía térmica del medio interestelar supera la energía gravitacional y se produce un viento galáctico. A través de este viento se perdió 97.6 % del gas al medio intergaláctico.

Con el 2.4 % del gas restante, se crea la última generación estelar a $t \sim 6$ Ga con una metalicidad $Z \sim 0.0016$, de manera que $M_{gas}(13.5\text{Ga}) = 2.67 \times 10^5 M_{\odot}$ un orden de magnitud mayor al observado.

En síntesis, encontramos bajo el escenario de pérdida de metales que el modelo que más ajusta las observaciones de la metalicidad supone, una acreción primigenia el primer Ga de vida de la galaxia, un viento selectivo durante los siguientes 2 Ga, una caja cerrada el siguiente 1.5 Ga, seguido de una fuerte pérdida de gas a través de un viento bien mezclado centrado en 4 Ga con 1Ma de duración y continuando con una caja cerrada hasta la actualidad. Sin embargo en este modelo se tiene dificultad en el ajuste de la masa de gas actual de la galaxia.

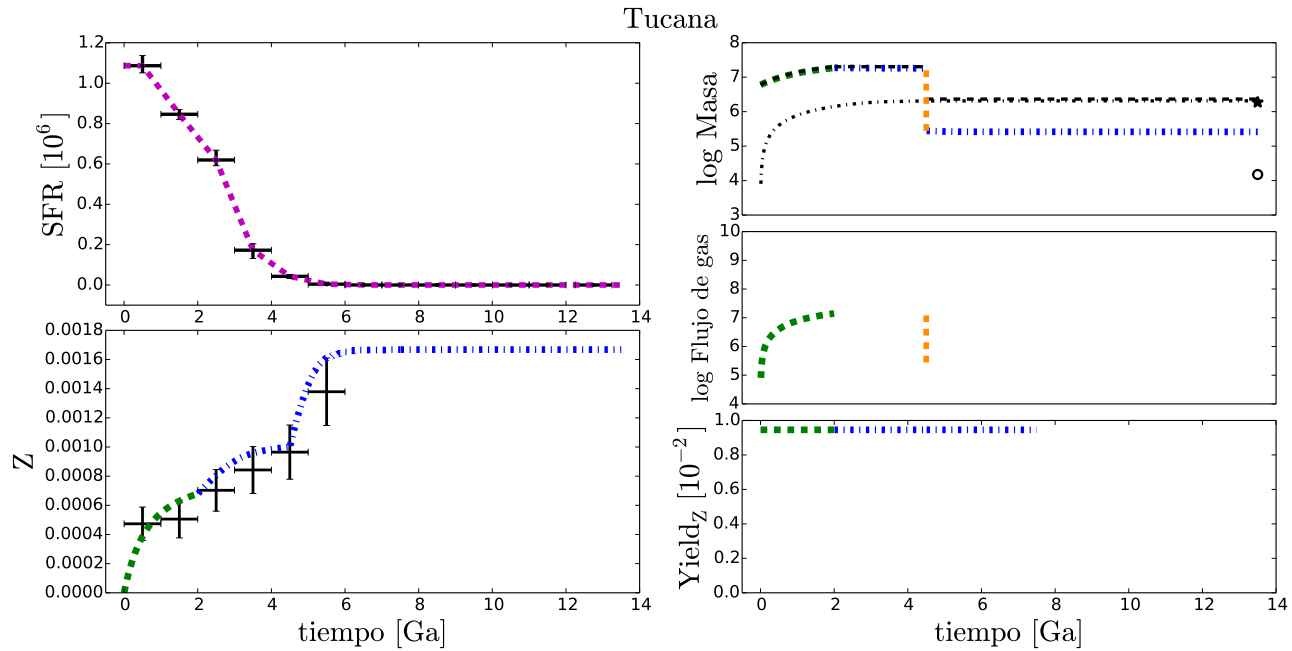


Figura 3.1: TUCANA. MODELO DE DILUCIÓN GASEOSA.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo (línea punteada magenta). **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de masas (M_{\odot}): gaseosa (líneas de colores), bariónica (línea a trazos negra) y estelar (línea a trazos y puntos negra). **Central derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$). **Inferior derecha:** Yield utilizado.

Etapas del modelo: Acreción primigenia (PAM, línea a trazos verde), caja cerrada (CBM, línea a trazos y puntos azul), viento bien mezclado (WWM, línea a trazos naranja), CBM (línea a trazos y puntos azul). **Datos:** Cruces: *SFR* y *Z* por Monelli et al. (2010a), estrella: masa estelar por Monelli et al. (2010a), y circunferencia: masa gaseosa por Oosterloo et al. (1996).

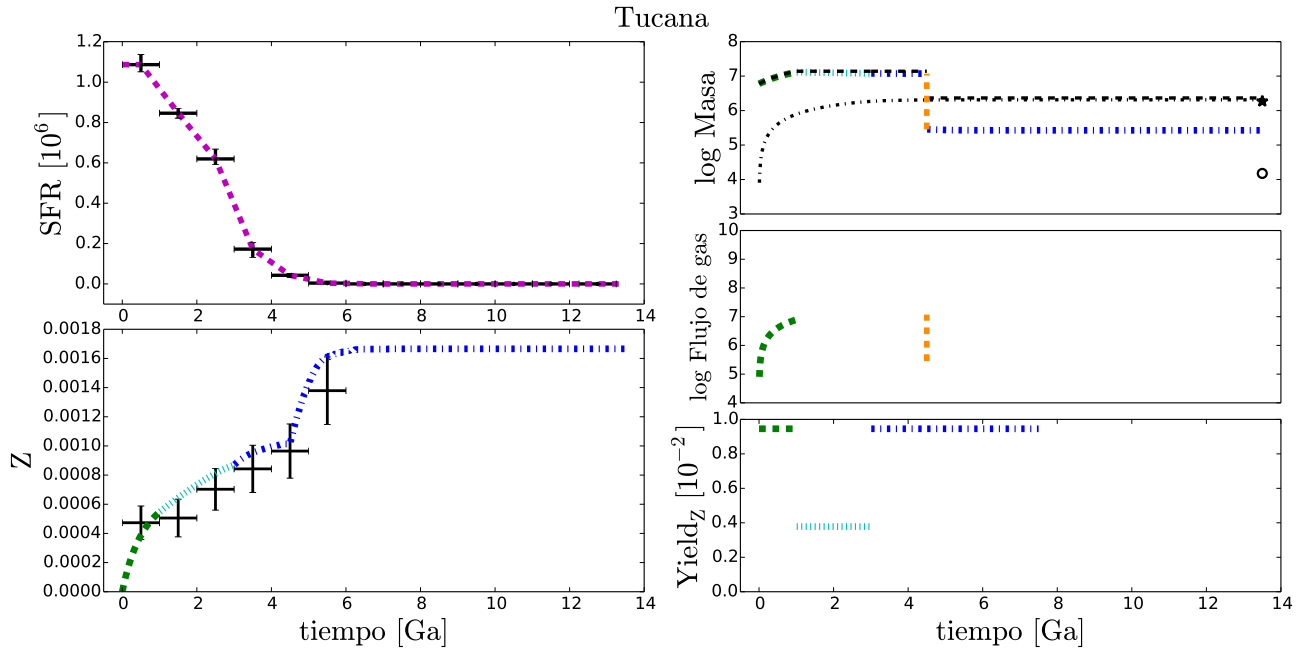


Figura 3.2: TUCANA. MODELO DE PÉRDIDA DE METALES.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo (línea punteada magenta). **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de masas (M_{\odot}): gaseosa (líneas de colores), bariónica (línea a trazos negra) y estelar (línea a trazos y puntos negra). **Central derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$). **Inferior derecha:** Yield utilizado.

Etapas del modelo: Acreción primigenia (PAM, línea a trazos verde), yield reducido (RYM, línea a puntos cian), caja cerrada (CBM, línea a trazos y puntos azul), viento bien mezclado (WWM, línea a trazos naranja), CBM (línea a trazos y puntos azul). **Datos:** Cruces: SFR y Z por Monelli et al. (2010a), estrella: masa estelar por Monelli et al. (2010a), y circunferencia: masa gaseosa por Oosterloo et al. (1996).

3.3. PROLONGACIÓN DEL VIENTO BIEN MEZCLADO

El tiempo cuando sucede el viento bien mezclado fue puesto ad hoc para explicar el aumento en la metalicidad con una tasa de formación estelar tan pequeña, específicamente para $4.5 < t(\text{Ga}) < 6$. Esto sólo es posible si la M_{gas} de la galaxia es muy baja. También, el viento a ~ 4.5 Ga explica la subsiguiente reducción de la *SFR*, la cual no se recupera, y el bajo valor de la M_{gas} que es 2 órdenes de magnitud menor que el valor de la masa de estrellas.

Un viento como el que suponemos, se produciría cuando la energía térmica del gas supera a la energía gravitacional del mismo. El calentamiento del gas es causado, principalmente, por las supernovas que explotan y los vientos de las estrellas masivas.

En esta tesis no se realizaron los cálculos de las energías, ya que bajo IRA todas las estrellas nacen y mueren instantáneamente y por lo tanto la energía térmica aportada por las supernovas estaría exageradamente sobrestimada. Entonces el viento sucedería muy temprano en la vida de la galaxia, desnudándola de gas e imposibilitando la formación estelar hasta $t \sim 6$ Ga, como lo indica la *SFR* obtenida a partir de los diagramas color-magnitud.

Carigi et al. (2002) construyeron modelos sin IRA para diferentes dSphs (Carina, Ursa Minor, Leo I y Leo II). Basándose, también, en historias de formación estelar determinadas a partir de diagramas color-magnitud, calcularon y compararon tiempo a tiempo las energías térmica y gravitacional. Ellos encontraron que los vientos galácticos en esas dSphs ocurrieron justo antes de que las *SFRs* disminuyeran considerablemente o se anularan. Por tal motivo opinamos que el tiempo cuando sucede el viento, propuesto aquí para Tucana, podría estar justificado en base a los modelos de Carigi et al. (2002).

En los modelos complejos mostrados en la sección 3.2, consideramos que el viento en el cual se pierde un alto porcentaje del gas de la galaxia, ocurre aproximadamente a los 4.5 Ga de la vida de la galaxia, con una duración del orden de 1 Ma. Pero debido a que la pérdida de gas en ambos modelos es muy alta, decidimos realizar modelos donde el viento tenga una duración mayor, del orden de 1 Ga.

Probamos con vientos que iniciaban en 4.5 Ga y terminaban en 5.5 Ga. En este caso, la Z obtenida fue menor que la observada $\sim 0.733 Z_{obs}(5.5Ga)$, ya que con la baja SFR presentada en ese lapso no era posible incrementar Z de manera drástica. Después probamos con vientos más prolongados, de 1.5 Ga de duración iniciando en 4.5 Ga, pero por la misma razón no fue posible reproducir el incremento de la metalicidad observada.

Luego de otras pruebas, encontramos que con un viento prolongado entre 4 Ga y 5 Ga, podíamos reproducir los valores de Z en ese lapso, tanto en el modelo de dilución gaseosa, como en el de pérdida de metales.

En la Figura 3.3 mostramos una versión del modelo de dilución gaseosa, al cual sólo hemos prolongado en 1 Ga la duración del viento e iniciando en 4 Ga.

En resumen, este modelo ajusta las observaciones de la metalicidad de la galaxia y tiene las mismas características del modelo de dilución gaseosa con la diferencia de la duración del viento, el cual hemos prolongado a 1Ga de duración e iniciando en 4Ga, aunque tiene dificultades al ajustar la masa de gas actual de la galaxia.

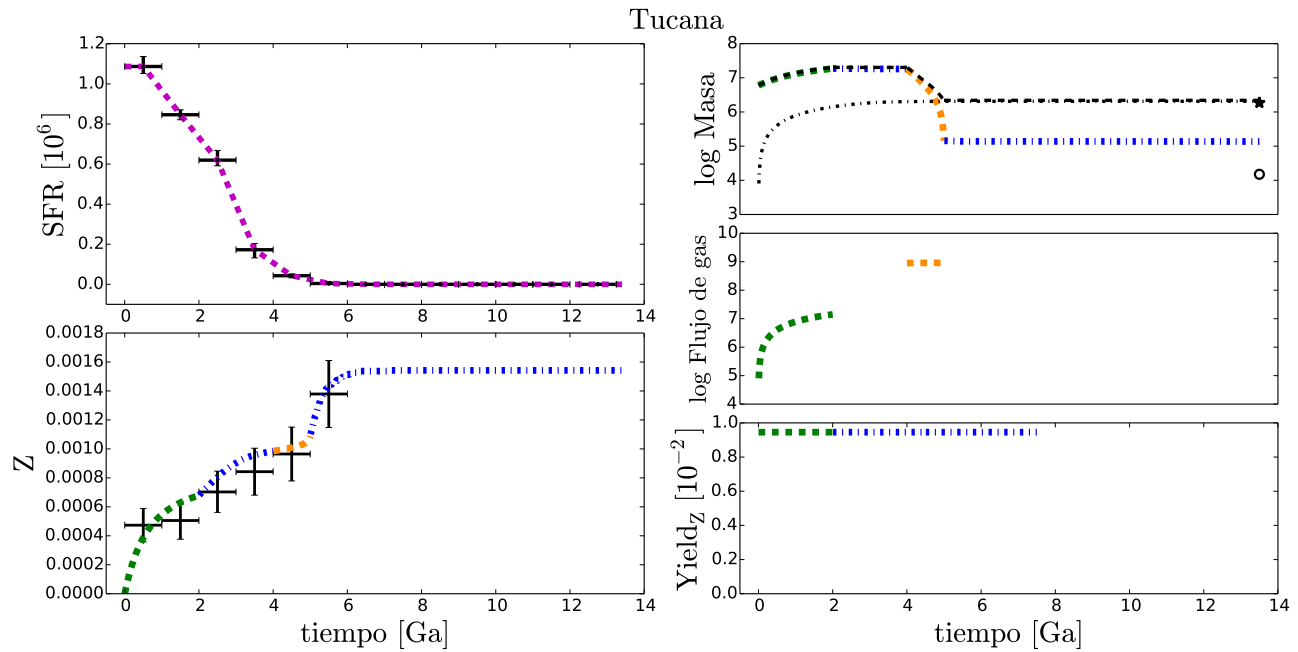


Figura 3.3: TUCANA. MODELO DE DILUCIÓN GASEOSA Y VIENTO PROLONGADO.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo (línea punteada magenta). **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de masas (M_{\odot}): gaseosa (líneas de colores), bariónica (línea a trazos negra) y estelar (línea a trazos y puntos negra). **Central derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$). **Inferior derecha:** Yield utilizado.

Etapas del modelo: Acreción primigenia (PAM, línea a trazos verde), caja cerrada (CBM, línea a trazos y puntos azul), viento bien mezclado (WWM, línea a trazos naranja), CBM (línea a trazos y puntos azul). **Datos:** Cruces: *SFR* y *Z* por Monelli et al. (2010a), estrella: masa estelar por Monelli et al. (2010a), y circunferencia: masa gaseosa por Oosterloo et al. (1996).

3.4. REPRODUCIENDO LA MASA DE GAS ACTUAL

Los modelos complejos descritos anteriormente no reproducen la M_{gas} actual, específicamente, la masa gaseosa teórica es ~ 1.7 órdenes de magnitud mayor que la observada. A pesar de ello, consideramos que esos son nuestros mejores modelos, ya que el valor observado de la M_{gas} podría considerarse poco confiable. Ese valor fue determinado hace 18 años y no se cuenta con datos más recientes. Sin embargo, esperando que en el futuro mejoren las observaciones de la M_{gas} de Tucana, obtuvimos modelos suponiendo que la masa de gas actual es $1.5 \times 10^4 M_{\odot}$ (Oosterloo et al. 1996).

Con el objetivo de reducir la $M_{gas}(13.5Ga)$, obtenida por los modelos presentados en las secciones anteriores, se supuso una pérdida mayor de gas ($\sim 1.8\%$ más) durante el viento bien mezclado, viento centrado en 4.5 Ga y de 1 Ma o de 1 Ga de duración. Al quedarse la galaxia con menor cantidad de gas, pero con el mismo número de estrellas contaminando (idéntica SFR), la metalicidad aumentó drásticamente, hasta valores ~ 5.622 veces mayor que la observada. A fin de reproducir la metalicidad en la última generación de estrellas (entre 4.5 y 6.0 Ga), inferimos un yield del 10% de su valor original. Debido a que la SFR es muy baja durante esos 1.5 Ga, pensamos que esta reducción se debe a efectos estocásticos en la IMF .

En la figura 3.4 mostramos el modelo de dilución gaseosa que reproduce la M_{gas} actual e inferimos la reducción del yield a partir de $t = 4.5Ga$.

También se logró reproducir la M_{gas} actual en el modelo de pérdida de metales, obteniendo aproximadamente el mismo porcentaje de pérdida de gas (99.7%) durante el viento bien mezclado y el mismo factor de reducción del yield.

A pesar de que Tucana es una galaxia aislada, no podemos descartar la posibilidad de que el gas también ha podido perderse por alguna interacción con otros sistemas estelares de mayor masa (Mayer et al. 2001) en épocas más tardías, luego de la parada de la formación estelar.

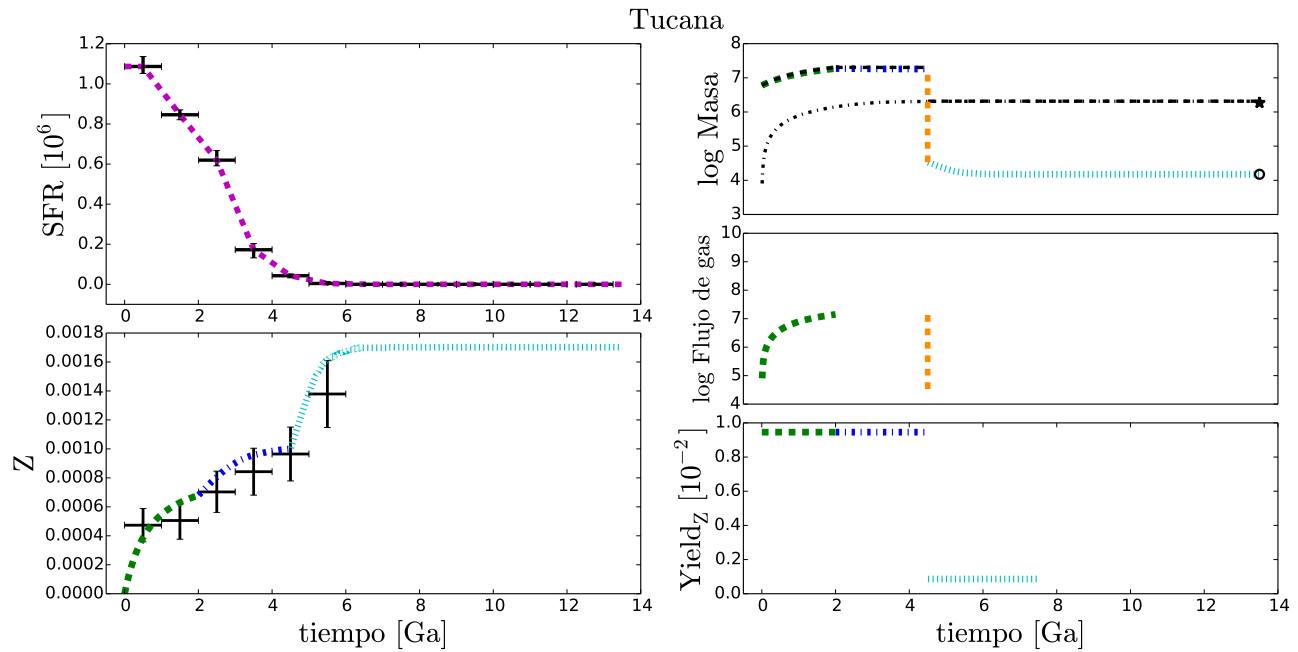


Figura 3.4: TUCANA. MODELO DE DILUCIÓN GASEOSA Y REDUCCIÓN DEL YIELD.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo (línea punteada magenta). **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de masas (M_{\odot}): gaseosa (líneas de colores), bariónica (línea a trazos negra) y estelar (línea a trazos y puntos negra). **Central derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$). **Inferior derecha:** Yield utilizado.

Etapas del modelo: Acreción primigenia (PAM, línea a trazos verde), caja cerrada (CBM, línea a trazos y puntos azul), viento bien mezclado (WWM, línea a trazos naranja), yield reducido (RYM, línea a puntos cian). **Datos:** Cruces: *SFR* y *Z* por Monelli et al. (2010a), estrella: masa estelar por Monelli et al. (2010a), y circunferencia: masa gaseosa por Oosterloo et al. (1996).

Capítulo 4

HISTORIAS QUÍMICAS PARA CETUS

Cetus es una galaxia enana esferoidal del Grupo Local, localizada a más de 650 kpc tanto de la Vía Láctea como de M31.

Toda vez que se ha encontrado un modelo adecuado para la dSph Tucana, y analizando las similitudes en M_{din} , M_{gas} actual, SFR y la historia química entre Cetus y Tucana; decidimos implementar modelos de evolución química para Cetus, similares a nuestros mejores modelos de Tucana.

4.1. MODELOS COMPLEJOS

De acuerdo a las restricciones observacionales de Cetus (Ver tabla 4.1), obtuvimos dos modelos análogos que se diferencian a los de Tucana en algunos de sus parámetros. Los dos modelos complejos más exitosos propuesto para Cetus se muestran a continuación.

Cuadro 4.1: Datos observacionales ^a.

	<i>Cetus</i>
$M_{gas}(10^4 M_{\odot})$	–
$M_{*}(10^6 M_{\odot})$	1.34
$M_{din}(10^7 M_{\odot})$	6
$Z_{obs}(5.5Ga)$	0.00108 ± 0.00019

(a) Monelli et al (2010b).

4.1.1. Modelo de Dilución Gaseosa

Este modelo supone:

1. Fracción bariónica inicial de 0.10.
2. Acreción primigenia (PAM) durante los primeros 2 Ga con una eficiencia de acreción igual a 16.
3. Caja cerrada (CBM) de 2 Ga a 4.5 Ga.
4. Un viento bien mezclado (WWM) a 4.5 Ga.
5. Caja cerrada (CBM) de 4.5 Ga a 13.5 Ga.

Durante los primeros 2 Ga la galaxia tuvo acreción primigenia, con una eficiencia de acreción $a = 16$, distinta a la de Tucana debido a que las tasas de formación estelar de las galaxias durante este periodo son diferentes ($SFR_{Tucana} \sim 1.8 SFR_{Cetus}$). Continuó de 2 a 4.5 Ga con su formación estelar con menor intensidad incrementando la metalicidad como en Monelli et al. (2010b). Ver figura 4.1.

Las estrellas masivas al morir y estallar como supernovas calentaron el gas de $t=0$ a $t=4.5$ Ga. Durante ese lapso la energía térmica del medio interestelar fue aumentando y a $t=4.5$ Ga superó la energía gravitacional produciendo un viento galáctico bien mezclado. A través de este viento se perdió al medio intergaláctico el 98.4 % del gas de la galaxia. Con el restante 1.6 % del gas se produjo la última generación estelar con $Z \sim 0.0012$, obteniendo $M_{gas}(13.5 Ga) = 2.64 \times 10^5 M_{\odot}$.

4.1.2. Modelo de Pérdida de Metales

Este modelo supone:

1. Fracción bariónica inicial de 0.10.
 2. Acreción primigenia (PAM) durante el primer Ga con una eficiencia de acreción igual a 16.
 3. Yield reducido (RYM) de 1 Ga a 3 Ga, con un yield igual al 33 % del original o equivalentemente una pérdida del 67 % de los metales.
 4. Caja cerrada (CBM) de 3 Ga a 4.5 Ga.
-

5. Un viento bien mezclado (WWM) a 4.5 Ga.
6. Caja cerrada (CBM) de 4.5 Ga a 13.5 Ga.

La evolución de la galaxia en este modelo es similar a la de Tucana en la sección 3.2.2. Teniendo una pérdida de gas a 4.5 Ga durante el viento bien mezclado del 97.5 % y obteniendo una $M_{gas}(13.5\text{Ga}) = 2.6 \times 10^5 M_{\odot}$ (ver figura 4.2).

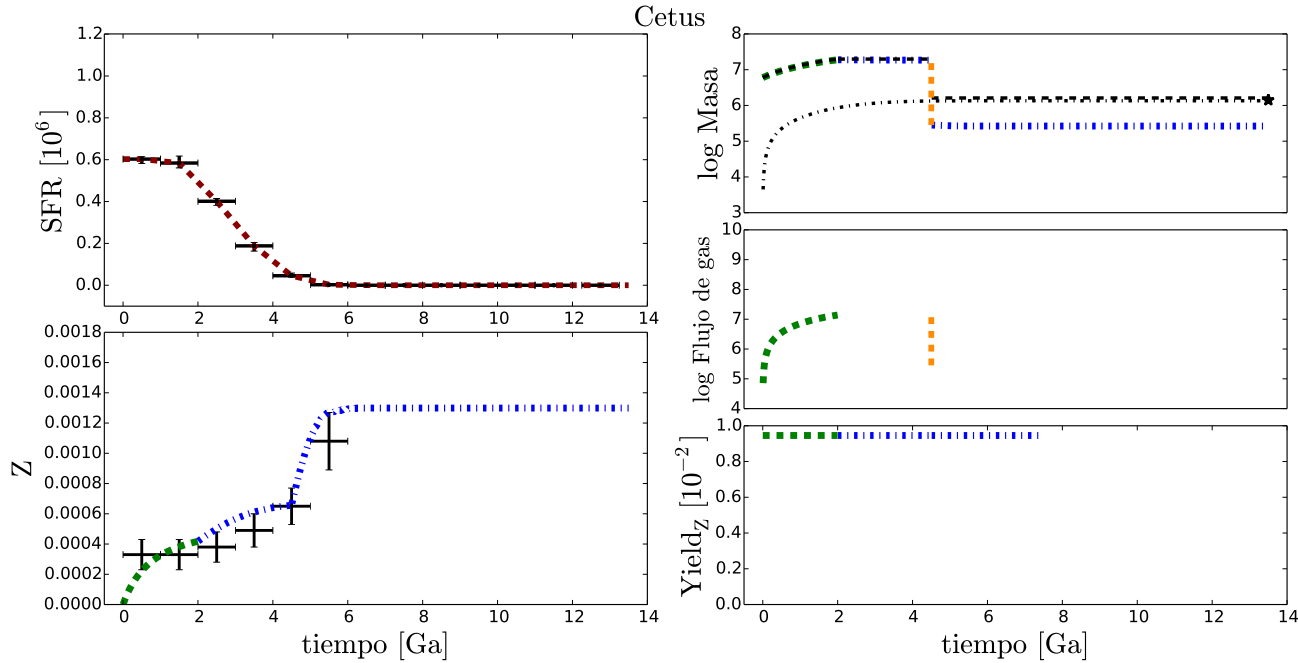


Figura 4.1: CETUS. MODELO DE DILUCIÓN GASEOSA.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo (línea punteada magenta). **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de masas (M_{\odot}): gaseosa (líneas de colores), bariónica (línea a trazos negra) y estelar (línea a trazos y puntos negra). **Central derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$). **Inferior derecha:** Yield utilizado.

Etapas del modelo: Acreción primigenia (PAM, línea a trazos verde), caja cerrada (CBM, línea a trazos y puntos azul), viento bien mezclado (WWM, línea a trazos naranja), CBM (línea a trazos y puntos azul). **Datos:** Cruces: SFR y Z por Monelli et al. (2010b) y estrella: masa estelar por Monelli et al. (2010b)

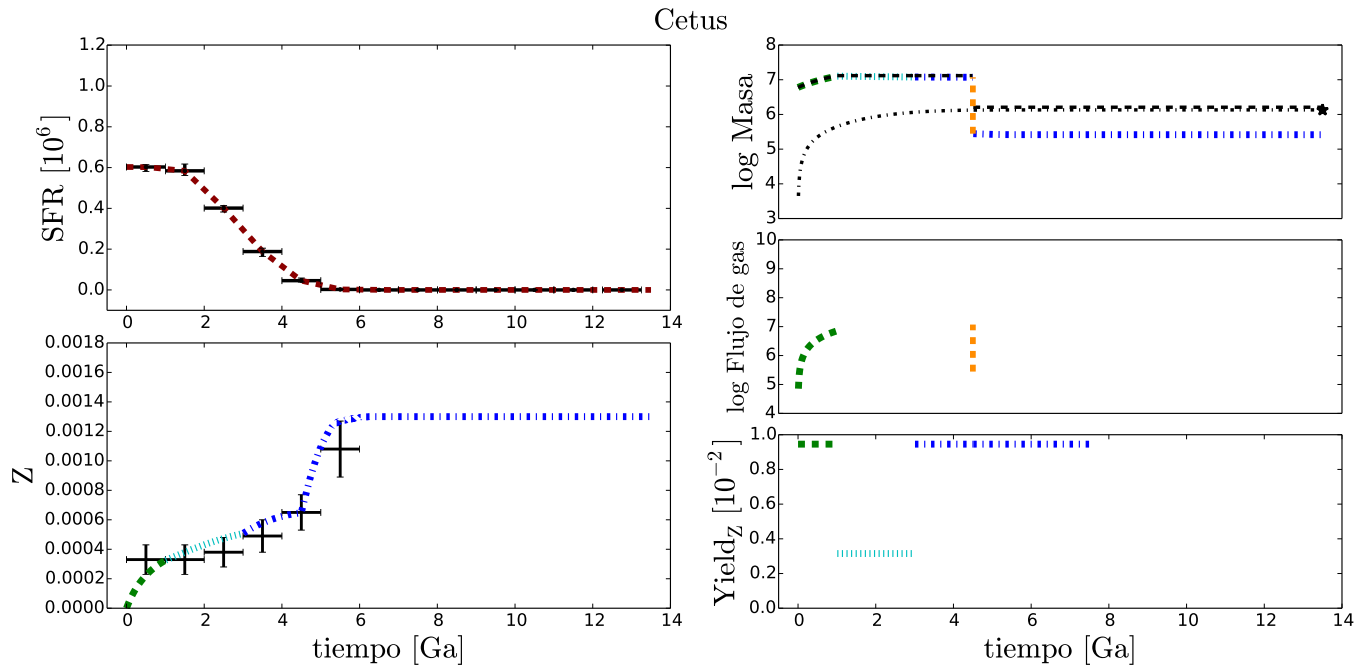


Figura 4.2: CETUS. MODELO DE PÉRDIDA DE METALES.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo (línea punteada magenta). **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de masas (M_{\odot}): gaseosa (líneas de colores), bariónica (línea a trazos negra) y estelar (línea a trazos y puntos negra). **Central derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$). **Inferior derecha:** Yield utilizado.

Etapas del modelo: Acricción primigenia (PAM, línea a trazos verde), yield reducido (RYM, línea a puntos cian), caja cerrada (CBM, línea a trazos y puntos azul), viento bien mezclado (WWM, línea a puntos naranja), CBM (línea a trazos y puntos azul). **Datos:** Cruces: SFR y Z por Monelli et al. (2010b) y estrella: masa estelar por Monelli et al. (2010b).

4.2. PROLONGACIÓN DEL VIENTO BIEN MEZCLADO

Debido a las similitudes antes mencionadas entre Tucana y Cetus, realizamos un modelo prolongando el viento bien mezclado centrado en 4.5 Ga para Cetus, de la misma manera que en Tucana. Mostramos en la figura 4.3 el modelo de dilución gaseosa pero con un viento de 1 Ga de duración entre 4 Ga y 5Ga.

4.3. INFIRIENDO LA MASA DE GAS

A diferencia de Tucana, para Cetus no hay datos del valor de la M_{gas} actual en la literatura. Por lo tanto decidimos inferir este valor, suponiendo que ambas galaxias evolucionaron de manera similar a $t > 4.5\text{Ga}$.

Dadas las similitudes entre ambas galaxias implementamos para Cetus (ver figura 4.3) un modelo similar al de dilución gaseosa de Tucana como el de la sección 3.4. Con un yield igual al de Tucana (10 % del yield original) para $t > 4.5\text{Ga}$, y ajustando la masa de gas perdida durante el viento galáctico para reproducir $Z_{Obs}(5.5\text{Ga})$, infiriendo así para Cetus una $M_{gas}(13.5\text{Ga}) = 1.73 \times 10^4 M_{\odot}$.

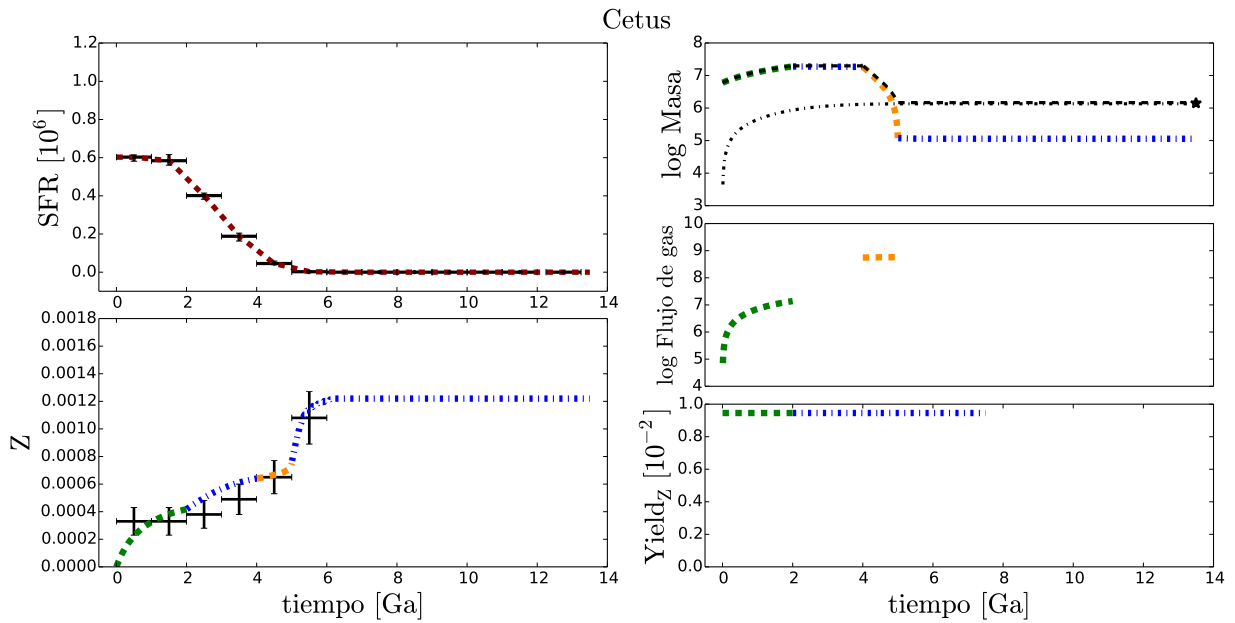


Figura 4.3: CETUS. MODELO DE DILUCIÓN GASEOSA Y VIENTO PROLONGADO.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo (línea punteada magenta). **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de masas (M_{\odot}): gaseosa (líneas de colores), bariónica (línea a trazos negra) y estelar (línea a trazos y puntos negra). **Central derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$). **Inferior derecha:** Yield utilizado..

Etapas del modelo: Acricción primigenia (PAM, línea a trazos verde), caja cerrada (CBM, línea a trazos y puntos azul), viento bien mezclado (WWM, línea a puntos naranja), CBM (línea a trazos y puntos azul). **Datos:** Cruces: SFR y Z por Monelli et al. (2010b) y estrella: masa estelar por Monelli et al. (2010b)

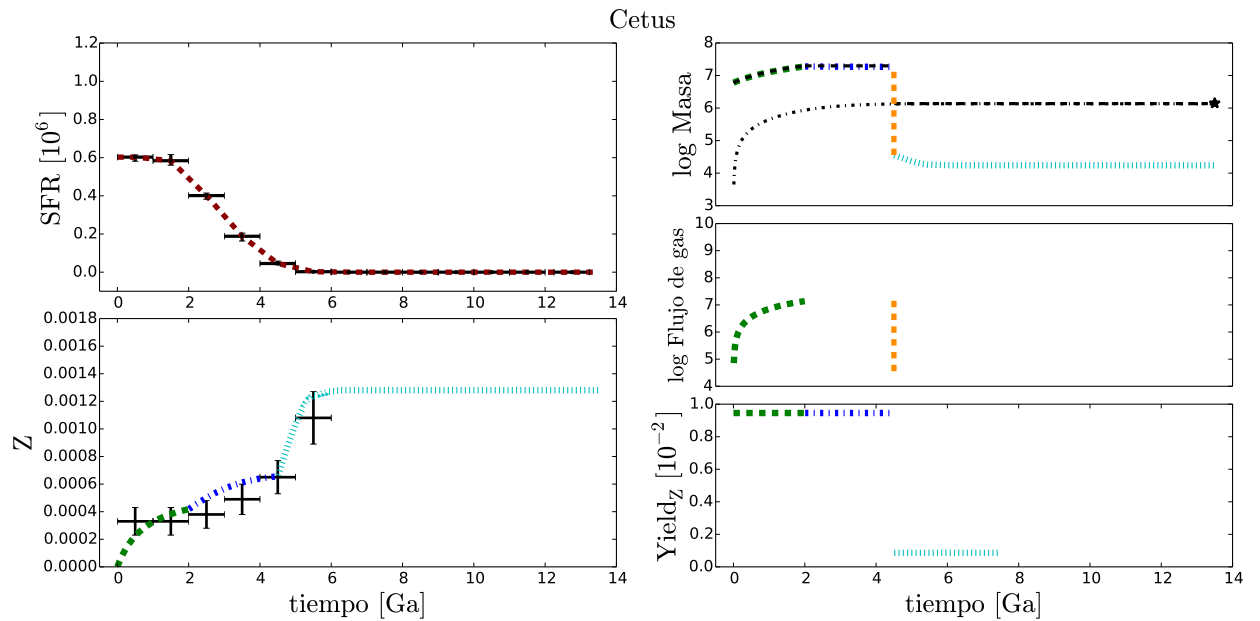


Figura 4.4: CETUS. MODELO DE DILUCIÓN GASEOSA Y REDUCCIÓN DEL YIELD.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo (línea punteada magenta). **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de masas (M_{\odot}): gaseosa (líneas de colores), bariónica (línea a trazos negra) y estelar (línea a trazos y puntos negra). **Central derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$). **Inferior derecha:** Yield utilizado.

Etapas del modelo: Acrición primigenia (PAM, línea a trazos verde), caja cerrada (CBM, línea a trazos y puntos azul), viento bien mezclado (WWM, línea a puntos naranja), CBM (línea a trazos y puntos azul, yield reducido (RYM, línea a puntos cian). **Datos:** Cruces: *SFR* y *Z* por Monelli et al. (2010b) y estrella: masa estelar por Monelli et al. (2010b).

Capítulo 5

DISCUSIÓN

Debido a las similitudes entre las galaxias estudiadas en esta tesis, Tucana y Cetus, centraremos nuestra discusión en la comparación entre ellas.

Las dos galaxias muestran diversas similitudes (ver Tabla 5.1): ambas son galaxias dSphs con la misma M_{din} y actualmente cuentan con una M_{gas} muy pequeña, del orden de $10^4 M_{\odot}$, ~ 2 órdenes de magnitud menor que la M_* . Asimismo la evolución de la tasa de formación estelar y la metalicidad son casi idénticas a $t > 3$ Ga, pero a $t < 3$ Ga la SFR de Tucana es mayor que la de Cetus, particularmente en el máximo la $SFR_{Tucana} \sim 1.8 SFR_{Cetus}$; esta diferencia se ve reflejada en los valores de la metalicidad de cada galaxia (Ver figuras 5.1 y 5.2).

A pesar de la diferencia en la SFR en los primeros 3Ga encontramos, a partir de modelos de evolución química, enormes similitudes en la evolución de la M_{gas} y de los flujos de gas, las cuales se pueden observar en las figuras 5.1 y 5.2. En estas figuras presentamos nuestros mejores modelos para ambas galaxias, los modelos de dilución gaseosa y de pérdida de metales. Estos modelos son nuestra mejor propuesta para explicar la Z constante cuando la SFR es máxima.

Para apreciar las similitudes entre ambas galaxias, hemos eliminado la evolución de las masas estelar y bariónica y los datos observacionales del formato de figuras usado en los capítulos 3 y 4.

En la figura 5.1 notamos que la evolución de las masas y flujos de gas en las galaxias son casi idénticas, pero existen diferencias mínimas. En particular en el modelo de dilución gaseosa, a 2 Ga la M_{gas} de Cetus es $\sim 1.2\%$ mayor que la de Tucana y el flujo de gas de Tucana es $\sim 2.2\%$ mayor que el de Cetus.

En la figura 5.2 observamos que también las masas y flujos de gas de las galaxias son casi idénticas y que existen diferencias mínimas, particularmente en este modelo, de pérdida de metales a 1Ga la M_{gas} de Tucana es $\sim 2.9\%$ mayor que la de Cetus y el flujo de gas de Tucana es $\sim 9\%$ mayor que el de Cetus.

Notamos además en la figura 5.1 que los yields son idénticos para ambas galaxias, no así en la figura 5.2 donde el yield usado en Tucana es mayor que en Cetus, específicamente $0.4Y_Z^{original}$ para Tucana y $0.3Y_Z^{original}$ para Cetus. Es importante recordar que el modelo de dilución gaseosa (figura 5.1) no supone vientos selectivos ni efectos estocásticos, por lo que no fue necesario reducir el yield en ninguna de las galaxias. Pero el modelo de pérdida de metales (figura 5.2) a $1\text{Ga} < t < 3\text{Ga}$ supone un viento selectivo en el cual fue necesario reducir el yield en las ambas galaxias (Ver tabla 5.2).

Consideramos relevante que con la misma $M_{gas}(0)$ en ambas galaxias, fuimos capaces de reproducir las historias de metalicidad de cada galaxia, a pesar de que estas galaxias tienen diferente SFR . Es conocido que la SFR depende de la masa de gas, además de otros factores como perturbaciones, presión del gas, feedback, entre otros (Leroy et al. 2008; Zamora-Avilés & Vázquez-Semadeni 2014). Si la SFR de estas galaxias dependiera únicamente de la $M_{gas}(0)$, la $M_{gas}(0)$ de Cetus debería ser menor que la de Tucana.

Si suponemos, en Cetus, una $M_{gas}(0)$ escalada a su SFR , la metalicidad predicha por los modelos de evolución química sería superior a la observada. Por lo tanto, la $SFR(t)$ y $Z(t)$, nos está indicando que Cetus tuvo una mayor $M_{gas}(0)$ en relación a los valores de la SFR y semejante a la de Tucana.

Es importante señalar que con nuestro modelo de evolución química y usando las restricciones de los observables impuestos por la SFR y Z , pudimos estimar aproximadamente la M_{gas} actual de Cetus.

En resumen, encontramos que ambas galaxias experimentaron acreción primigenia o vientos selectivos durante los primeros 4Ga para explicar la metalicidad baja y constante cuando la tasa de formación es alta, además tuvieron vientos galácticos, centrados en 4Ga, lo que explicaría el drástico incremento en la metalicidad cuando sucede el viento, así como la baja masa de gas que presentan estas galaxias actualmente.

Para determinar con precisión los tiempos a los cuales ocurre el viento y su duración se requieren modelos hidrodinámicos sin IRA, así como observaciones de la masa de gas actual de las galaxias y cocientes de abundancias para determinar si existieron efectos estocásticos en la formación de estrellas masivas.

Actualmente se cuenta con información de la *SFR* en función del radio Hidalgo et al. (2013) para ambas galaxias, lo que podría ayudar a darnos cuenta si existieron procesos internos que afectaron la evolución de estas galaxias.

Cuadro 5.1: Datos observacionales de Tucana y Cetus.

	<i>Tucana</i>	<i>Cetus</i>
$M_{din} (10^7 M_{\odot})$	6^a	6^b
$M_* (10^6 M_{\odot})$	1.86 ± 0.01^a	1.34 ± 0.03^b
$M_{gas}(13.5Ga) (10^4 M_{\odot})$	1.5^c	--

Filas 1, 2 y 3: Masas dinámica, estelar y gaseosa.

(a) Monelli et al. (2010a).

(b) Monelli et al. (2010b).

(c) Oosterloo et al. (1996).

Cuadro 5.2: Resultados de nuestros mejores modelos de Tucana y Cetus.

	<i>Tucana</i>	<i>Cetus</i>
Modelo de dilución gaseosa		
$M_{gas}(0)$ ($10^6 M_{\odot}$)	6	6
t_{viento} (Ga)	4.5 ± 1.0	4.5 ± 1.0
$\%M_{gas}$ perdido	98.5	98.4
$Y_Z/Y_Z^{original}$	1.00	1.00
Modelo de pérdida de metales		
$M_{gas}(0)$ ($10^6 M_{\odot}$)	6	6
t_{viento} (Ga)	4.5 ± 1.0	4.5 ± 1.0
$\%M_{gas}$ perdido	97.6	97.5
$Y_Z/Y_Z^{original}$	0.40	0.33

Filas 1, 2, 3 y 4 para cada modelo: Masa de gas inicial, tiempo cuando ocurre el viento galáctico, porcentaje de M_{gas} perdido durante el viento galáctico y cociente entre el yield utilizado y el yield original.

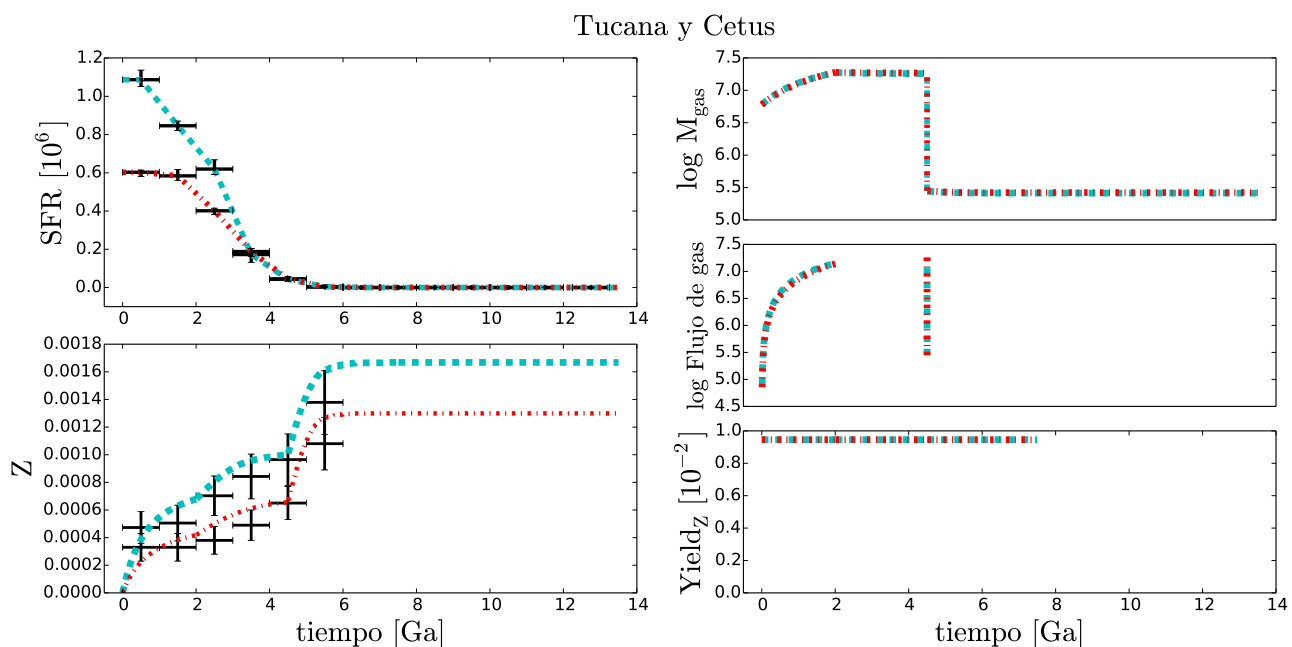


Figura 5.1: TUCANA Y CETUS. MODELO DE DILUCIÓN GASEOSA.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot} \text{Ga}^{-1}$) considerada en el modelo. **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de la masa gaseosa (M_{\odot}). **Inferior derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot} \text{Ga}^{-1}$).

Líneas: Tucana (a trazos cian) y Cetus (a trazos y puntos roja). **Datos:** Cruces: *SFR* y *Z* por Monelli et al. (2010).

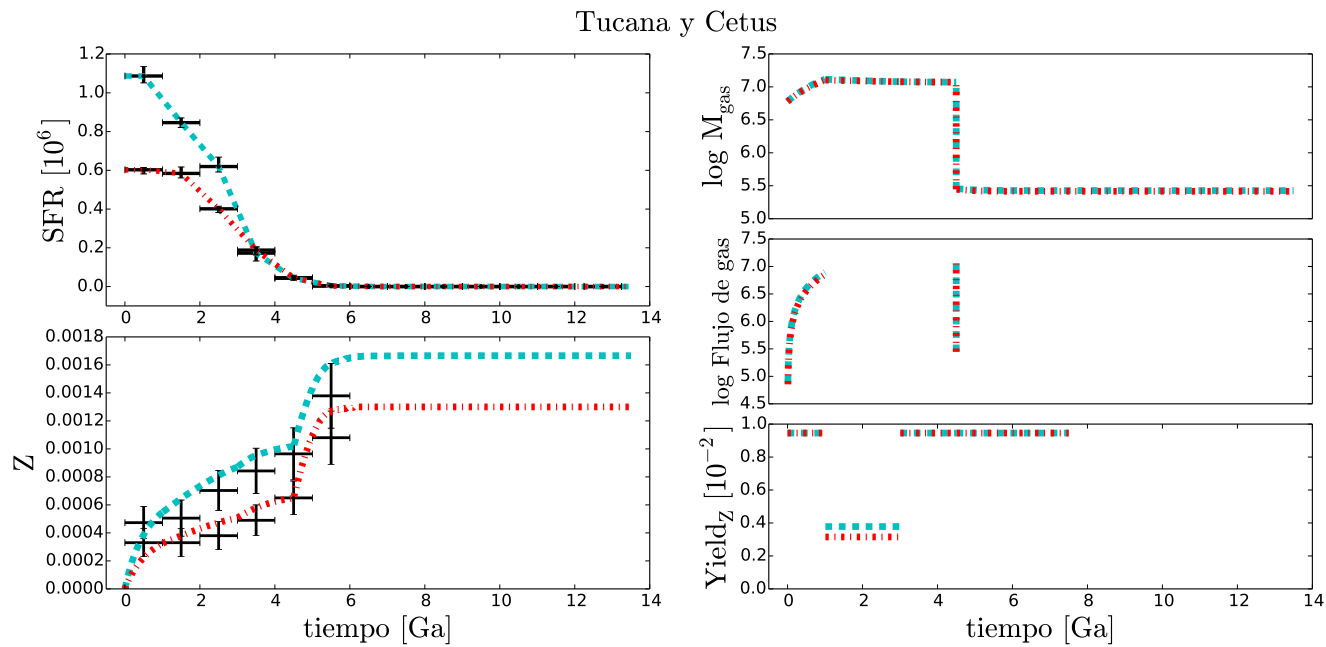


Figura 5.2: TUCANA Y CETUS. MODELO DE PÉRDIDA DE METALES.

Superior izquierda: Evolución de la tasa de formación estelar global ($M_{\odot}Ga^{-1}$) considerada en el modelo. **Inferior izquierda:** Evolución de la metalicidad. **Superior derecha:** Evolución de la masa gaseosa (M_{\odot}). **Inferior derecha:** Evolución de los flujos de gas ($M_{\odot}Ga^{-1}$).

Líneas: Tucana (a trazos cian) y Cetus (a trazos y puntos roja). **Datos:** Cruces: *SFR* y *Z* por Monelli et al. (2010).

Capítulo 6

CONCLUSIONES

Basándonos en los modelos de evolución química que consideran la tasa de formación estelar y la historia de metalicidad, ambas obtenidas de diagramas color-magnitud, hemos llegado a las siguientes conclusiones sobre las enanas esferoidales Tucana y Cetus:

1. Las galaxias han tenido una evolución compleja, con diferentes etapas evolutivas que van desde la acreción hasta vientos bien mezclados.
2. Ambas galaxias se formaron en el primer Ga por un evento de acreción de gas primigenio.
3. Durante los primeros 4 Ga estas galaxias experimentaron acreción y/o vientos selectivos, lo que diluyó el gas y/o generó una pérdida de metales. Esto explicaría la metalicidad baja y constante observada en los primeros 4Ga, cuando las galaxias presentan los valores máximos de la tasa de formación estelar.
4. Las galaxias tuvieron un viento galáctico bien mezclado centrado en 4.5 Ga de entre 1Ma a 1Ga de duración, a través del cual perdieron la mayor parte de su gas (~98 %). Para determinar con precisión la duración y el tiempo cuando sucede el viento galáctico, se necesitan modelos químicos hidrodinámicos sin reciclaje instantáneo capaces de calcular con detalle la energética del gas.
5. Después del viento bien mezclado ($t > 4.5$ Ga), la tasa de formación estelar disminuyó y el gas restante permaneció en las galaxias hasta el día de hoy (Caja cerrada, CBM).

6. Entre 4.5 Ga y 7.5 Ga la tasa de formación estelar es muy baja. Si la masa de gas actual es del orden de $10^4 M_{\odot}$ o menor, en este lapso pudieron darse efectos estocásticos de la función inicial de masa, lo que implica formación de pocas estrellas masivas. Se necesitan observaciones de la masa de gas actual para determinar si existen efectos estocásticos en la formación de estrellas masivas.
 7. Las historias químicas inferidas para ambas galaxias son prácticamente iguales a pesar de que en el máximo la $SFR_{Tucana} \sim 1.8 SFR_{Cetus}$.
 8. Suponiendo que ambas galaxias evolucionaron de manera similar, inferimos que la M_{gas} actual de Cetus es del orden de $10^4 M_{\odot}$.
 9. La masa de gas inicial de ambas galaxias debieron ser semejantes, aunque sus historias de formación estelar son diferentes, para que las poblaciones estelares se hayan formado con la metalicidad observada.
-

Bibliografía

- Carigi, L., & Hernández, X., 2008, MNRAS, 390, 582.
- Carigi, L., Hernández, X., Gilmore, G., 2002, MNRAS, 334, 117.
- González-Samaniego, A., Colín, P., Avila-Reese, V., et al., 2014, ApJ, enviado, arXiv:1308.4753.
- Hernández-Martínez, L., Carigi, L., Peña, M., & Peimbert, M., 2011, A&A, 535, 118.
- Hidalgo, S. L., Monelli, M., Aparicio, A., et al., 2013, ApJ, 778, 103.
- Kroupa, P., Tout, C. A., & Gilmore, G., 1993, MNRAS, 262, 545.
- Leroy, A. K., Walter, F., Brinks, E., et al., 2008, AJ, 136, 2782.
- Matteucci, F., 2001, Astrophysics and Space Science Library, The Chemical Evolution of the Galaxy, 253, 293.
- Mayer, L., Governato, F., Colpi, M., et al., 2001, ApJ, 547, L123.
- McConnachie, A. W., 2012, AJ, 144, 4.
- Mc Low, M.-M., & Ferrara, A., 1999, ApJ, 513, 142.
- Monelli, M., Gallart, C., Hidalgo, S. L., et al., 2010a, ApJ, 722, 1864.
- Monelli, M., Hidalgo, S. L., Stetson, P. B., et al., 2010b, ApJ, 720, 1225.
- Oosterloo, T., Da Costa, G. S., & Staveley-Smith, L., 1996, AJ, 112, 1969.
- Rodríguez-González, A., Esquivel, A., Raga, A. C., & Colín, P., 2011, RMxAA, 47, 113.

Romano, D., & Starkeburg, E., 2013, MNRAS, 434, 471.

Tinsley, B., 1980, Fundam. Cosmic Phys., 5, 287.

Zamora-Avilés, M., & Vázquez-Semadeni, E., 2014, ApJ, enviado, arXiv:1308.4918.

