



Máster Universitario en Astronomía y Astrofísica
Universidad Internacional de Valencia
Trabajo de Fin de Máster

Relación de las Abundancias de N/O con la Tasa de Formación Estelar SFR en los Modelos de Evolución Química

Curso Académico 2016-2017
2ª Convocatoria: del 23 al 28 de noviembre de 2017

Alumna:

R. Leticia Corral Bustamante
DNI: G04433818 (Pasaporte Estados Unidos Mexicanos)
leticia.corral@cimav.edu.mx

Directora de Tesis:

Mercedes Mollá Lorente

Co-supervisor de Tutorización:

Miguel Cárdenas Montes

Supervisor interno VIU:

Vicent Martínez Badenes

Diciembre de 2017

Índice

Resumen	2
1. Introducción	3
1.1 Objetivo	7
2. Modelos de evolución química	8
2.1 El modelo estándar (STD) de Mollá et al. (2017)	11
2.2 El modelo modificado (MOD) de Mollá et al. (2017)	11
3. Descripción de CALIFA	12
3.1 Distribuciones radiales de galaxias de CALIFA	16
4. Modelos estadísticos	23
5. Descripción de datos	24
6. Resultados y discusión	26
7. Conclusiones	47
8. Agradecimientos	48
Referencias	49
Anexo 1: Programa en código Python	52
Anexo 2: Tablas	58

Resumen

1. Introducción

La evolución química de las galaxias involucra procesos de formación de estrellas en las cuales se sintetizan los elementos químicos a partir de la nucleosíntesis. Este proceso de nucleosíntesis inicia en los primeros tres minutos del surgimiento del Universo en el Big Bang. Durante esta etapa, se producen las abundancias de ^1H , ^2H , ^3He y ^4He , y pequeñas trazas de ^7Li en un estado de plasma que se enfrió al estado de átomos neutros mucho tiempo después (Burbidge et al. (1957)).

El inicio de la formación de estrellas y galaxias en el universo es un tema controvertido aún en la actualidad y existen teorías sobre su origen que toman en cuenta las condiciones prevalecientes después del Big Bang (~13.8 billones de años). Inicia la evolución estelar con la nucleosíntesis estelar que tiene intrínsecos los procesos de fusión nuclear a partir del H y el He y la consecuente generación de varios elementos ligeros y medianos y de algunos elementos pesados.

Del paradigma de ΛCDM , se predice que las primeras estrellas, la Población III (Pop III), se formaron en corrimientos al rojo $z\sim 20-30$. Su aparición transforma el universo en un sistema complejo, debido a la energía y la entrada de elementos pesados de las estrellas del Pop III y los agujeros negros acrecentados (Barkana y Loeb 2001; Bromm y Larson 2004; Ciardi y Ferrara 2005).

Las primeras estrellas formadas en el universo tuvieron una influencia determinante sobre el medio intergaláctico primordial, debido a su radiación y elementos químicos pesados formados en ellas e introducidos al medio intergaláctico mediante explosiones de supernovas. El modelo teórico actual postula que las primeras estrellas fueron predominantemente muy masivas, con alrededor de 100 Masas solares (Bromm (2009)).

Existen procesos astrofísicos responsables de la nucleosíntesis que ocurren en la materia caliente de las estrellas, tal como procesos de fusión nuclear como la quema de hidrógeno o el ciclo CNO (carbono-nitrógeno-oxígeno). Este ciclo es una de las reacciones nucleares de fusión por la cual las estrellas convierten el hidrógeno en helio. A este respecto, en este trabajo se realiza un estudio de la relación de las abundancias del N/O con la tasa de formación estelar (SFR, Stellar Formation Rate, por sus siglas en inglés) mediante la comparación de datos teóricos que arrojan los modelos de evolución química multifase (en adelante MULCHEM: multiphase chemical evolution model por sus siglas en inglés) de Mollá et al. (2017) y los datos observacionales de la Encuesta de

Área de Campo Integral de Legado de Calar Alto (The Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey, CALIFA¹, por sus siglas en inglés), que se avoca a la observación de galaxias en el universo local utilizando noches de observación con el espectrofotómetro de campo integral PMAS / PPAK, montado en el telescopio de Calar Alto de 3.5 m.

Durante el proceso de formación de estrellas, los elementos químicos son eyectados al medio interestelar (ISM, Interstellar Medium, por sus siglas en inglés), de donde se incorporan a las estrellas aumentando la cantidad de metales a través de las sucesivas generaciones.

El modelo MULCHEM es una representación simbólica de fenómenos físicos que ocurren en el Universo, específicamente, son modelos que sirven, entre otros, para determinar las abundancias químicas de elementos tales como: H, D, ³He, ⁴He, ¹²C, ¹³C, ¹⁴N, ¹⁶O, Ne, Mg, Si, Ca, S, Fe y núcleos ricos en neutrones, en todas las regiones radiales de halo y disco de una determinada galaxia, mediante procesos de formación de estrellas en el halo, formación de nubes, colisiones de nubes e interacción de estrellas masivas con nubes en el disco. Este modelo, sirve para reproducir gradientes de abundancia radial en la Vía Láctea (MWG) y demás galaxias del Universo.

Los modelos de evolución química (CEMs, Chemical Evolution Models, por sus siglas en inglés) de Mollá & Díaz (2005) (MD05 en adelante) y el modelo MULCHEM de Mollá et al. (2017), explican, entre otros, la existencia de gradientes radiales de abundancias por efectos combinados de tasa de formación de estrellas (SFR) y caída de gas que varían con el radio galactocéntrico en la mayoría de las galaxias espirales.

Mediante la comparación de datos teóricos que predicen los modelos, en este trabajo se interpretan los datos observacionales de CALIFA con respecto a las distribuciones radiales de abundanciales de N/O y SFR en galaxias en el momento presente, esto permite determinar la posible historia de evolución de las galaxias.

En el capítulo 2 se describen los modelos de evolución química de multifase, MULCHEM, mientras que en el capítulo 3 se da una descripción de CALIFA y los resultados que produce. En el capítulo 4 se describen expresiones estadísticas de las que se hace uso en el presente estudio para el manejo de la base de datos teóricos y experimentales. En el capítulo 5 se describen los datos utilizados en este trabajo. En el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos y la discusión de resultados y, finalmente, el capítulo 7 contiene las conclusiones del presente estudio.

¹ <http://califa.caha.es/>

La correlación obtenida en este trabajo entre la abundancia de N/O y la distancia radial, concuerda con las predicciones de otros autores, tales como Sanchez et al. (2014) para la abundancia de oxígeno y la distancia radial y Pérez Montero et al. (2016) para N/O. El estudio de la relación de N/O con SFR del presente estudio se realizó con los modelos de evolución química (CEMs-MULCHEM) de Mollá y Díaz (2005), Mollá (2014) y, principalmente de Mollá et al. (2017), y con los datos experimentales de CALIFA reportados por Pérez Montero et al. (2016), tomando en cuenta que el oxígeno de la abundancia de N/O en las estrellas de las galaxias significa el mayor representante de su metalicidad total para entender la evolución de las poblaciones estelares a lo largo de la galaxia (Sanchez et al. (2014)).

Del análisis simultáneo de la abundancia de elementos primarios, como el oxígeno, y secundaria, como el nitrógeno de Pérez-Montero et al. (2016), se sabe que existen pistas sobre la historia de formación estelar y los procesos que dan forma a la acumulación de discos espirales, por dichas pistas de la historia de SFR, en el presente trabajo se realiza el estudio de la relación de N/O con SFR.

Se realizó una comparación con los resultados obtenidos para las pendientes -gradientes de N/O y O/H del trabajo realizado por Pérez-Montero et al. (2017) para las mismas galaxias que se estudian aquí, de lo cual se puede concluir que, la pendiente N/O promedio para aquellas galaxias con un gradiente O/H positivo, es negativa; y se encontró que la pendiente de O/H para aquellas galaxias con un N/O negativo es positiva para las galaxias NGC 4470 y NGC 6186 y negativa para las galaxias NGC 0477 y UGC 04461. Estos resultados se pueden deber a la falta de una perfecta correlación entre los gradientes O/H y N/O evidenciada en este estudio y también reportada por Pérez-Montero et al. (2016).

Para la distribución radial de la abundancia de N/O que predicen los modelos con respecto a las observaciones de las galaxias de CALIFA, se obtiene en forma global, un coeficiente de determinación alto, lo que quiere decir que los valores obtenidos por los modelos para N/O son muy cercanos a las líneas de regresión, lo cual es indicativo de que la calidad de los modelos para replicar los datos experimentales es muy buena.

De acuerdo a Mollá et al. (2006), diferentes regiones o galaxias evolucionan de manera diferente en el plano O/H-N/O, mostrando huellas más pronunciadas cuando la región/galaxia que tiene mayores eficiencias muestra pistas evolutivas planas. De los resultados del análisis realizado en este trabajo a este respecto, las huellas más

pronunciadas las presenta la galaxia NGC 6186 en el plano N/O, mientras que la galaxia NGC 4470 muestra la mayor tendencia a pistas evolutivas planas para la abundancia O/H.

Pérez Montero et al. (2016) reporta que el N/O tiende a no ser afectado por procesos relacionados con los efectos hidrodinámicos causados por el intercambio de material (no procesado) entre diferentes partes de las galaxias o incluso con el medio intergaláctico (IGM) circundante, por este motivo, resulta importante la determinación de N/O para calcular gradientes de abundancia química en las galaxias.

De los resultados que indican que las rectas de regresión que mejor ajustan a los datos de galaxias de CALIFA se puede apreciar que existe alta correlación de las abundancias de N/O con la distribución radial, lo cual indica que se están procesando elementos pesados en las estrellas de esas galaxias que corresponden a galaxias con una edad muy similar a la edad del universo (13.299 Gyr) como las estudiadas aquí.

Existe una gran dispersión en las distribuciones radiales de N/O y O/H en todas las galaxias que aquí se reportan. N/O no sigue la tendencia esperada en su relación con O/H en algunas de las galaxias estudiadas. La falta de una perfecta correlación entre gradientes O/H y N/O se debe a que la pendiente N/O promedio para galaxias con un gradiente positivo de O/H es negativa, y se encontró que las galaxias analizadas presentan gradiente N/O negativo.

De Pérez-Montero et al. (2016) se tiene que la relación masa-tasa de formación de estrellas-metalicidad-abundancias de N/O (M-SFR-Z-N/O) observada, permite predecir una cierta correlación entre luminosidad $L(H_{\alpha})$ y O/H (o N/O) para las regiones H II individuales de las galaxias. Esta es una de las razones por la cual en este trabajo se estudia esta correlación, en este caso se estudia la relación N/O-SFR para 2 radios efectivos, $2 \cdot R_e$, de una muestra de 255 galaxias, de las cuales se eligieron NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y NGC6186 con 10 modelos (de un grid de 760 modelos) que mejor ajustan a los datos de CALIFA para cada una para realizar el estudio estadístico de relación entre datos teóricos y experimentales.

De esta manera, en este estudio, se obtienen correlaciones luminosidad-abundancias en galaxias individuales que oscilan entre 0.035 y 0.36 para O/H y de 0.30 y 0.78 para N/O para 2 radios efectivos, $2 \cdot R_e$, de las galaxias, lo cual concuerda con el coeficiente de

determinación, como era de esperarse. Las desviaciones estándar altas entre O/H y SFR que se observan en todos los datos, también eran de esperarse, ya que la diferencia entre sus valores es alta. Autores como Rosales-Ortega et al. (2011) y Sánchez et al. (2012b) y (2014) han observado que una disminución de la Z en las regiones internas de galaxias espirales en el rango radial $0.3-0.5 R_e$ está posiblemente relacionada con un acumulación de gas en anillos, lo que puede hacer que las pendientes resultantes de los gradientes de Z sean más planas, como en algunos casos de las galaxias estudiadas aquí.

1.1 Objetivo del Trabajo

El objetivo del presente trabajo se centra en realizar un programa de cómputo en código Python para hacer uso de datos teóricos generados por modelos MULCHEM de Mollá et al. (2017) y compararlos con los datos experimentales de CALIFA reportados por Pérez-Montero et al. (2016), de las abundancias de N/O y su relación con la SFR de galaxias, bajo la suposición que dichos elementos químicos son eyectados por poblaciones estelares al ISM conforme mueren las estrellas. Con ello se pretende realizar el cálculo de chi cuadrado, χ^2 , de N/O y SFR para determinar los modelos que mejor ajusten a los datos de las galaxias de CALIFA, lo cual se debe realizar a partir de una interpolación previa de distribución radial de abundancias de N/O y SFR. Los resultados obtenidos deben ser capaces de dar pistas sobre la posible evolución de las galaxias en el universo.

2. Modelos de Evolución Química

Son modelos que permiten determinar las abundancias químicas de elementos tales como: H, D, ^3He , ^4He , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{16}O , Ne, Mg, Si, Ca, S, Fe y núcleos ricos en neutrones, en todas las regiones radiales de halo y disco de una determinada galaxia, mediante procesos de formación de estrellas en el halo, formación de nubes, colisiones de nubes e interacción de estrellas masivas con nubes en el disco.

Permiten predecir la existencia de gradientes radiales de abundancias por efectos combinados de tasa de formación de estrellas (SFR) y caída de gas que varían con el radio galactocéntrico en la mayoría de las galaxias espirales.

El modelo de evolución química multifase, MULCHEM, asume que la formación de estrellas toma lugar en dos etapas: 1^o la formación de nubes moleculares y 2^o la formación de estrellas.

Durante el proceso de formación de estrellas en el halo y en el disco de una galaxia, el modelo hace uso de eficiencias que representan probabilidades asociadas con procesos de formación de estrellas en el halo, formación de nubes (variable de 0 a 1), colisión nube-nube (variable de 0 a 1) e interacción de estrellas masivas con nubes en el disco (constante).

Se asume que la formación estelar (SF, Star Formation por sus siglas en inglés) toma lugar siguiendo la ley de Schmidt en las regiones del halo, mientras que en el disco el modelo asume dos etapas: las nubes moleculares se forman de gas difuso y enseguida las estrellas se forman de colisiones nube-nube.

Este trabajo hace uso de los CEMs de Mollá et al. (2017), los cuales presentan los CEMs modificados con respecto a los CEMs de MD05 en relación a la formación de nubes moleculares basadas en descripciones existentes en la literatura y de una comparación del CEM de la Vía Láctea referente a la evolución de la región Solar, la estructura radial del disco galáctico y la tasa entre los componentes difuso y molecular (H_1/H_2).

En las cuadrículas clásicas de los MULCHEM, se tienen los datos que toman en cuenta que las estrellas en el disco de una galaxia son creadas por colisiones nube-nube o interacciones de estrellas masivas con nubes moleculares circundantes, de tal forma que en esta etapa se lleva a cabo la formación estelar a partir de la etapa previa de formas de gas molecular.

Mollá et al. (2017) describe las prescripciones incluidas en MULCHEM para formar nubes moleculares, H_2 a partir del gas difuso H_1 , ingredientes esenciales en el proceso

de SF. MULCHEM consta de un sistema de 9 ecuaciones diferenciales que permiten predecir la evolución a lo largo del tiempo de cada región radial ubicada a una distancia galactocéntrica R , en el halo y en el disco.

Estas ecuaciones predicen la evolución temporal de las diferentes fases del modelo.

Dichas ecuaciones se resuelven para dos rangos de estrellas: i. masivas e intermedias y ii. de baja masa ($\leq 4 M_{\odot}$), así como iii. remanentes estelares.

Los modelos incluyen la tasa de caída, el tiempo de colapso y las tasas de muerte de las estrellas considerando el límite de $4 M_{\odot}$ entre las estrellas de baja masa con respecto de las estrellas de masa intermedia y masivas para la formación de masa inicial (IMF, Initial Mass Formation por sus siglas en inglés) y el tiempo de vida de la secuencia principal de una estrella de masa m .

Se supone que la SF se lleva a cabo siguiendo una ley de Schmidt en las regiones del halo y el disco, la cual ocurre en dos pasos: primero, nubes moleculares formadas a partir del gas difuso y enseguida las estrellas formadas a través de las colisiones nube-nube. Además, un segundo proceso de SF aparece como resultado de la interacción de estrellas masivas con las nubes moleculares que las rodean. En ese tenor, se tienen diferentes procesos definidos en la galaxia:

- (i) SF por fragmentación espontánea de gas en el halo.
- (ii) Formación de disco por acreción de gas a partir del halo o protogalaxia.
- (iii) Formación de nubes por gas difuso. Esta ley de formación de nubes fue modificada en Mollá et al. (2017).
- (iv) SF debida a la colisión de nube-nube.
- (v) Restitución de gas difuso debido a la colisión nube-nube.
- (vi) SF inducida debido a la interacción entre las nubes y las estrellas masivas.
- (vii) Restitución de gas difuso debido a la SF inducida (las estrellas masivas inducen SF en las nubes moleculares que las rodean).

Los modelos contemplan la ley de SF en halo y disco. κ_h , κ_c , κ_s , κ_a son los factores de proporcionalidad de la SF en el halo, la formación de nubes, la colisión nube-nube y las interacciones nubes-estrellas masivas (las dos últimas crean estrellas a partir de nubes moleculares).

Como se discute en Ferrini et al. (1994) y Molla (2014), Los factores κ_h , κ_s y κ_a tienen una dependencia radial, y se expresan con la constante de gravitación universal, los volúmenes del disco y el halo, la densidad promedio de la nube y la masa promedio de estrellas masivas; como se puede observar en Mollá et al. (2017), que convirtieron estos parámetros en relaciones con el volumen y eficiencias en el

halo, la colisión nube-nube y las interacciones nubes-estrellas masivas, a saber: ε_h , ε_s , ε_a , que representan probabilidades (en el rango [0, 1]) asociadas con los procesos de conversión entre las diferentes fases y que se asumieron constantes para todas las regiones radiales dentro de una galaxia. Estas eficiencias conforman la base de datos usada en este trabajo.

La eficiencia para formar estrellas en el halo, ε_h , se obtuvo de la selección del mejor valor del factor de proporcionalidad de la SF en el halo, κ_h , capaz de reproducir las SFR y abundancias del halo galáctico (Ferrini et al. (1994)) y se asume constante para todos los halos. De la misma forma, ε_a fue obtenida del mejor valor de κ_a de MWG y se asumió constante para todas las galaxias por ser procesos locales.

La modificación que se hace al modelo de Mollá et al. (2017), es referente al parámetro libre ε_s con respecto a la formación de H₂: $\varepsilon_s = \exp(-NT^2/8)$, donde NT es un parámetro libre relacionado con el tamaño morfológico, al cual se le asignaron valores entre 1-10, los cuales conforman la base de datos de los CEMs (MULCHEM) usados en este trabajo.

Las ecuaciones (22) y (23) de las abundancias químicas de Mollá et al. (2017), contienen el término X_i que representa la fracción en masa de los 15 elementos que se consideran en el modelo: H, D, ³He, ⁴He, ¹²C, ¹³C, ¹⁶O, ¹⁴N, ²⁰Ne, ²⁴Mg, ²⁸Si, ³²S, ⁴⁰Ca, ⁵⁶Fe y los isótopos ricos en neutrones, creados de ¹²C, ¹⁶O, ¹⁴N y ¹³C, de los cuales, las abundancias elementales de ¹⁶O y ¹⁴N conforman la base de datos de este estudio (también O/H), y fueron usadas en los cálculos mediante log(N/O) (log(O/H)) y relacionadas con log(SFR).

Para calcular dichas abundancias elementales, Mollá et al. (2017), usó la técnica basada en el *formalismo Q de matrices* (Talbot & Arnett 1973; Ferrini et al. 1992; Portinari, Chiosi & Bressan 1998), la cual une todas las especies eyectadas a todas sus diferentes fuentes nucleosintéticas, permitiendo al modelo escalar la eyección con respecto a la composición inicial detallada de la estrella.

En Mollá, et al. (2017) se usó el conjunto de rendimientos estelares de Limongi y Chieffi (2003); Chieffi & Limongi (2004) para estrellas masivas, junto con rendimientos de Gavilán, Buell & Mollá (2005); Gavilán, Mollá y Buell (2006) para estrellas de masa baja e intermedia, combinadas con el IMF de Kroupa (2001), que es una de las mejores combinaciones capaces de reproducir los datos MWG.

En el Apéndice A de Mollá et al. (2015), se presenta el tiempo de evolución de la región Solar, localizada a una distancia galactocéntrica de 8 kpc: Historias de enriquecimiento de formación de estrellas ($\psi(t)$), distribución radial de la densidad de superficie SFR (\sum_{SFR}) y los gradientes elementales de abundancias elementales de C, N y O.

2.1 El modelo estándar (STD) de Mollá et al. (2017)

La ecuación de fase de nube molecular del modelo estándar de Mollá et al. (2017) incluye la formación de nube molecular a partir de gas difuso y cómo esas nubes desaparecen debido a las colisiones nube-nube (las cuales crean estrellas y también restituyen gas difuso al medio interestelar, ISM) y como la consecuencia de la interacción de estrellas masivas con las nubes que las rodean (este proceso también crea estrellas y nuevo gas difuso el cual retorna al ISM).

Al igual que $\kappa_h(R)$, $\kappa_s(R)$ y $\kappa_a(R)$, $\kappa_c(R)$ depende de la geometría de las regiones. Las eficiencias ε_c y ε_s se calculan simultáneamente como una función del parámetro NT que puede ser asociado con el índice de tipo morfológico, razón por la cual este modelo fue llamado modelo estándar.

2.2 El modelo modificado (MOD) de Mollá et al. (2017)

En Mollá et al. (2017), se modifica la expresión matemática que representa la ε_c (ε_μ de MD05), lo cual modifica ligeramente ambas eficiencias ε_c y ε_s (ε_H de MD05), ver Tabla 1 de Mollá et al. (2017) y Tabla 2 de MD05. Con esto, las galaxias de tipo tardío formarán una cantidad más pequeña de gas molecular, mientras esta fase será incrementada para tipos más tempranos, en comparación con el modelo STD.

La ecuación que define la masa de nube molecular y su parámetro $\kappa_c(R)$ son los mismos en los modelos STD y MOD.

3. Descripción de CALIFA

CALIFA es la Encuesta de Área de Campo Integral de Legado de Calar Alto (The Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey, CALIFA, por sus siglas en inglés) está observando una muestra estadísticamente bien definida de galaxias en el universo local utilizando 250 noches de observación con el espectrofotómetro de campo integral PMAS/PPAK, montado en el telescopio reflector Zeiss de Calar Alto de 3.5 m operado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC, Granada, España) y el Instituto Max Planck de Astronomía (MPIA-MPG, Heidelberg Alemania), brindando además, apoyo para los procesos de toma, reducción y almacenamiento de los datos. CALIFA contiene datos del panorama de las propiedades de galaxias¹.

La espectroscopia de campo integral (IFS, Integral Field Spectroscopy por sus siglas en inglés) permite tomar multitud de espectros de manera simultánea sobre muchos puntos de cada galaxia, gracias a una eficaz combinación de fibras ópticas y técnicas clásicas.

El espectrógrafo de campo integral empleado para el sondeo CALIFA en el Observatorio de Calar Alto, PMAS (en una configuración especial denominada PPAK), usa más de 350 fibras ópticas para cubrir un campo de visión de un minuto de arco. De este modo se puede cartografiar por completo y en detalle todo un objeto extenso, como una galaxia. El legado de CALIFA permite realizar imágenes de color de galaxias débiles y brillantes, frías (rojizas) y calientes (azules) a partir de los cubos de datos; generar mapas con distintas propiedades de las galaxias, como la velocidad, las edades estelares, la composición química, emisión de hidrógeno ionizado, velocidad del gas dentro de la galaxia, edad estimada para la población estelar, brillo en la banda visual, entre otras. Se espera obtener resultados de parte de la comunidad científica a quien se dirige la información obtenida de CALIFA, acerca de los procesos que impulsaron la evolución de las galaxias a través del tiempo, los elementos químicos necesarios para la vida, los fenómenos involucrados en las colisiones entre galaxias, etc., desvelando tanto la historia de una galaxia entera, como de sus partes. El Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) lidera el estudio del movimiento de las estrellas y del gas ionizado para caracterizar el momento angular estelar, las peculiaridades en la rotación del gas ionizado o el patrón de velocidades de barras en

¹ Fuente: CALIFA SURVEY, en: <http://califa.caha.es/> y <http://califa.caha.es/DR3>.

galaxias espirales para establecer los procesos dominantes en la evolución y el destino de las galaxias².

Siendo las galaxias los productos finales de la evolución cósmica, CALIFA es un cartografiado espectroscópico que tiene como objetivo principal descifrar el pasado de las galaxias: hacer paleontología galáctica debido a la propiedad especial de sus datos, que permiten obtener información a todo lo largo de la galaxia³, lo cual permite caracterizar las galaxias del universo local.

CALIFA combina dos técnicas independientes: la imagen y la espectroscopia, la toma de imágenes brinda información detallada acerca de la estructura espacial de las galaxias, y la espectroscopia, que ofrece información sobre varias propiedades de las galaxias, proporcionando información de los espectros de las distintas emisiones de las estrellas, los espectros que emiten las galaxias a partir de los cuales se obtiene información de las distintas etapas de formación estelar en el universo.

El espectrógrafo bidimensional que utiliza CALIFA, es un espectrógrafo con la propiedad de obtener un espectro en cada uno de los puntos de una zona del cielo a partir de un hexágono que cubre toda la galaxia. Se obtiene información de toda la galaxia con una sola exposición.

CALIFA da acceso al uso de todas las técnicas en imagen y espectroscopia debido a que proporciona imagen de toda la galaxia en todos sus puntos y espectro en todos los puntos de la imagen.

De cada galaxia, CALIFA obtiene de 1000 a 2000 espectros, los cuales indican el gas que contiene en cada una de sus localizaciones y con ello se pueden conocer sus propiedades espacialmente resueltas, lo que le ha permitido obtener una visión panorámica de las galaxias. Para cada punto de la galaxia, CALIFA proporciona sus propiedades físicas y químicas, tales como el color de la población estelar, el contenido gaseoso, el contenido de polvo, la dinámica de una parte determinada de una galaxia y su velocidad. Cada espectro obtenido por CALIFA, se considera como la suma de distintos brotes de formación estelar en distintas épocas a lo largo de la vida de la galaxia con distinta cantidad de metales.

Dado que la huella de evolución de una estrella está inscrita en su espectro, CALIFA proporciona información de una galaxia en sus componentes estelares individuales y su evolución a lo largo del tiempo

² El universo extra galáctico al descubierto. Sondeo CALIFA.

<http://nciencia.blogspot.mx/2012/11/el-universo-extragalactico-al.html>

³ Información tomada del video: de construyendo la luz VIII– CALIFA: El pasado de las galaxias, en: <http://www.24-horas.mx/califa-el-mayor-mapa-de-galaxias-de-la-historia-video/>

A partir del legado que deja CALIFA a la comunidad científica, en cada punto de una galaxia se puede hacer una historia del origen, lo que permite obtener información integrada de todas las galaxias y de los diferentes componentes que forman las galaxias, con ello se obtienen leyes generales sobre su evolución.

CALIFA hace uso de un muestreo suficientemente amplio y profundo en cantidad de galaxias y suficientemente amplio en el tipo de galaxias que se observan, tales como galaxias de tipo espiral, elíptico, irregulares que cubren un rango de masa muy importante, para poder sacar patrones del comportamiento de las galaxias, aportando patrones peculiares de galaxias peculiares, y patrones comunes de los tipos de galaxias, con ello se obtiene conocimiento sobre la evolución de las galaxias de acuerdo a sus distintas propiedades, lo que permite allegarse información sobre el escenario más probable de evolución del universo, ya que, como se sabe, las galaxias son el resultado de un proceso evolutivo de miles de millones de años, y su historia se halla codificada en sus distintos componentes, historia que CALIFA se encarga de descodificar mediante arqueología galáctica a través de la observación en 3D de una muestra de más de 700 galaxias.

De la información que proporciona CALIFA sobre la evolución de las galaxias, de cómo forman su masa, cómo se van construyendo, se ha podido destacar que las galaxias crecen de dentro hacia afuera, es decir, que las partes centrales de las galaxias son más viejas que las partes externas, lo que indica que la formación de las galaxias por fusión se tuvo que producir muy atrás en el tiempo.

CALIFA es un proyecto internacional con 82 centros en todo el mundo en todos los continentes y es liderado por España (tiene raíz española, ya que fue idea del español Sebastián Sánchez) y Alemania. Este proyecto dedica su estudio de la evolución de las galaxias con todas sus dimensiones en el espacio-tiempo. Cabe destacar, que el proyecto recopila información de más de 700 galaxias y crea la mayor base de datos de la historia, el mapa de galaxias más importante realizado hasta la fecha.

Este proyecto nace tras seis años de trabajo con el objetivo de apoyar a los astrónomos a aportar información sobre funcionamiento del cosmos, en un proyecto abierto en internet al público y comunidad científica: es una herencia que se deja a la comunidad internacional y que supone el catálogo más grande de formación estelar actual en galaxias. En CALIFA se hace un estudio detallado de la calidad de las observaciones, es el primer cartografiado que observa todos los tipos de galaxias y toda la extensión de cada galaxia, para saber cómo evolucionan al completo, no solo el núcleo o el disco, sino la galaxia completa, su formación y evolución.

La Vía Láctea, nuestro hogar cósmico, está rodeada de millones de galaxias, cúmulos de estrellas que esconden en su interior información básica, esencial y desconocida sobre los orígenes del Universo, que ahora CALIFA, ayudará a descifrar.

Los antecedentes de CALIFA son Sauron y Atlas3D, que estudiaron 72 y 260 galaxias, respectivamente.

El proyecto CALIFA aporta datos sobre la evolución de cada galaxia en el tiempo indicando cuándo y cuánto gas se convierte en estrellas en cada etapa y cómo ha evolucionado cada región de una galaxia a lo largo de diez mil millones de años, con ello, los astrónomos han podido extraer la historia de la evolución en masa, brillo y elementos químicos de la muestra de galaxias. Esto ha permitido corroborar que las galaxias más masivas crecen más rápido que las menos masivas y que lo hacen de dentro afuera, formando las regiones centrales en primer lugar (Sánchez et al. (2014)). De relevancia especial en este estudio, es la información que proporciona CALIFA sobre la producción de elementos químicos dentro de las galaxias y los fenómenos físicos que dan lugar a la tasa de formación de estrellas. CALIFA da información de las observaciones de última generación de estrellas que se ha formado y que aún se halla dentro de su nido de formación.

El proyecto CALIFA inició en 2008 y concluyó en 2016 con el estudio de 732 galaxias del Universo local, muestra que corresponde a sólo el uno por ciento del tamaño de todo el cosmos, obteniendo dos mil espectros por cada galaxia, lo que significa más de ocho millones de mediciones⁴. Entre la información relevante que ha aportado este proyecto destaca la verificación de la correlación que existe entre la tasa de formación estelar y la cantidad de masa de las estrellas, la cual se mantiene a escalas locales (no es necesaria la observación de la galaxia completa sino sólo una parte de ella), lo que permite concluir que la física de la función estelar es local, no global. Dado que CALIFA es un proyecto de legado, los datos se distribuyen de manera pública.

Los mapas espectrales bidimensionales obtenidos para la muestra grande usada contribuyen a:

- Extender la clasificación cinemática de galaxias sobre toda la secuencia de Hubble
- Obtener nuevos conocimientos sobre la importancia de AGN, la formación de estrellas, los shocks y viejas estrellas como fuentes de ionización.

⁴ Boletín UNAM-DGCS-578 Ciudad Universitaria, 28 de agosto de 2016, en: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2016_578.html

- El estudio de poblaciones estelares en las afueras de las galaxias de disco para evaluar la importancia de la formación de estrellas vs migración radial.
- Derivar gradientes de población estelares en edad y metalicidad para restringir los mecanismos de formación de galaxias de tipo temprano y tardío por igual.
- CALIFA también puede ser visto como un puente valioso entre las grandes encuestas de una sola apertura tales como SDSS.

Los factores determinantes para la configuración observacional del proyecto son:

- Derivar el contenido de la población estelar tanto en edad como en metalicidad.
- Rastrear la distribución del gas ionizado y estimar las abundancias químicas para la fase gaseosa.
- Medir las propiedades cinemáticas, tanto de la emisión como de las líneas de absorción.
- Para todas las cantidades crear mapas que cubren toda la extensión luminosa de las galaxias en la muestra.

Los objetivos de esta encuesta se han seleccionado del catálogo fotométrico de la Sloan Digital Sky Survey (SDSS) como una muestra limitada en diámetro isofotal aparente.

CALIFA aprovecha al máximo las capacidades únicas del instrumento PMAS/PPAK. PPAK ofrece una combinación de campo de visión extremadamente amplio (>1 arcmin²) con un alto factor de llenado en un sólo punto (65%), buena resolución espectral y sensibilidad a la longitud de onda a través del espectro óptico. Un criterio de selección adicional es el rango de desplazamiento al rojo cubierto hasta $0.005 > z > 0.03$, lo que garantiza que todas las galaxias se pueden observar con los mismos ajustes de rejilla y todavía se obtiene la misma información física. Los espectros cubren el rango 3700-7000 AA en dos configuraciones superpuestas, una en el rojo (4300-7000 AA) a una resolución espectral de $R = 850$ y una en el azul (3700-5000 AA) en $R \sim 1650$, donde las resoluciones citadas son las del rango de longitudes de onda superpuestas ($\lambda \sim 4500$ A).

3.1 Distribuciones radiales de galaxias de CALIFA

CALIFA ha puesto a disposición de la comunidad científica las distribuciones radiales de N/O y O/H (Pérez-Montero et al. (2016)), así como la luminosidad H_α , la cual en este trabajo transformamos en SFR mediante la relación de Kennicutt (1994). De las

255 galaxias proporcionadas se seleccionaron las descritas en la Tabla 1. En la columna 2 se indica el índice de tipo morfológico, en la columna 3 el tipo de galaxia, en la columna 4 el radio efectivo, en la columna 5 el corrimiento al rojo o redshift z , y, en la columna 6 las magnitudes en distintas bandas.

Tabla 1 Galaxias CALIFA seleccionadas para este estudio.

Galaxias CALIFA	Tipo morfológico	Tipo de objeto	R_e (kpc)	Redshift, z	Magnitud
NGC0477	SABbc	Seyfert 2	13.97	0.0196	g: 14.21 r: 13.441
NGC4470	SAC	HII Galaxy	2.61	0.007809	g: 13.054 r: 12.571
NGC6186	SBab	Galaxia en Grupo de Galaxias	2.86	0.009797	g: 13.593 r: 12.742
UGC04461	4	Radio Galaxia	7.59	0.016655	B: 14.32 J: 11.856 H: 11.17 K: 10.925

En la Fig. 1 se presentan las gráficas de distribuciones radiales de las abundancias $\log(N/O)$ y $\log(SFR)$ vs R (kpc), así como las gráficas de $\log(O/H)$ vs R (kpc) para cada Galaxia de la Tabla 1.

Sanchez et al. (2014) y Pérez-Montero et al. (2016), han estudiado el gradiente de la abundancia de oxígeno en discos de galaxias y abundancias de N/O a partir de datos CALIFA, respectivamente. De la caracterización de gradientes radiales de la abundancia de oxígeno en el gas ionizado estudiado por Sanchez et al. (2014), destaca:

- i. Todas las galaxias sin evidencia de interacción presentan un gradiente común en la abundancia de oxígeno con pendiente independiente de la morfología, la incidencia de barras, magnitud absoluta o masa.
- ii. Las galaxias con interacciones y/o sistemas de fusión presentan un gradiente poco profundo o muestran una distribución más plana de la abundancia de oxígeno (Kewley et al. (2010) y Rich et al. (2012)). Procesos dinámicos estos propensos a producir una mezcla de metales.

iii. Las galaxias barradas y no barradas no presentan una clara diferencia en su pendiente de abundancia siendo las galaxias de tipo más temprano (Sa S0), las que presentan gradientes ligeramente más planos, debido a la presencia de una protuberancia.

iv. Que la pendiente del gradiente de abundancia de oxígeno para galaxias de tipo más temprano (Sa/S0) se vuelva más similar a la derivada para las de tipo tardío cuando se utiliza el radio del disco efectivo, indica que (i) el uso de este radio proporciona una mejor caracterización para el gradiente (este es uno de los factores que se tomó en cuenta en la realización del presente trabajo) y (ii) el enriquecimiento del metal parece estar claramente dominado por el crecimiento del disco, en lugar de otros procesos no seculares.

v. La mayoría de las galaxias con regiones H II detectadas más allá de dos radios de disco efectivos, presentan un aplanamiento en la abundancia de oxígeno.

Los resultados sugieren que los discos galácticos crecen de adentro hacia afuera, con el enriquecimiento de metales impulsado por la historia local de formación estelar y, a una cierta distancia galactocéntrica, la abundancia de oxígeno parece correlacionarse con la densidad de masa estelar y la masa estelar total de las galaxias, independientemente de otras propiedades de las galaxias.

vi. No encontraron diferencias en la pendiente para galaxias de diferentes tipos morfológicos: espirales tempranas/tardías, barradas/no barradas o gran diseño/floculentas. Determinaron además que, más allá de 2 radios funcionales de disco, existe evidencia de un aplanamiento del gradiente de abundancia que parece ser una propiedad universal de las galaxias de disco, independientemente de la inclinación, masa, luminosidad, morfología y/o presencia de barras.

vii. Se obtuvo una caída/truncamiento de la abundancia de oxígeno en las regiones internas de 26 de las galaxias. Todos ellos son galaxias Sb/Sbc no interactivas, en su mayoría no barradas. Esta característica se asoció con un anillo central formador de estrellas, lo que sugiere que ambas características son producidas por los flujos de gas radiales inducidos por los procesos de resonancia.

viii. Se observa una tendencia débil hacia gradientes ligeramente más planos para galaxias masivas ($> 4,5 \times 10^{10} M_{\odot}$), aunque hay galaxias con pocas regiones H II y con el disco menos definido.

En Pérez-Montero, et al. (2016) se analizaron los espectros ópticos de regiones seleccionadas H II extraídas de una muestra de 350 galaxias espirales de la encuesta CALIFA y se calcularon las abundancias totales de O/H y N/O en diferentes posiciones radiales de los discos que pueden estar relacionadas con sus propiedades

integradas, ya que el análisis simultáneo de la abundancia de elementos primarios, como el oxígeno, y secundaria, como el nitrógeno, proporciona pistas sobre la historia de formación estelar (una de las razones del presente estudio) y los procesos que dan forma a la acumulación de discos espirales. Del estudio de abundancias de N/O, O/H y SFR en el presente trabajo, podemos corroborar algunos de nuestros resultados con los resultados de estos autores.

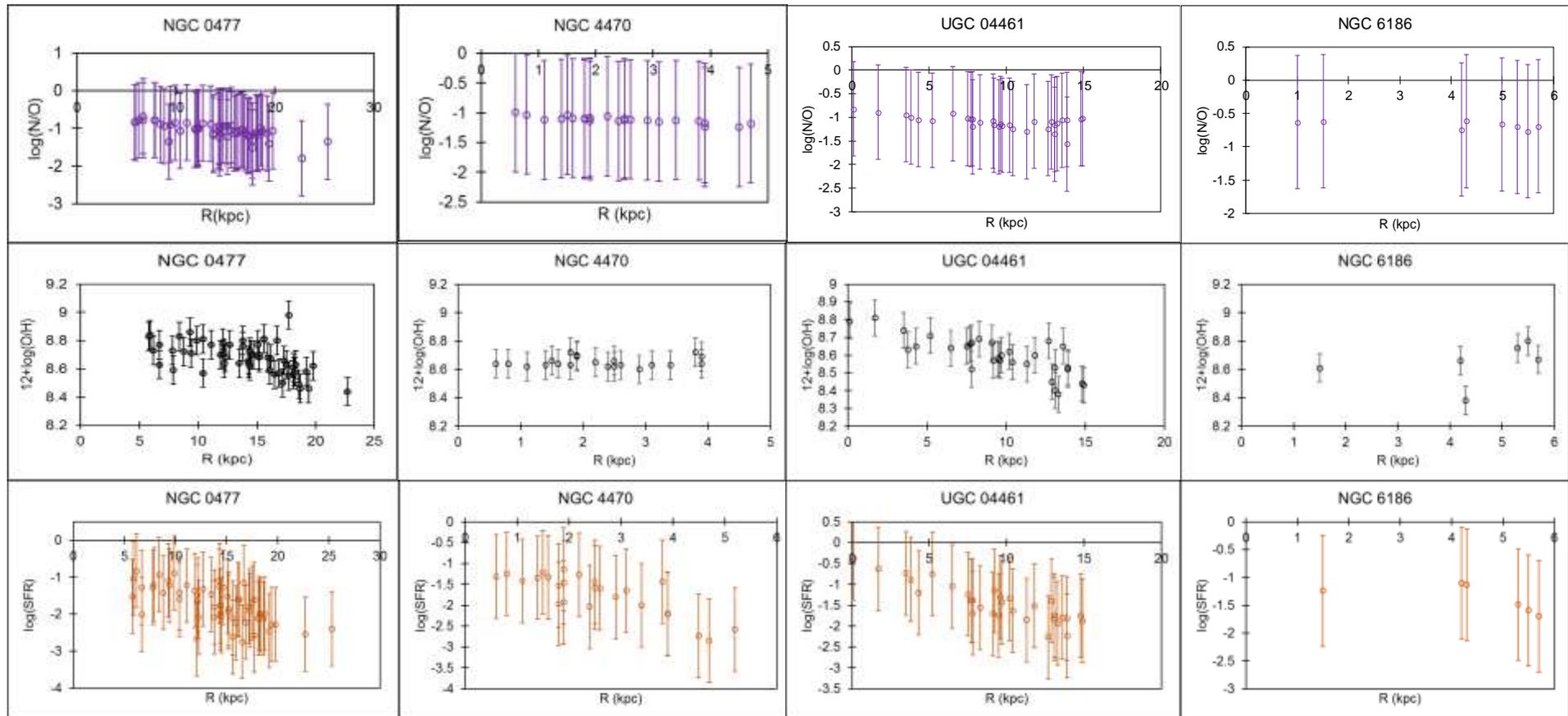


Fig. 1 Distribuciones radiales de las abundancias de N/O mediante $\log(N/O)$ (arriba), O/H mediante $12 + \log(O/H)$ (centro) y tasa de formación estelar a través de $\log(SFR)$ (abajo), de las galaxias NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y NGC 6186.

5. Modelos estadísticos

En este trabajo se usaron modelos estadísticos para definir los CEMs que mejor ajustan a los datos experimentales.

En este capítulo se presenta la metodología que se siguió para los cálculos de interpolación de distribuciones radiales y Chi-cuadrado, χ^2 , de abundancias de N/O mediante $\log(N/O)$ y la tasa de formación de estrellas mediante $\log(SFR)$, usando los datos teóricos que predicen los CEMs (MULCHEM) de Mollá et al. (2017) y los datos observacionales de CALIFA proporcionados por Pérez-Montero et al. (2014), los cuales fueron implementados en código Python.

Los cálculos realizados se utilizaron en las 255 galaxias de datos CALIFA y un grid de 760 modelos, de los cuales se reportan resultados obtenidos para los diez modelos que mejor ajustan a los datos observados para las galaxias: NGC0477, NGC4470, NGC6186 y UGC04461.

Se realizó una interpolación lineal con los radios (kpc) r_n y r_{n+1} y abundancias X_n y X_{n+1} para $\log(N/O)_{calc,i}$ de los CEMs, así como las distribuciones radiales de galaxias, $r_{obs,i}$, usando la expresión (Sánchez (2016))

$$X_{mod,i} = X_n + (r_{obs,i} - r_n) \frac{(X_{n+1} - X_n)}{r_{n+1} - r_n} \quad (1)$$

donde,

$X_{mod,i} = \log(N/O)_{calc,i}$	Valor de $\log(N/O)_{calc,i}$ desconocido para el radio observado $r_{obs,i}$.
X_n	$\log(N/O)$ de valor menor de un CEM con respecto al $\log(N/O)$ observado de una galaxia, $\log(N/O)_{calc,i}$; $X_n < X_{mod,i} < X_{n+1}$ o $\log(N/O)_n < \log(N/O)_{mod,i} < \log(N/O)_{n+1}$
X_{n+1}	Idem a X_n pero, valor mayor de un CEM.
$r_{obs,i}$	Radio conocido de una galaxia, el cual oscila entre un valor inmediato menor y un valor inmediato mayor de los CEMs, es decir: $r_n < r_{obs,i} < r_{n+1}$
r_n	Radio de valor inmediato menor de un CEM con respecto al radio observado de una galaxia, $r_{obs,i}$.
r_{n+1}	Radio de valor inmediato mayor de un CEM con respecto al radio observado de una galaxia, $r_{obs,i}$.

La adecuación a la nomenclatura de la Ec. (1) para la SFR es:

$X_{mod,i} = SFR_{calc,i}$	Valor de $SFR_{calc,i}$ desconocido para el radio observado $r_{obs,i}$.
X_n	SFR de valor menor de un CEM con respecto al SFR observado de una galaxia, $SFR_{calc,i}$; $X_n < X_{mod,i} < X_{n+1}$ o $SFR_n < SFR_{mod,i} < SFR_{n+1}$
X_{n+1}	Idem a X_n pero, valor mayor de un CEM.
$r_{obs,i}$	Radio conocido de una galaxia, el cual oscila entre un valor inmediato menor y un valor inmediato mayor de los CEMs, es decir: $r_n < r_{obs,i} < r_{n+1}$
r_n	Radio de valor inmediato menor de un CEM con respecto al radio observado de una galaxia, $r_{obs,i}$.
r_{n+1}	Radio de valor inmediato mayor de un CEM con respecto al radio observado de una galaxia, $r_{obs,i}$.

La SFR de los CEMs es un valor conocido, mientras que, la SFR de las galaxias, se calculó con la luminosidad $\log(H_\alpha)$ de datos proporcionados mediante la fórmula de Kennicutt (1994):

$$SFR = 7.9 \times 10^{(\log(LH_\alpha) - 42)} \quad (2)$$

El cálculo del estadístico de prueba Chi-cuadrado, χ^2 , para los datos $\log(N/O)$ y $\log(SFR)$ de los CEMs y CALIFA, se calculó, respectivamente con la expresión

$$\chi^2_{\log(N/O)} = \sum_{i=1}^n \frac{(X_{mod,i} - X_{obs,i})^2}{(error_{\log(N/O)})^2} \quad (3)$$

$$\chi^2_{\log(SFR)} = \sum_{i=1}^n \frac{(X_{mod,i} - X_{obs,i})^2}{(0.1)^2} \quad (4)$$

Donde,

χ^2	Chi-cuadrado
$X_{obs,i}$	Datos observacionales (regHII_CALIFA)
$X_{mod,i}$	Datos obtenidos de cada modelo tanto para $\log(N/O)$ como para $\log(SFR)$
$error_NO$	Dato dado de los CEMs (MULCHEM)

4. Descripción de los datos

Los datos de que se dispone para la realización del presente trabajo son de dos tipos: i. datos experimentales recabados por CALIFA, que incluyen las distribuciones radiales, $R_{obs,i}(kpc)$, de abundancias de N y O, $\log(N/O)$, tasa de formación de estrellas, $\log(SFR)$, así como el error N/O ; y ii. datos teóricos correspondientes a los CEMs (modelo MUNCHEM): distribuciones radiales, $R(kpc)$, de abundancias de N y O, $\log(N/O)$ y abundancias de O y H, $\log(O/H)$, tasa de formación de estrellas, $\log(SFR)$, $Ndis$ que identifica el modelo con sus respectivos parámetros NTs [1 a 10] asociados al índice de tipo morfológico y que definen las eficiencias ε_c y ε_s . De una base de datos de 14,800 valores conteniendo 76 $Ndis$ (modelos que van de 10.75 a 13) con N de [1-10] cada uno, conforman una base de datos de 760 modelos en total, de lo cual se muestra un ejemplo con uno de los diez modelos que mejor ajusta a los datos de la galaxia NGC 6186 de CALIFA conteniendo la mayor eficiencia (formación de nubes y colisión nube-nube en la formación de estrellas) en la Tabla 2. Asimismo, en la Tabla 3 se presenta una muestra (galaxia NGC 6186) de la base de datos de 255 galaxias CALIFA con 8,016 valores que se usaron en el programa en código Python realizado en este trabajo.

Tabla 2 Muestra de la base de datos de un grid de 760 modelos usados en este trabajo. Presentación de uno de los diez modelos que mejor ajustan a los datos de la galaxia NGC 6186 de CALIFA con la mayor eficiencia en la formación de estrellas.

$Ndis$	N	R (kpc)	SFR	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno
12.9	1	0	0.2302	0.6789	8.906	8.324
12.9	1	2	0.2535	0.6849	8.865	8.222
12.9	1	4	0.4366	0.694	8.814	8.133
12.9	1	6	0.5981	0.7008	8.774	8.06
12.9	1	8	0.7513	0.7056	8.743	8.002
12.9	1	10	0.8902	0.709	8.721	7.957
12.9	1	12	0.9727	0.7119	8.701	7.916
12.9	1	14	1.075	0.7137	8.688	7.889

Tabla 2 Muestra de la base de datos de un grid de 760 modelos usados en este trabajo. Presentación de uno de los diez modelos que mejor ajustan a los datos de la galaxia NGC 6186 de CALIFA con la mayor eficiencia en la formación de estrellas.

N_{dis}	N	R (kpc)	SFR	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno
12.9	1	16	1.132	0.7153	8.676	7.864
12.9	1	18	1.141	0.7166	8.667	7.842
12.9	1	20	1.11	0.7178	8.658	7.821
12.9	1	22	1.044	0.7188	8.65	7.801
12.9	1	24	0.9449	0.7197	8.644	7.783
12.9	1	26	0.8185	0.7205	8.639	7.761
12.9	1	28	0.6857	0.7215	8.634	7.726
12.9	1	30	0.5578	0.7235	8.616	7.64
12.9	1	32	0.4327	0.7295	8.532	7.414
12.9	1	34	0.2549	0.7396	8.288	6.957
12.9	1	36	0.05694	0.7484	7.773	6.294
12.9	1	38	0.00174	0.7513	7.09	5.897
12.9	1	40	4.90E-06	0.7514	6.992	5.865
12.9	1	42	6.74E-09	0.7515	6.985	5.856
12.9	1	44	9.30E-12	0.7515	6.98	5.851
12.9	1	46	1.30E-14	0.7515	6.976	5.846
12.9	1	48	1.80E-17	0.7515	6.972	5.841

Tabla 3 Muestra de la base de datos de 255 galaxias CALIFA usada en este trabajo.

Gal-reg	$\log(LH_\alpha)$	$12 + \log(O/H)$	$\log(N/O)$	R (kpc)	R_e (kpc)
NGC6186-001	40.93	8.609	-0.6168	1.5	10.39
NGC6186-003	40.07	8.6479	-0.6283	1	10.39
NGC6186-006	39.83	8.7141	-0.664	5	10.39
NGC6186-009	39.64	8.3842	-0.6157	4.3	10.39
NGC6186-012	39.45	8.6721	-0.694	5.7	10.39
NGC6186-013	39.39	8.7509	-0.6984	5.3	10.39
NGC6186-014	39.51	8.7968	-0.7671	5.5	10.39
NGC6186-028	38.89	8.762	-0.8123	6.2	10.39
NGC6186-036	38	8.7653	-0.6888	7.1	10.39
NGC6186-042	39.49	8.6601	-0.7422	4.2	10.39

6. Resultados y discusión

En esta sección se presentan y se discuten los resultados de los datos teóricos de abundancias de N/O y SFR generados por los modelos de evolución química de multifase (CEMs-MULCHEM) de Mollá et al. (2017) a partir del programa realizado en este trabajo en código Python (ver Anexo 1), con respecto a los datos observados de 255 galaxias de CALIFA. Mediante el código Python se interpolaron los datos teóricos de N/O, SFR y R (kpc) que aportan los modelos, con respecto al radio observado por CALIFA, R_{obs} , i (kpc), se realizó el cálculo de chi cuadrado, χ^2 , tomando en cuenta el error intrínseco de los datos, y con ello se determinaron los modelos que mejor ajustan a los datos de galaxias de CALIFA en orden descendente para, mediante su análisis, predecir la posible evolución de las galaxias.

De las 255 galaxias de la base de datos de CALIFA, se eligieron las galaxias NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y NGC 6186. En las Tablas 4 y 5 de Anexo 2 se muestran los 10 modelos (de un grid de 760 modelos) de N/O y SFR, así como de O/H, que mejor ajustan a los datos de CALIFA. Asimismo, en las Figuras 2-4 se presentan las gráficas de los 10 modelos mencionados de las abundancias de N/O y O/H, así como de SFR.

Como se puede apreciar en la Tabla 4, se incluyen los cálculos del coeficiente de correlación, r , y de covarianza $Cov(\log(N/O)_{mod}, \log(N/O)_{CALIFA})$ y $Cov(\log(SFR)_{mod}, \log(SFR)_{CALIFA})$ con el propósito de verificar la relación que guardan entre sí los valores de los CEMs con respecto a los datos observados por CALIFA para cada CEM. De la misma forma, en la Tabla 5 para la abundancia de O/H, se presenta el coeficiente de correlación. En las Figs. 5-8 se presentan las rectas de regresión de las abundancias de N/O de los 10 modelos que mejor ajustan a los datos de las galaxias NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y NGC 6186 y la recta de regresión que ajusta a los datos CALIFA. Lo mismo para las abundancias O/H en las Figs. 9-12. Las ecuaciones de las rectas de regresión de las Figs. 5-12 están ordenadas de acuerdo a los modelos indicados con N_{dis} y N .

Tanto los coeficientes de correlación y los errores esperados de acuerdo a los datos CALIFA de Pérez-Montero et al. (2016) así como la desviación estándar de N/O y SFR predichas por los CEMs-MULCHEM de Mollá et al. (2017) realizados en este trabajo, se presentan en la Tabla 6 de Anexo 2.

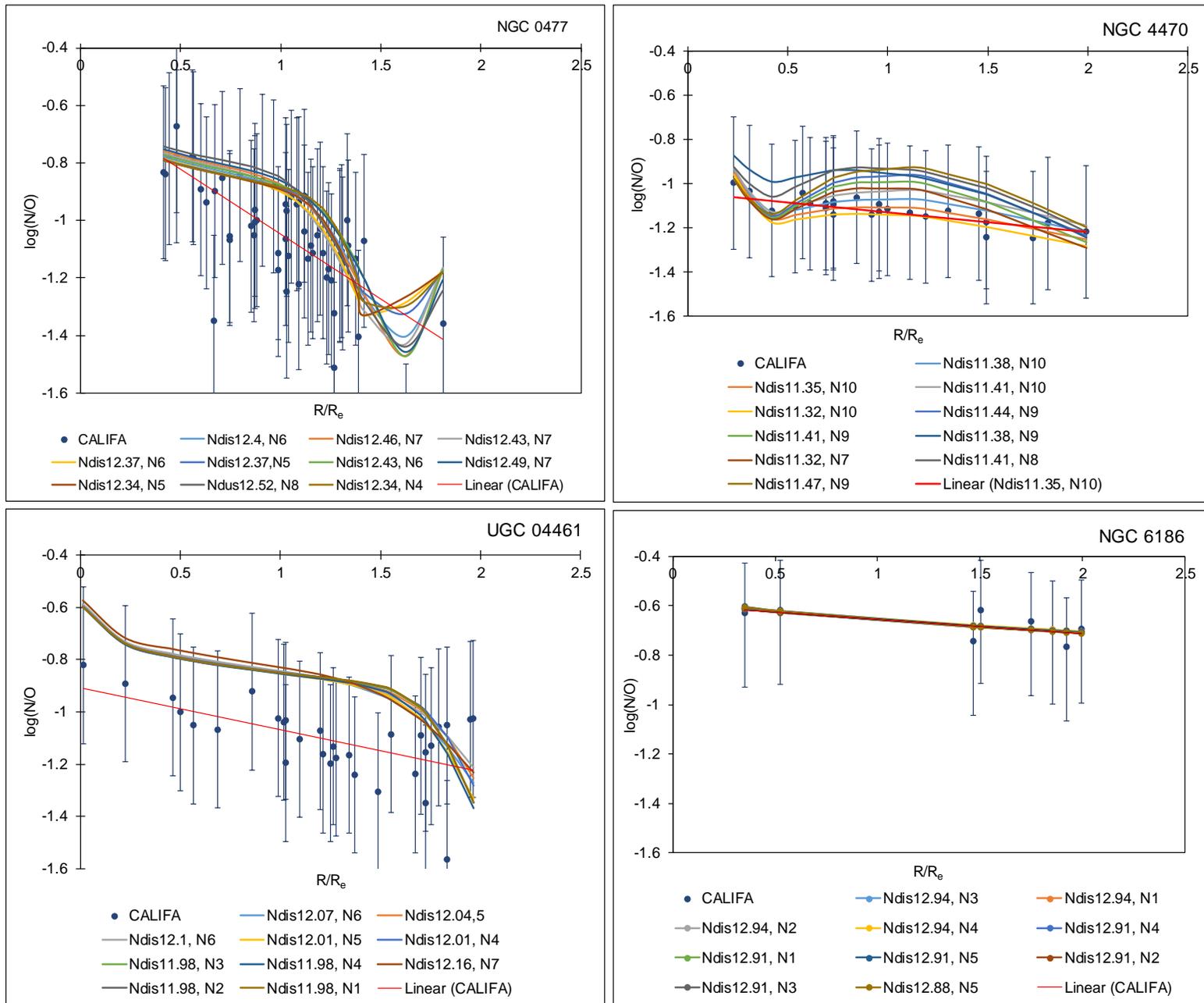


Fig. 2. Gráficas de diez de los modelos de evolución química multifase (CEMs-MULCHEM) de Mollá et al. (2017) de abundancias N/O que mejor ajustan a los datos observados de CALIFA de las galaxias: NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y NGC 6186, obtenidos del programa realizado en código Python.

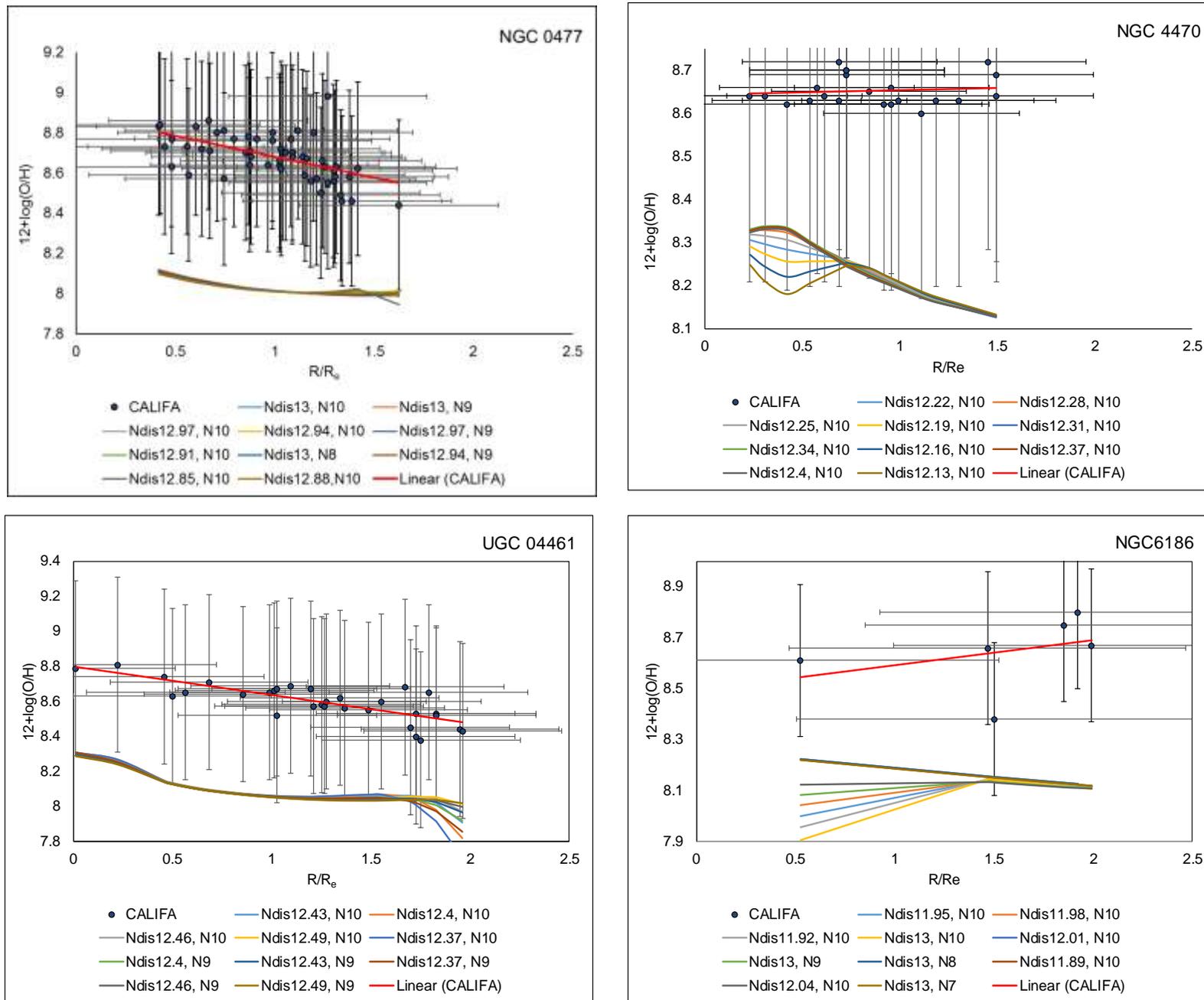


Fig. 3. Cuatro ejemplos de diferentes combinaciones de pendientes en O/H en la muestra de las galaxias CALIFA y modelos que mejor ajustan a los datos obtenidos con el programa elaborado en código Python. Para los datos observados: NGC 0477 presenta gradientes negativos, NGC 4470 tiene gradiente positivo, UGC 04461 muestra un gradiente negativo y, finalmente, NGC 6186 muestra un gradiente positivo.

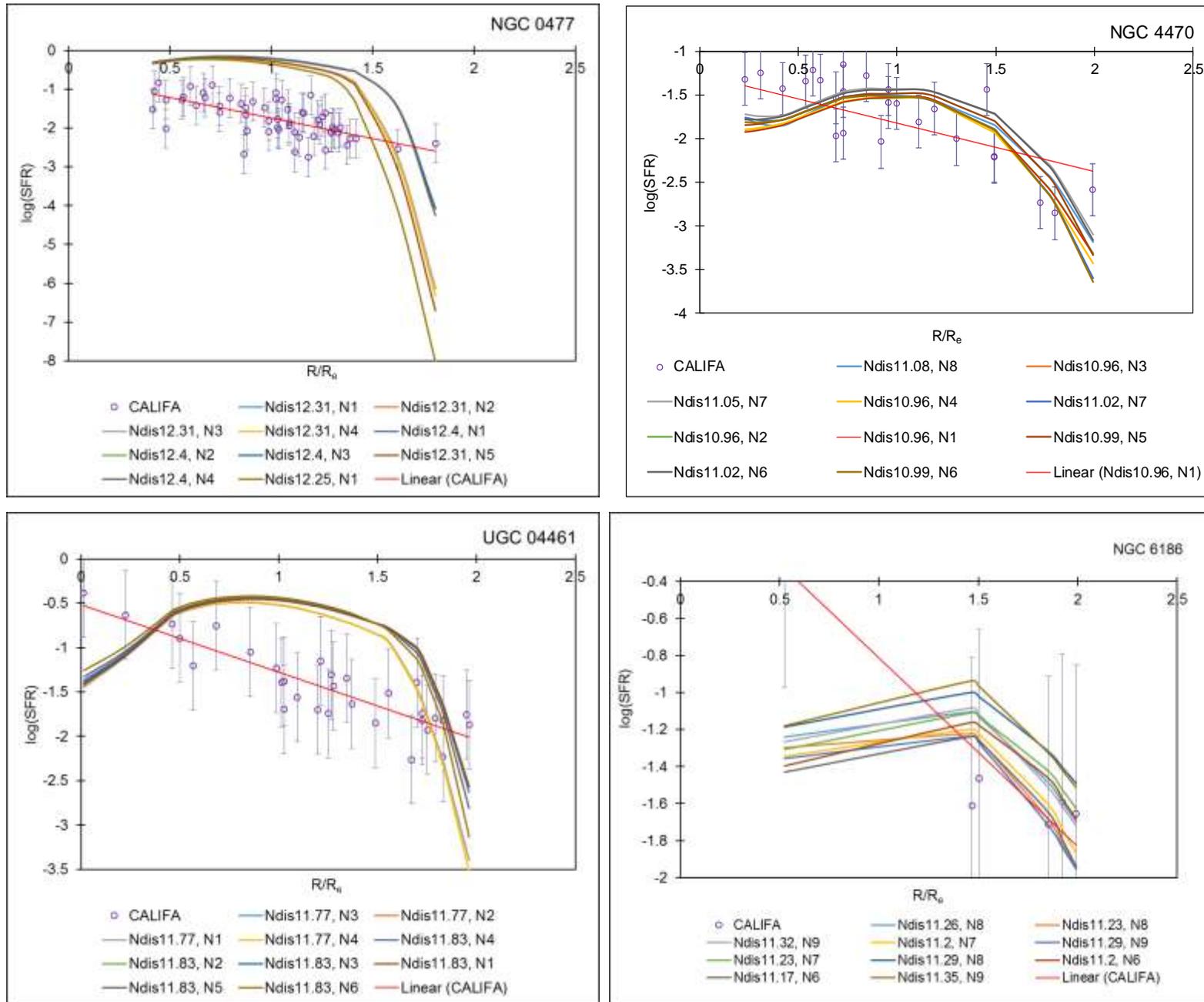


Fig. 4. Gráficas de diez de los modelos de evolución química multifase (CEMs-MULCHEM) de Mollá et al. (2017) de tasa de formación de estrellas, SFR, que mejor ajustan a los datos observados de CALIFA de las galaxias: NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y NGC 6186, obtenidos del programa realizado en código Python.

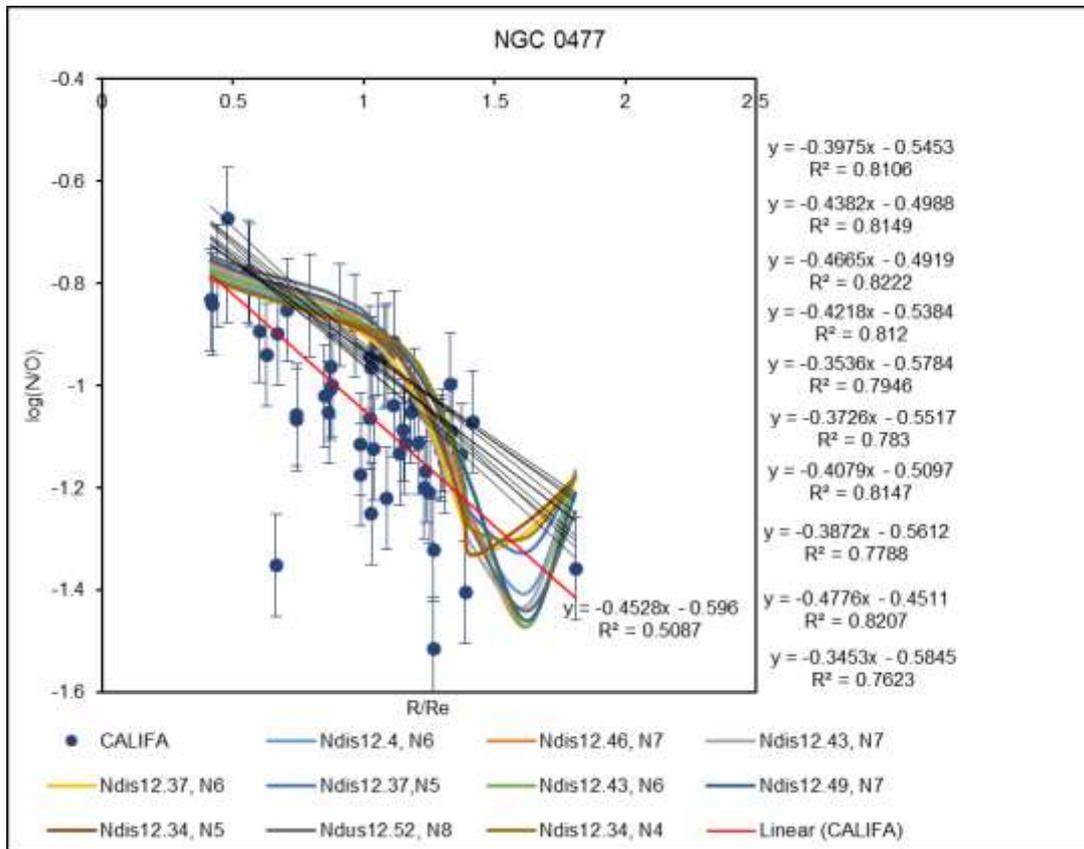


Fig. 5 Gráfica de abundancias de N/O de datos predichos por los CEMs y CALIFA con rectas de regresión y coeficientes de determinación de la galaxia

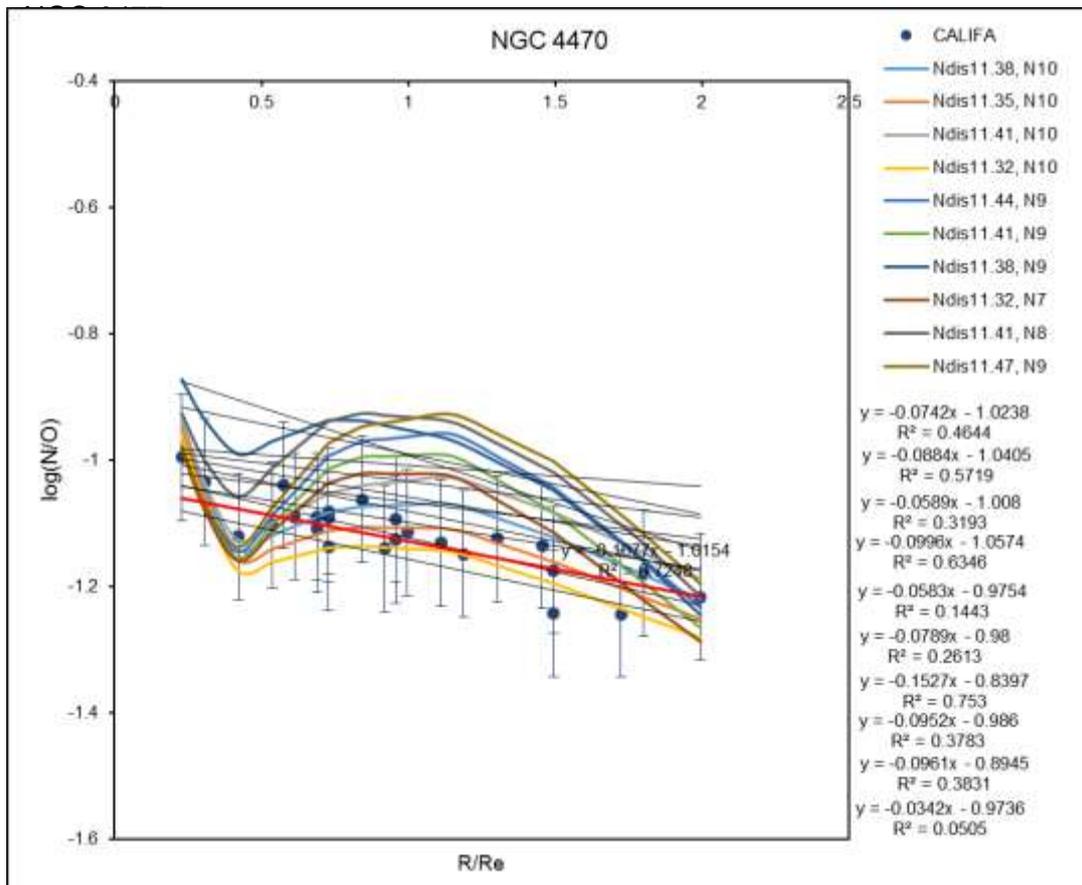


Fig. 6 Gráfica de abundancias de N/O de modelos y CALIFA con rectas de regresión y coeficientes de determinación de datos CALIFA y de algunos de los datos de modelos de la galaxia NGC 4470.

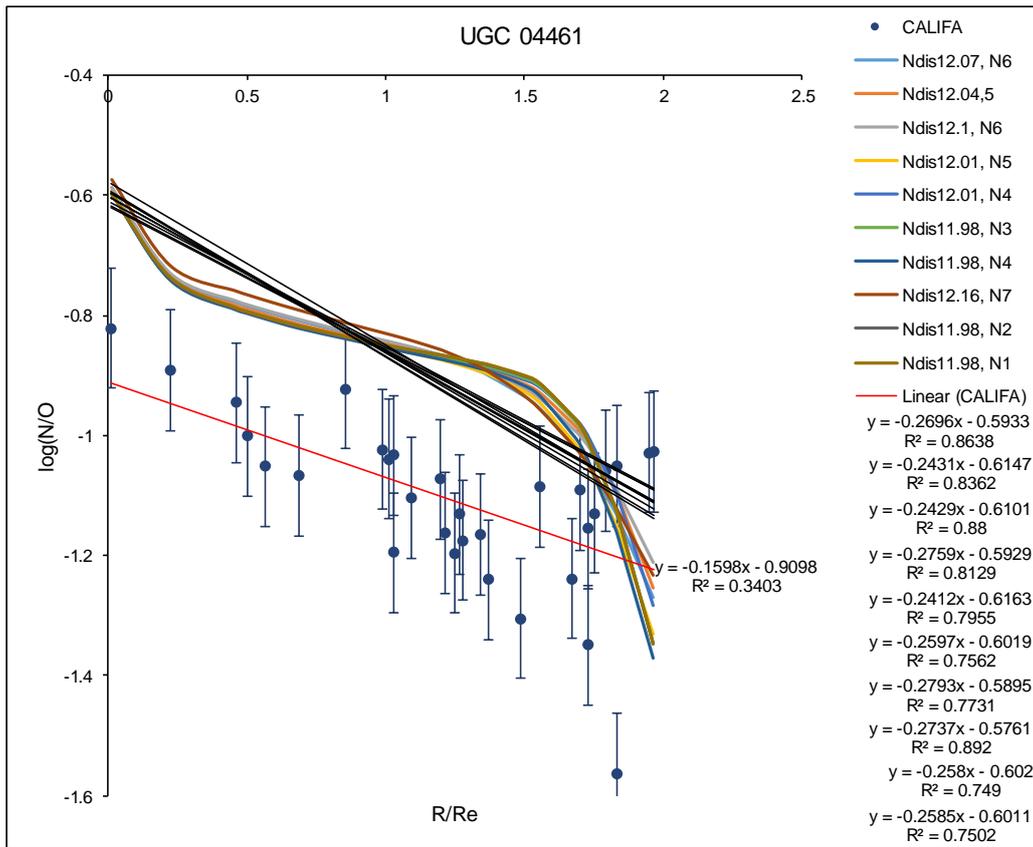


Fig. 7 Gráfica de abundancias de N/O de modelos y CALIFA con rectas de regresión y coeficientes de determinación para la galaxia UGC 04461.

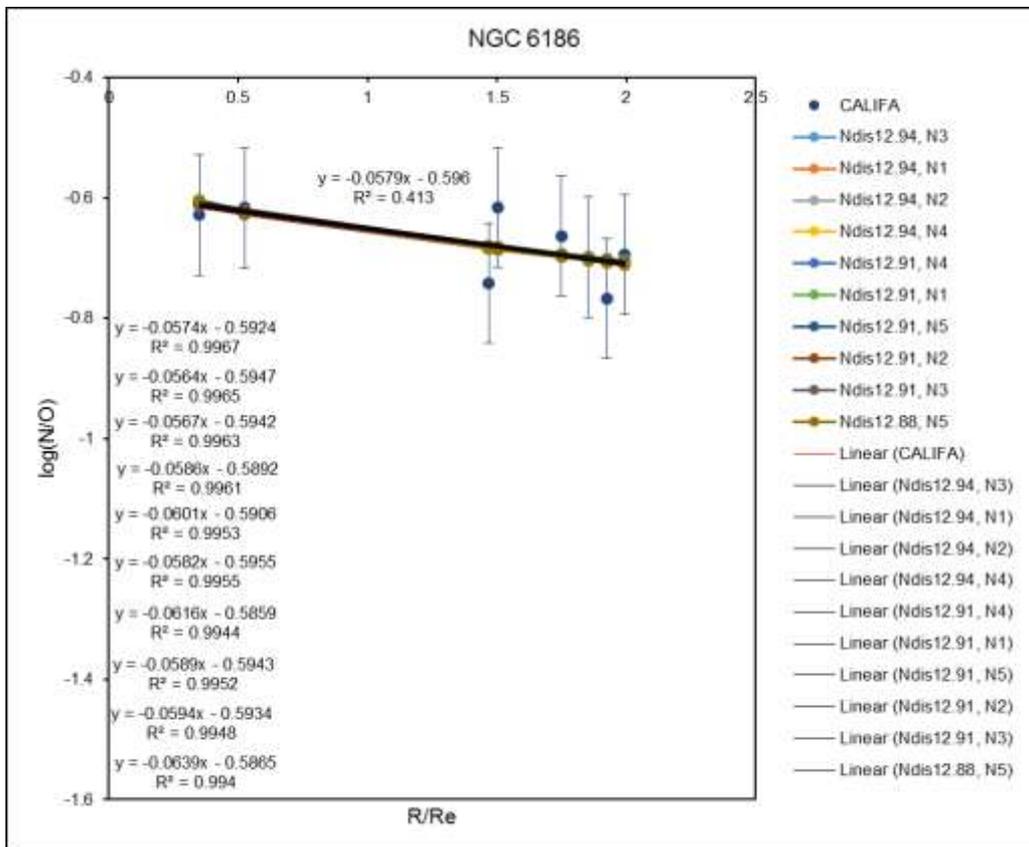


Fig. 8 Gráfica de abundancias de N/O de modelos y CALIFA con rectas de regresión y coeficientes de determinación PARA la galaxia NGC 6186.

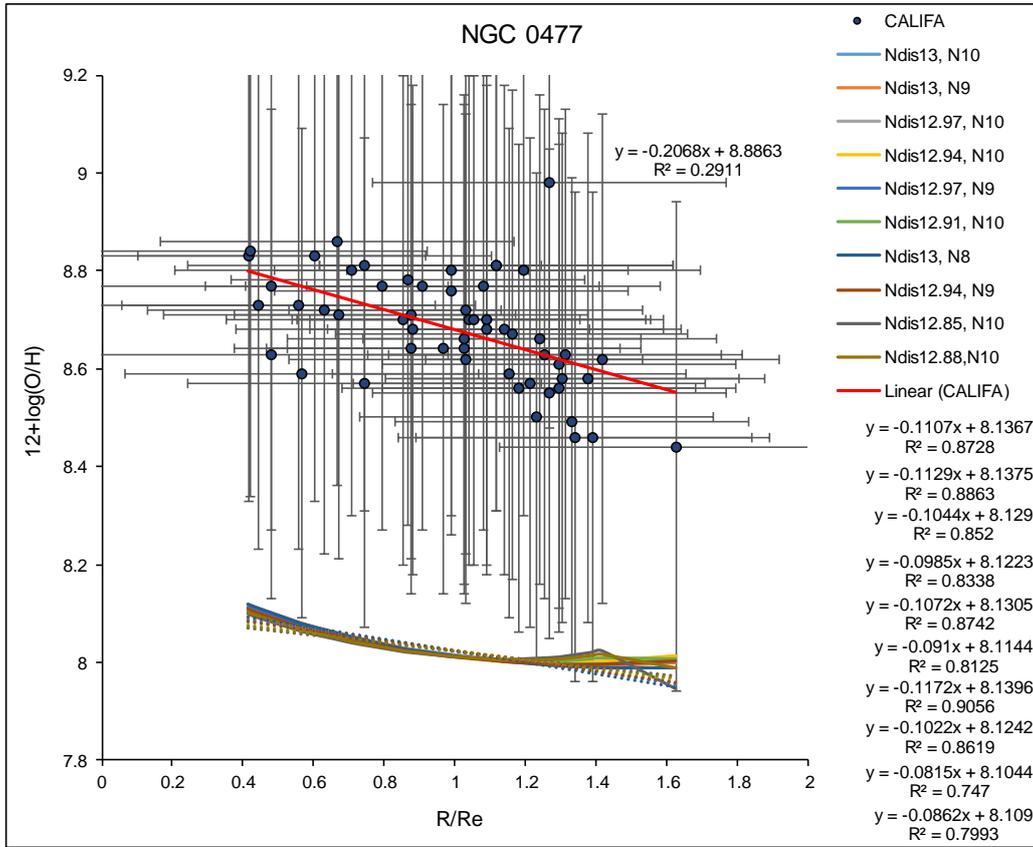


Fig. 9 Gráfica de abundancias de O/H de modelos y CALIFA con rectas de regresión y coeficientes de determinación PARA la galaxia NGC 0477.

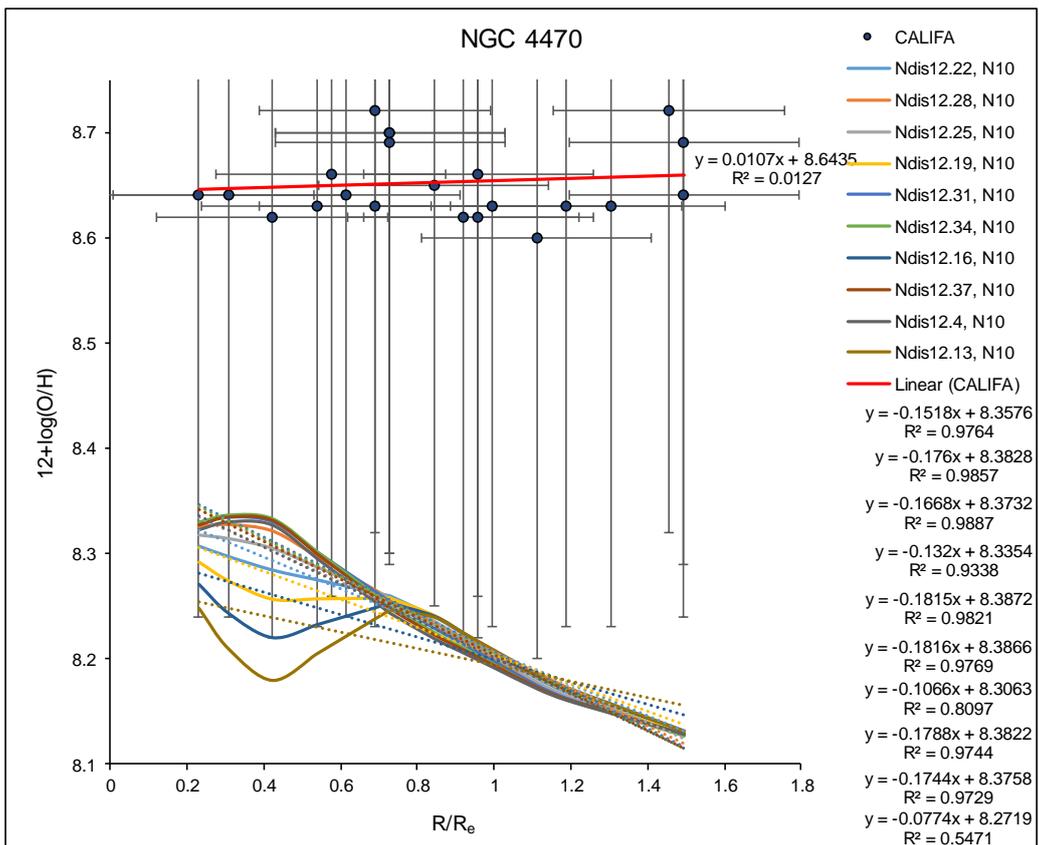


Fig. 10 Gráfica de abundancias de O/H de modelos y CALIFA con rectas de regresión y coeficientes de determinación PARA la galaxia NGC 4470.

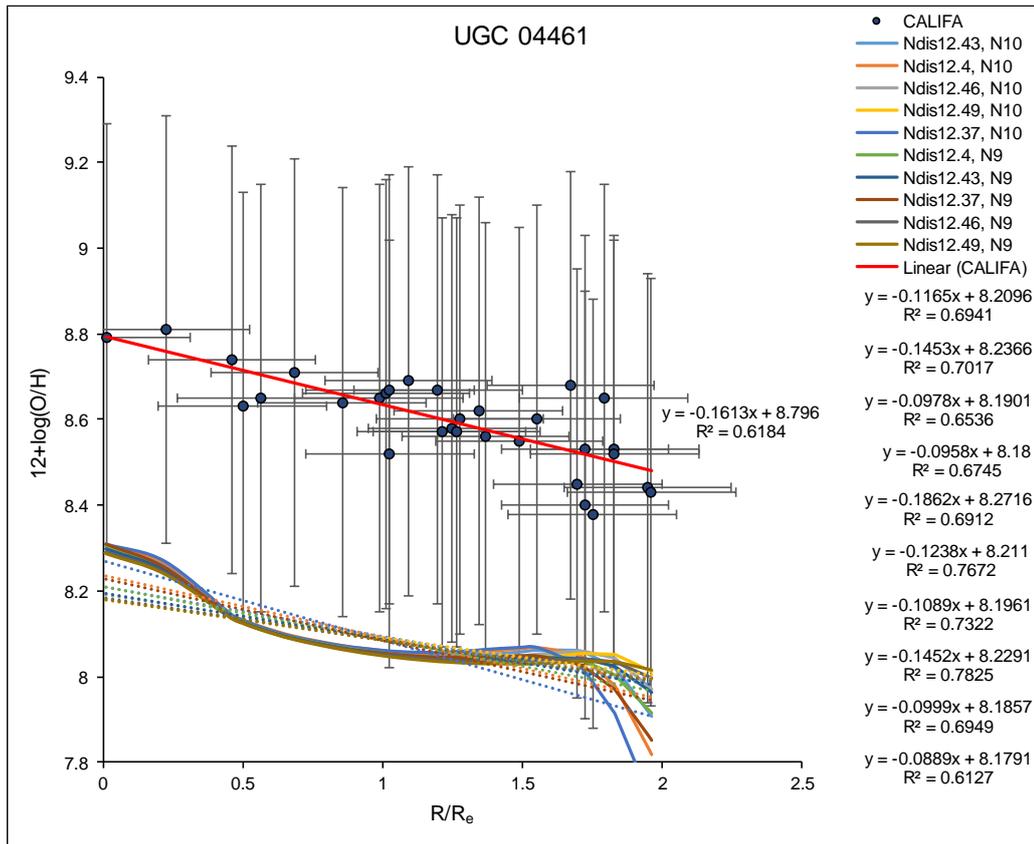


Fig. 11 Gráfica de abundancias de O/H de modelos y CALIFA con rectas de regresión y coeficientes de determinación PARA la galaxia UGC 04461.

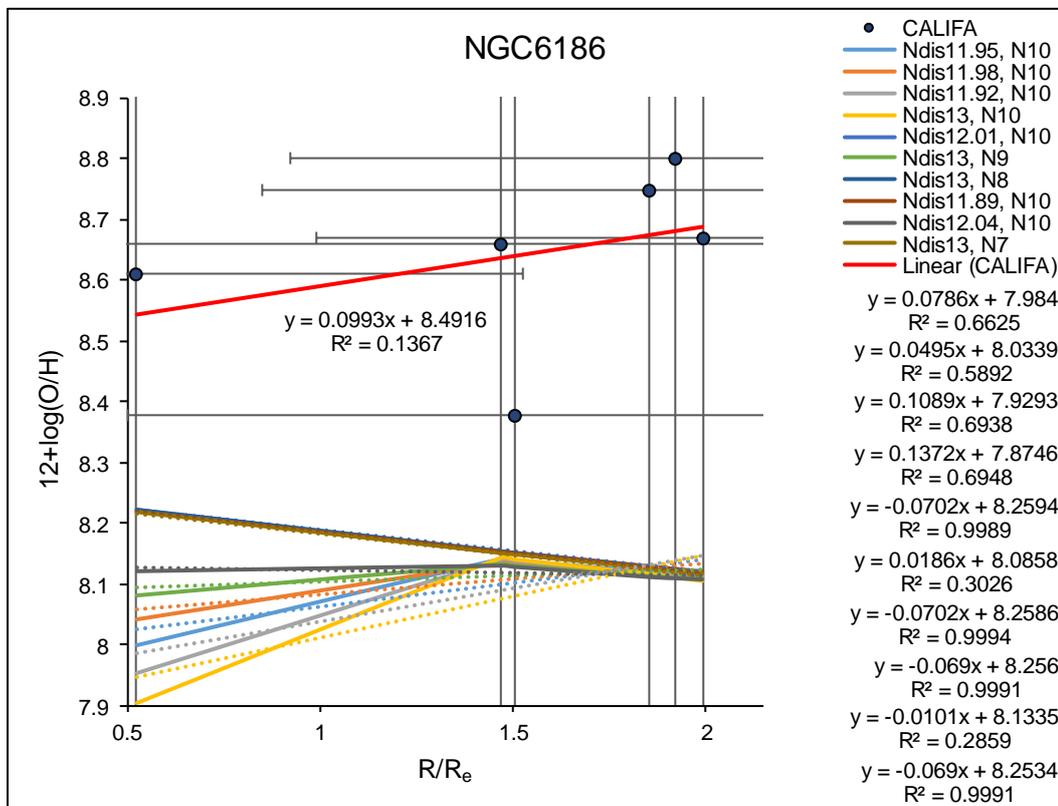


Fig. 12 Gráfica de abundancias de O/H de modelos y CALIFA con rectas de regresión y coeficientes de determinación PARA la galaxia NGC 6186.

Cabe aclarar, que el coeficiente de determinación de N/O y SFR reportado aquí es con respecto a la distribución radial de las galaxias, es decir, con respecto a la relación R/R_e (radio/radio efectivo), mientras que el coeficiente de correlación de N/O y SFR se calcula con los datos teóricos y experimentales de dichas abundancias y tasa de formación de estrellas.

Los MULCHEM que mejor ajustan a los datos CALIFA se determinaron de acuerdo al cálculo de chi cuadrado, χ^2 . Se puede observar que en la Tabla 4, los MULCHEM que mejor ajustan a los datos de abundancias N/O mediante $\log(\text{N/O})$, no corresponden a los modelos que mejor ajustan a los datos de SFR, $\log(\text{SFR})$. Ídem en la Tabla 5 para la abundancia de O/H a través de $\log(\text{O/H})$. También podemos apreciar en dichas tablas los cálculos del coeficiente de correlación de cada modelo con los datos CALIFA para cada Galaxia y, en la Tabla 4, la covarianza correspondiente.

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson como una medida de la relación lineal entre los datos interpolados de las abundancias de N/O y SFR de los modelos y los datos de las abundancias de N/O y SFR de CALIFA. Los resultados de correlación obtenidos y mostrados en la Tabla 2 para las Galaxias NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y NGC 6186, permiten predecir una correlación positiva, toda vez que el coeficiente de correlación arroja valores entre cero y uno, $0 < r < 1$, en todos los casos. Este índice nos permite argumentar el grado de relación entre las variables cuantitativas dadas por los datos teóricos y experimentales, o correlación que existe entre los dos conjuntos de datos. En general, se observa que las abundancias de N/O en las galaxias se correlacionan en forma directa o son dependientes en el siguiente orden: NGC 0477 > NGC 4470 > NGC 6186 > UGC 04461; y, de la misma forma, la SFR en el orden: NGC 4470 > UGC 04461 > NGC 0477 y la galaxia NGC 6186 arroja valores variables de correlación de datos. De la misma manera, para la abundancia de O/H el orden de correlación es en forma global: UGC 04461 > NGC 0477 con correlación positiva o relación directa, mientras que, NGC 6186 > NGC 4470 con correlación negativa, por lo que la relación de los datos en este último caso es inversa, de manera que cuando un dato aumenta el otro dato acostumbra a disminuir o a tener valores más bajos.

De la Tabla 4 podemos decir, que los valores de la abundancia de N/O y los datos observados de CALIFA para las galaxias NGC 0477 y NGC 4470, están fuertemente correlacionados y, en menor grado para la galaxia NGC 6186. De la misma forma, la SFR

aporta datos de correlación fuerte en la galaxia NGC 4470 y, para la Tabla 5 para la abundancia de O/H diremos que los datos están fuertemente relacionados en la galaxia UGC 04461. Podemos observar en esta Tabla 5 que, como el coeficiente de correlación negativo es distante de 1 en las galaxias NGC 4470 y NGC 6186, la relación entre los datos presenta una dependencia débil. En la Tabla 6 se presentan los coeficientes de determinación y las rectas de regresión, de las cuales se obtuvo el promedio de las pendientes de los 10 modelos que mejor ajustan a los datos de las galaxias NGC 0477, NGC 4470, UGC04461 y NGC 6186, el error dado por CALIFA y la desviación estándar.

En todos los casos de la Tabla 4, la covarianza es positiva, lo cual indica que hay una relación directa entre datos teóricos y experimentales, de manera que cuando el valor de una de las variables es más grande, el valor de la otra también suele ser más grande, porque la covarianza analiza los resultados en global, no uno a uno.

De los resultados obtenidos para la abundancia de O/H se tiene que el coeficiente de correlación es alto en los datos que arrojan los 10 modelos que mejor ajustan a los datos CALIFA de la galaxia UGC 04461, mientras que la galaxia NGC 0477 presenta un coeficiente de correlación promedio de 0.40 y las galaxias NGC 4470 y NGC 6186 tienen correlaciones negativas promedio de -0.04 y -0.24, respectivamente (ver Tabla 5).

De la misma forma, de los resultados obtenidos para la abundancia de $\log(N/O)$ se tiene que el coeficiente de correlación es alto en los datos que arrojan los modelos de la galaxia NGC 0477 y sucede lo mismo en la mayoría de los modelos de la galaxia NGC 4470. La correlación de los datos para la galaxia NGC 6186 es de 0.63, pero en la galaxia UGC 04461 la correlación es de 0.38 en promedio para los 10 modelos que mejor ajustan a los datos CALIFA (ver Tabla 4).

Del estudio estadístico del coeficiente de correlación, r , para saber si los datos que aportan los CEMs de N/O y SFR están relacionados con los datos observados y reportados por CALIFA (ver Tabla 4), se obtienen las conclusiones que se muestran en la 4ª columna de la Tabla 7 del Anexo 2.

De la Tabla 7 se discuten los resultados del comportamiento de los datos teóricos y experimentales predichos por los modelos en base a los argumentos que se describen.

Nos centramos en el estudio del nivel de significación del coeficiente r , pero con la restricción para 11 parejas de datos, y si admitimos un 5% de posibilidades de equivocación, con $r > 0.553$, desde ya se puede argumentar que ambas series de datos no son independientes (parece que tienen algún tipo de relación). Si tuviéramos 50

parejas de datos, nos bastaría $r > 0.273$ para obtener la misma conclusión. En forma más estricta, para obtener la conclusión de que los datos teóricos y experimentales no son independientes con un 99% de confianza (1% de posibilidad de error), para 11 parejas necesitamos que el coeficiente de correlación sea de $r > 0.684$ y con 50 parejas $r > 0.354$.

Al respecto de las abundancias de N/O y la tasa de formación de estrellas, SFR, la covarianza que presentan los datos, es decir, del promedio de los productos de desviaciones de cada par de puntos de datos en los dos conjuntos de datos teóricos y experimentales de las 4 galaxias, se puede observar que, en todos los casos, hay dependencia directa (positiva), es decir, a grandes valores de los CEMs corresponden grandes valores de los datos observados y reportados por CALIFA, y lo mismo se verifica para los pequeños valores de los CEMs con los valores de CALIFA. Con esto, se corrobora que datos teóricos y observados tienden a mostrar similar comportamiento, lo que se refleja en un valor positivo de la covarianza y por tanto, expresa la tendencia en la relación lineal entre los datos aportados por los modelos y los datos CALIFA.

Esta covarianza positiva es indicativa del grado de variación conjunta de datos teóricos y observacionales respecto a sus medias y significa la existencia de una dependencia entre ambos tipos de datos, siendo la covarianza el dato necesario para estimar otros parámetros básicos, como el coeficiente de correlación lineal determinado en este trabajo, así como la recta de regresión de los datos que, junto con el coeficiente de determinación, podemos observar en las Figuras 5-8 para la abundancia de N/O en las galaxias NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y, NGC 6186.

Para las galaxias estudiadas existe una clara correlación entre la abundancia de N/O y la distancia radial, de igual forma que en Sánchez et al. (2014) para la abundancia de oxígeno y la distancia radial. Es importante señalar que, siendo el oxígeno el elemento pesado más abundante en el Universo, es el mejor representante de la metalicidad total, y del contenido de metal de una galaxia se puede entender la evolución de las poblaciones estelares a lo largo de la galaxia.

Por otra parte, en las Figs. 2 y 4 podemos apreciar las pendientes negativas de O/N y SFR, respectivamente, de los datos observados de CALIFA para las galaxias: NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y, NGC 6186, mientras que en la Fig. 3 se observan pendientes negativas para abundancias O/H en las galaxias NGC 0477 y UGC 04461. En esta figura,

la galaxia NGC 4470 presenta una pendiente ligeramente positiva que pareciera plana para los datos observados de CALIFA, mientras que los modelos dejan ver una pendiente negativa de O/H y, los datos observados de CALIFA en NGC 6186 muestran pendiente positiva, mientras que los datos teóricos presentan pendiente positiva hasta $R/R_c = 1.5$ kpc, punto después del cual adquieren pendiente negativa.

De las Figs. 2 y 4 podemos hacer una comparación con los resultados obtenidos para las pendientes -gradientes de N/O y O/H del trabajo realizado por Pérez-Montero et al. (2017) para las mismas galaxias que se estudian en el presente trabajo, de lo cual podemos argumentar que, la pendiente N/O promedio para aquellas galaxias con un gradiente O/H positivo, es negativa, aunque es más plana que para toda la muestra de galaxias estudiada por estos autores; en el presente trabajo sucede el mismo comportamiento para las galaxias NGC 4470 y NGC 6186.

De forma similar, Pérez-Montero et al. (2016), reporta que, la pendiente media de O/H para aquellas galaxias con un N/O positivo es negativa, aunque, de nuevo, con un valor más plano en comparación con todas las galaxias, mientras que en este estudio se tiene que la pendiente media de O/H para aquellas galaxias con un N/O negativo es positiva para las galaxias NGC 4470 y NGC 6186 y negativa para las galaxias NGC 0477 y UGC 04461. Estos resultados que aquí se reportan, se pueden deber a la falta de una perfecta correlación entre los gradientes O/H y N/O reportada en el presente trabajo en las Tablas 1-3 y también reportada por Pérez-Montero et al. (2016).

Un estudio más detallado de las pendientes que muestran los gradientes de O/N se presenta en las Figs. 5-8, el cual muestra las rectas de regresión y coeficientes de determinación de los modelos que mejor ajustan a los datos de abundancias de N/O y de los datos observados de CALIFA de las galaxias mencionadas. Lo mismo para abundancias O/H en las Figs. 9-12

Como se puede observar, para la distribución radial de la abundancia de N/O que predicen los modelos en las galaxias, se presentan coeficientes de determinación altos, es decir, el coeficiente de determinación de la galaxia NGC 0477 oscila entre $0.82 > R^2 > 0.76$, lo cual es indicativo de que la calidad de los modelos para replicar los resultados es muy buena, toda vez que la variación de los valores de los datos que predicen los modelos para la distribución radial de la abundancia de N/O en las galaxias estudiadas arroja valores que permiten obtener altos niveles de confianza. Por ejemplo,

para la galaxia NGC 0477 el error esperado reportado por datos de CALIFA oscila entre $0.23 > error_{\log(N/O)} > 0.03$ (ver Tabla 6 de Anexo 2). Como puede observarse en la Fig. 5, los pares de valores de distribución radial y abundancias N/O que predicen los modelos y que se representan mediante las curvas, permiten apreciar que estas son muy cercanas a las líneas de regresión correspondientes, por eso, el coeficiente de determinación adopta valores altos, como se esperaba (Steel and Torrie (1960) y Colin Cameron, et al. (1997)). Estos coeficientes de determinación son aún más altos para las distribuciones radiales de N/O en la galaxia NGC 6186.

Como se puede observar en la Tabla 6, el coeficiente de determinación alto para las galaxias NGC 6186, UGC 04461 y NGC 0477 es indicativo, sobre todo para NGC 6186, de una fuerte correlación entre los datos teóricos y experimentales, por lo cual podemos argumentar que es una relación cuasi directa entre los datos. En este caso, para la galaxia NGC 6186 el intervalo de error predicho por los modelos ($0.006 > error_{\log(N/O)} > 0.0033$) es inferior al observado de la Tabla 6.

Para dos radios de disco efectivos ($2R_e$), las galaxias estudiadas presentan un gradiente negativo de la abundancia de N/O (ver Figuras 2-4), lo cual concuerda con Sánchez et al. (2014) con respecto a la abundancia de oxígeno en las galaxias espirales que ellos analizaron, así como con los resultados de Pérez-Montero, et al. (2016) que muestran que, el análisis de la distribución radial tanto para O/H como para N/O en galaxias que no interactúan revela que ambas pendientes medias son negativas, pero una fracción no despreciable de objetos tiene un gradiente plano o incluso positivo y los objetos tardíos de baja masa tienden a tener pendientes más planas (en este trabajo este fue el caso de la distribución radial de O/H en las galaxias NGC 4470 y NGC 6186).

De Mollá et al. (2006), diferentes regiones o galaxias evolucionan de manera diferente en el plano O/H-N/O, mostrando huellas más pronunciadas cuando la región/galaxia que tiene mayores eficiencias que aquellas con valores bajos que muestran pistas evolutivas planas.

De acuerdo a la Tabla 4, las eficiencias de las galaxias estudiadas en el plano N/O, se presenta en el siguiente orden: NGC 6186 > UGC 04461 > NGC 0477 > NGC 4470. Entonces, la galaxia NGC 6186 presenta huellas más pronunciadas por tener mayores eficiencias (valores menores de N que el resto de las galaxias), siendo NGC 4470 la

galaxia que muestra pistas evolutivas más planas que las otras galaxias por tener los más bajos valores de eficiencias. Asimismo, de acuerdo a la Tabla 5, las eficiencias de las galaxias estudiadas en el plano O/H, se presenta en el siguiente orden: NGC 6186 > NGC 0477 > UGC 04461 > NGC 4470. Se puede apreciar que las galaxias que evolucionan de manera diferente en el plano O/H-N/O son las galaxias NGC 0477, UGC 04461, mientras que, las galaxias NGC 6186 y NGC 4470 muestran el mismo tipo de comportamiento en cuanto al orden de evolución tanto en el plano O/H como en el N/O. Sin embargo, hay gran diferencia en los valores de las eficiencias, siendo eficiencias más bajas en el plano O/H que en el plano N/O (más altos valores de N). Por tanto, las huellas más pronunciadas las presenta la galaxia NGC 6186 en el plano N/O, mientras que la galaxia NGC 4470 muestra la mayor tendencia a pistas evolutivas planas para la abundancia O/H, ya que: la eficiencia de N/O en NGC 6186 > la eficiencia de O/H en NGC 6186 y la eficiencia de N/O en NGC 4470 > la eficiencia de O/H en NGC 4470

En la Fig. 13 se muestran las distribuciones resultantes y la relación entre los coeficientes de correlación de los ajustes lineales a O/H y N/O. Las galaxias NGC 4470 y NGC 6186 presentan un coeficiente negativo para O/H y N/O (el cual resulta de coeficientes de correlación negativos en O/H de dichas galaxias, ver Tabla 5), lo cual encaja en la idea de que tienen mayores abundancias en sus partes internas y valores más bajos a mayores distancias galactocéntricas (Pérez-Montero et al. (2016)). Estos autores aceptan que la producción de N para el contenido de metal de estas regiones es principalmente secundaria y reportan que algunas galaxias espirales presentan también un coeficiente de correlación positivo y que existe una gran dispersión entre O/H y N/O, a este respecto, los resultados que aquí se obtienen se reportan en la Tabla 8 de Anexo 2. En dicha tabla, se puede observar que existe una gran dispersión en las distribuciones radiales de N/O y O/H en todas las galaxias que aquí se reportan. N/O no sigue la tendencia esperada en su relación con O/H en las galaxias NGC 4470 y NGC 6186. A este respecto, Pérez Montero et al. (2016) indica que las variaciones de N/O a través de los discos galácticos pueden dar resultados más precisos para la determinación de las variaciones químicas espaciales a través de dichos discos.

Como se puede apreciar en la Tabla 8, hay un coeficiente de correlación alto para la galaxia UGC 04461 (0.77), seguido de un coeficiente aceptable (0.67) para la galaxia NGC 0477, mientras que los coeficientes de correlación para las galaxias NGC 4470 y NGC 6186 presentan una correlación muy baja. En todos los casos se tienen altas

dispersiones, como era de esperarse, ya que la desviación estándar medida en las galaxias dispone de datos del orden de valores <1 para $\log(N/O)$ y valores de ~ 8 para $12+\log(O/H)$.

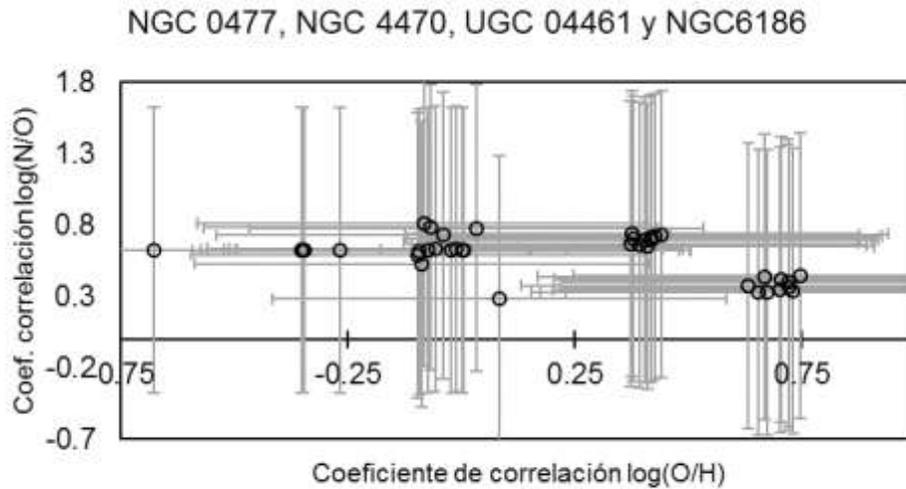


Fig. 13 Gráfica del coeficiente de correlación, r , como relación de la propiedad derivada de los ajustes lineales a través de la escala radial tanto para O/H como N/O de los 10 modelos que mejor ajustan a los datos de galaxias de la muestra CALIFA.

La Fig. 14 muestra las distribuciones y el diagrama de dispersión para los valores de O/H y N/O en el radio efectivo según se calculó a partir de los ajustes lineales con error ponderado. La dispersión y los coeficientes de correlación respectivos para cada galaxia son los descritos en la Tabla 8.

En la Tabla 4 se puede observar que los coeficientes de correlación de N/O son positivos para las galaxias, con esto, se puede argumentar que las galaxias NGC 0477 y UGC 04461 presentan un valor positivo de este coeficiente en la Fig. 13.

En la Tabla 6 se presentan el coeficiente de determinación de $\log(N/O)$ y $\log(O/H)$ predichos por los modelos con respecto a los datos de galaxias de CALIFA (Figs. 5-8), el promedio de las pendientes de las curvas de regresión de los modelos y la desviación estándar para cada galaxia estudiada. En la Fig. 2 se puede apreciar que las galaxias presentan un gradiente negativo para N/O y lo mismo en la Fig. 3 para O/H de las galaxias NGC 0477 y UGC 04461, mientras que NGC 4470 y NGC 6186 exhiben un

gradiente positivo de O/H. En este estudio se encuentra que hasta un máximo de ~ 2 radios efectivos de disco hay un gradiente negativo de la abundancia de N/O en todas las galaxias analizadas (similarmenete al resultado obtenido por Sánchez et al. (2014) para el oxígeno en las galaxias espirales). Un gradiente negativo de N/O indica que a medida que nos alejamos del núcleo galáctico radialmente disminuye la cantidad de N/O de adentro hacia afuera.

En las Figs. 5, 7 y 8 se muestran las rectas de regresión que mejor ajustan a los modelos y los datos de galaxias de CALIFA: NGC 0477, UGC 04461 y NGC 6186, en ellas se puede apreciar que existe alta correlación de las abundancias de N/O con la distribución radial, lo cual indica que se están procesando elementos pesados en las estrellas de esas galaxias por lo que deben de ser tipo tardías. De datos NED¹, se tiene que las galaxias de CALIFA cuyos resultados se presentan en este trabajo, corresponden a galaxias con una edad muy similar a la edad del universo (13.299 Gyr), obviamente una edad menor (ver Tabla 1 del capítulo 3 de Descripción de CALIFA y Tabla 9 de Anexo 2):

La falta de una perfecta correlación entre gradientes O/H y N/O se debe a que la pendiente N/O promedio para galaxias con un gradiente positivo de O/H es negativa (esto sucede en NGC 4470 y NGC6186 y se tienen pendientes N/O negativas para las galaxias: NGC0477, NGC4470, UGC04461 y NGC6186.

La pendiente media para N/O es más pronunciada que para O/H en NGC 0477, UGC 04461 y NGC 6186 (Tabla 6 y Figs. 5-8 para N/O y 9-12 para O/H).

Si la dispersión es muy baja y existe un alto coeficiente de correlación, que de acuerdo a Pérez-Montero et al. (2016) podría significar que los valores esperados típicos de la metalicidad, Z , no son tan sensibles a posibles variaciones internas a través de los discos, entonces los valores característicos O/H y N/O de las galaxias NGC 0477y UGC 04461 son candidatos a cumplir con esta propiedad.

Los valores de O/H y N/O en el radio efectivo también se correlacionan muy estrechamente con luminosidad total y masa estelar de acuerdo a Pérez-Montero, et al. (2016). Los resultados del presente trabajo con respecto a O/H y N/O con la luminosidad total de las galaxias CALIFA permiten argumentar que, existe una ligera tendencia hacia gradientes más planos para O/H y N/O para luminosidades más bajas (como ejemplo, ver galaxia NGC 4470, seguida de la NGC 6186 de Fig. 15 y Tabla 10 de Anexo 2). Esto es

¹ <http://ned.ipac.caltech.edu/forms/byname.html>

más evidente en el caso de N/O (ver galaxias NGC 4470 y NGC 6186 de Figs. 6 y 8). A este respecto, en Pérez Montero et al. (2016), los resultados apuntan a una tendencia hacia pendientes más planas para galaxias menos luminosas y menos masivas, aunque estos autores concluyen que es necesario mejorar la significación estadística de los resultados para confirmar esta tendencia.

Existe una ligera tendencia hacia gradientes más planos para O/H y N/O para luminosidades más bajas

Los resultados de la relación de las abundancias de N/O y O/H con la tasa de formación de estrellas, SFR, se presenta en la Fig. 15 a) y b). En esta figura, se muestran las gráficas de la relación de las abundancias de N/O y O/H con respecto a la SFR con los valores predichos por los modelos. Como se puede observar, la menor dispersión es para la abundancia de N/O en la galaxia UGC 04461, seguida por la galaxia NGC 0477, los otros casos presentan una dispersión alta (coeficiente de determinación bajo) tanto para N/O como para O/H.

De los resultados obtenidos se puede concluir que la dependencia de la SFR con N/O predicha por los modelos que mejor ajustan a los datos, se observa en dos de las cuatro galaxias cuyos datos se reportan en este trabajo. Al respecto de la no dependencia de dicha abundancia con SFR, Pérez-Montero et al. (2016) reporta que podría ser indicativo de que el SFR- Z para cada contenedor de masa se debe a la presencia de entradas de gas pobre en metales/salidas de gas enriquecido, que no afectan a N/O, pero pueden alterar considerablemente tanto el SFR como la Z .

El coeficiente de correlación, r , y la desviación estándar, σ , de N/O y O/H con SFR para las galaxias de la Fig. 15, fue calculada con los valores predichos por los 10 modelos que mejor ajustan a los datos de cada una de ellas y se presentan en la Tabla 11 de Anexo 2. En Pérez-Montero et al. (2016) se puede observar una cierta correlación entre el O/H de las regiones H II individuales y su luminosidad H_{α} (0.17), y de (0.42) para N / O, correlaciones que se atribuyen como debidas a la masa estelar de las galaxias que albergan las regiones H II y al menor promedio LH_{α} para las galaxias menos masivas que para las galaxias más masivas. En este trabajo, se obtienen correlaciones en galaxias individuales que oscilan entre 0.035 y 0.36 para O/H y de 0.30 y 0.78 para N/O como se observa en la Tabla 10.

Lo cual concuerda con el coeficiente de determinación de las gráficas de la Fig. 15, como era de esperarse, aunque, como se puede apreciar, la correlación de NGC 6186 del orden de 0.47 no es comparable con el coeficiente de determinación de 0.0025. Las desviaciones estándar altas entre O/H y SFR que se observan en todos los datos, también eran de esperarse, ya que la diferencia entre sus valores es alta.

En estos casos, Pérez-Montero et al. (2016) argumenta que un transporte interno de gas y su redistribución desde los centros de galaxias hacia las posiciones externas también podrían ser apoyados por la observación del aplanamiento del gradiente de Z más allá de $2 \cdot R_e$ (por ejemplo, Bresolin et al. (2009); Rosales-Ortega et al. (2011), Marino et al. (2012), Sánchez et al. (2014)). Además, se ha observado que una disminución de la Z en las regiones internas de galaxias espirales en el rango radial $0.3-0.5 R_e$ (por ejemplo, Rosales-Ortega et al. (2011), Sánchez et al. (2012b, 2014)) está posiblemente relacionada con un acumulación de gas en anillos, lo que puede hacer que las pendientes resultantes de los gradientes de Z sean más planas.

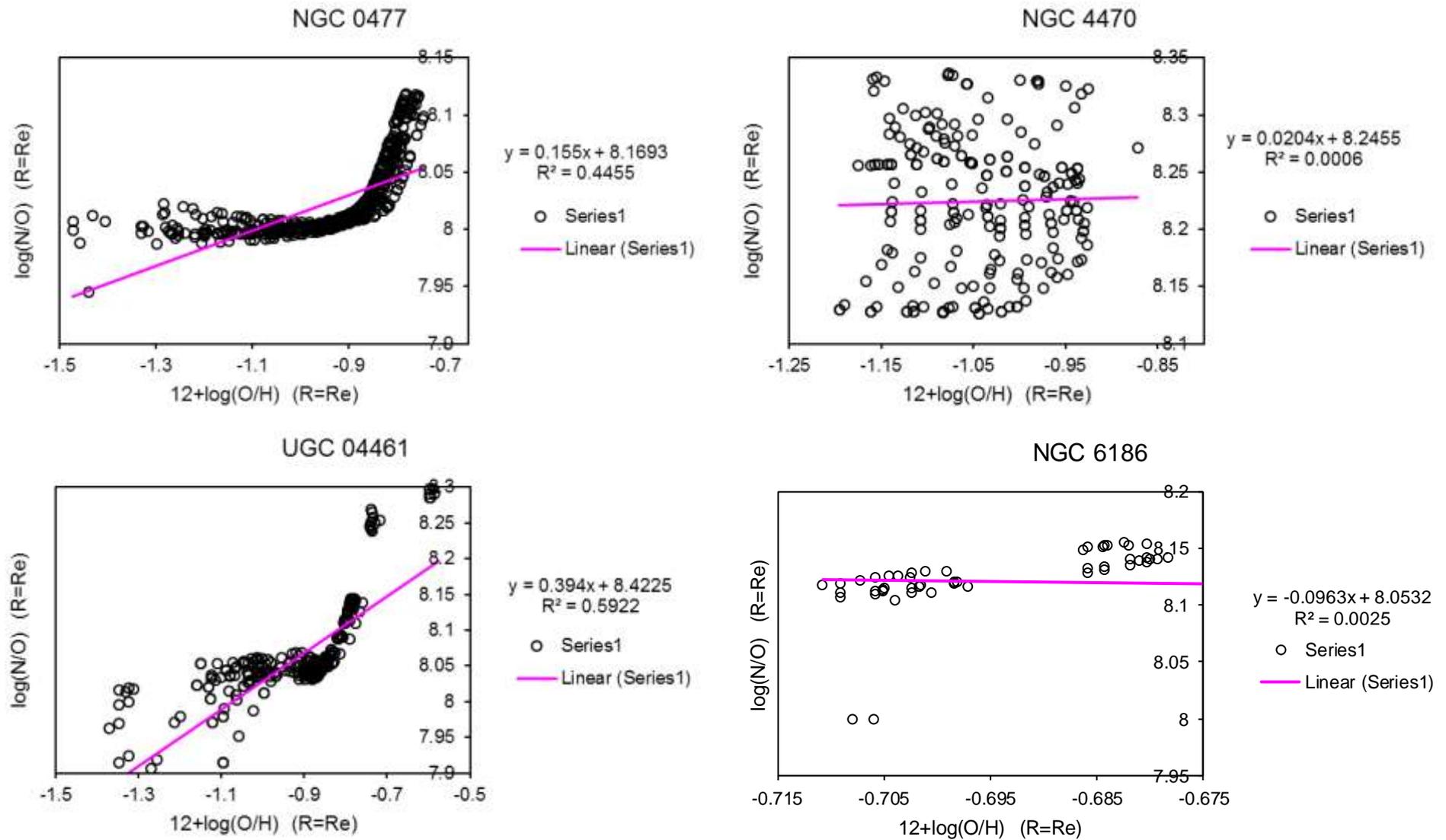


Fig. 14 Gráficas del valor predicho en el radio efectivo de las galaxias, como relación de las propiedades derivadas de los ajustes lineales a través de la escala radial tanto para O/H como N/O, de los 10 modelos que mejor ajustan a los datos de galaxias de la muestra CALIFA.

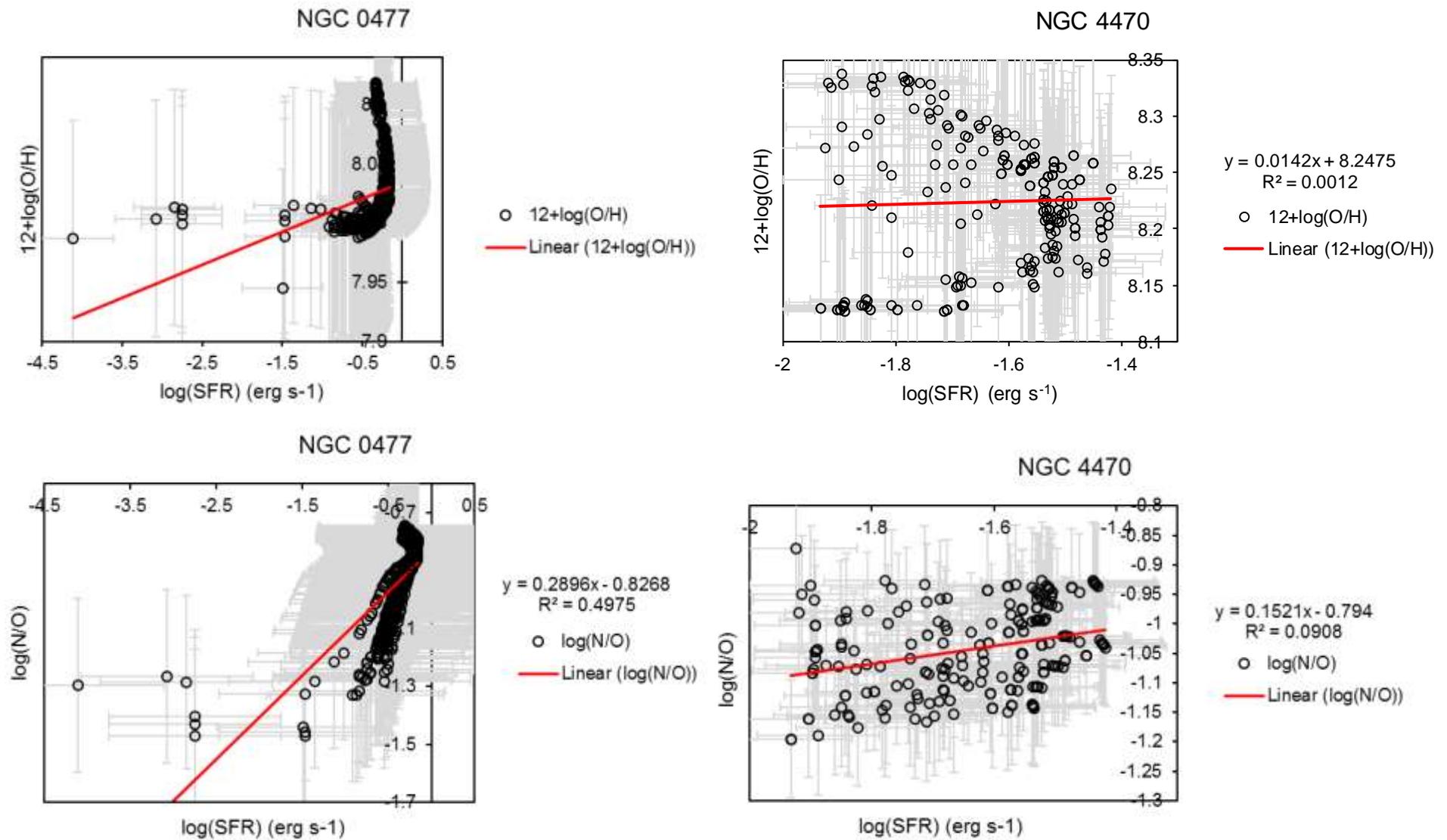


Fig. 15 a). Relación entre la luminosidad H_α transformada a SFR con la relación de Kennicutt, 1994 (Ec. (2)) O/H arriba, y N/O, abajo, para las galaxias NGC 0477 y NGC 4470 para las que se calculó un gradiente lineal.

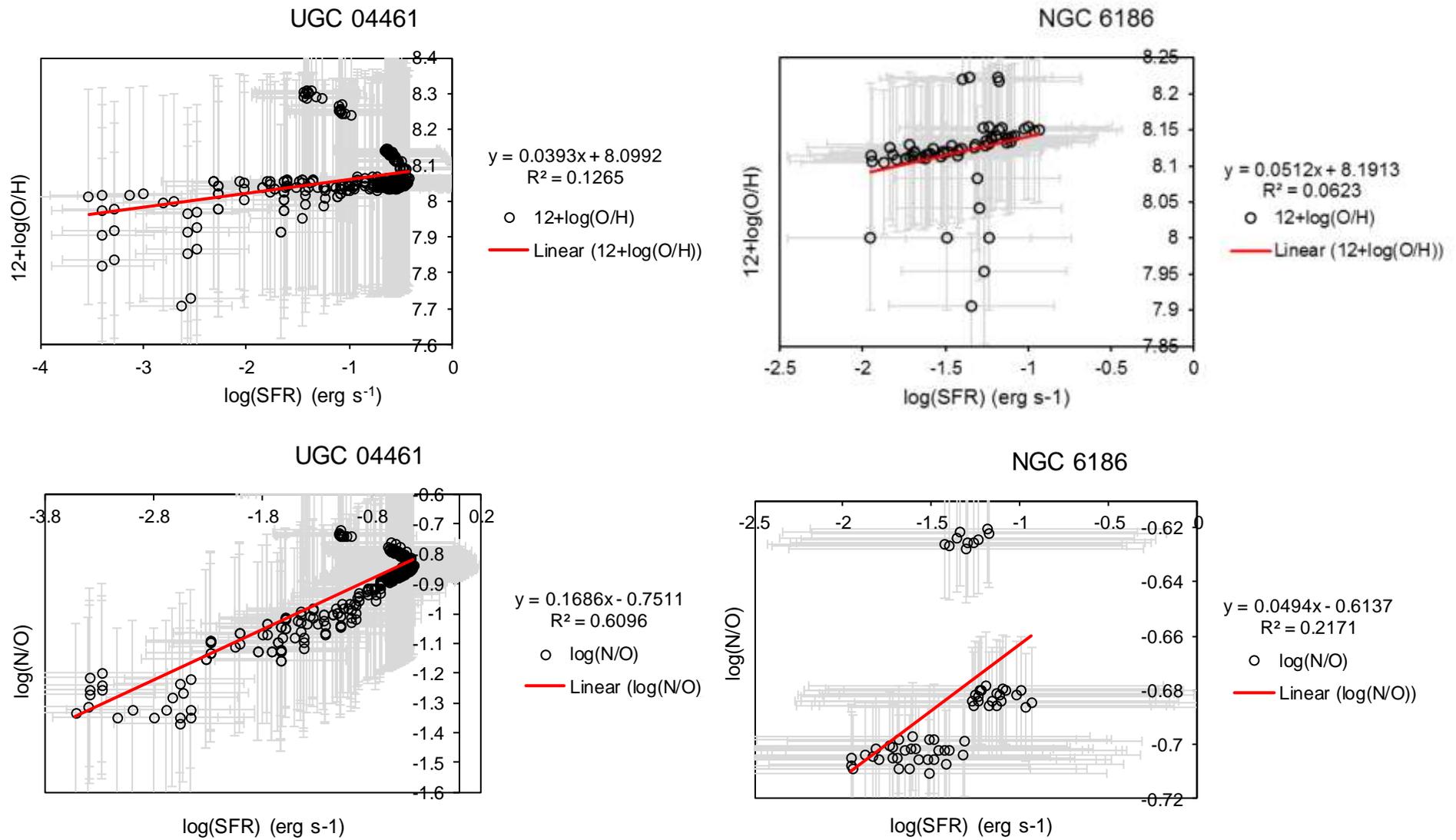


Fig. 15 b). Relación entre la SFR y O/H, arriba, y N/O, abajo, para las galaxias UGC 04461 y NGC 6186 para las que se calculó un gradiente lineal.

7. Conclusiones

8. Agradecimientos

Referencias

1. Barkana R., Loeb A., In the Beginning: The First Sources of Light and the Reionization of the Universe, *Phys. Rept.* 349: 125-238, 2001, doi: 10.1016/S0370-1573(01)00019-9, arXiv:astro-ph/0010468v3
2. Bresolin F., Ryan-Weber E., Kennicutt, R. C., & Goddard, Q. 2009, *ApJ*, 695, 580
3. Bromm V., The Very First Stars: Formation and Reionization of the Universe, Chemical Abundances in the Universe: Connecting First Stars to Planets, *Proceedings IAU Symposium No. 265*, 2009, K Cunha, M. Spite & B. Barbuy, eds., International Astronomical Union 2010. Doi: 10.1017/S1743921310000116
4. Bromm V., Larson R. B., The First Stars, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, vol. 42, Issue 1, pp.79-118, 2004, doi: 10.1146/annurev.astro.42.053102.134034, 2004ARA&A..42...79B
5. Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F. (1957), *Synthesis of the Elements in Stars. Rev. Mod. Phys.* (29).
6. Ciardi B, Ferrara A., The First Cosmic Structures and Their Effects, *Space Science Reviews*, Volume 116, Issue 3-4, pp. 625-705, 2005, Springer, doi: 10.1007/s11214-005-3592-0, 2005, SSRv..116..625C
7. Colin Cameron A., Windmeijer Frank A.G., Gramajo H, Cane DE, Khosla C (1997). An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models. *Journal of Econometrics* 77 (2): 1790-2. PMID 11230695. doi:10.1016/S0304-4076(96)01818-0
8. Chieffi A., Limongi M., 2004, *ApJ*, 608, 405
9. Ferrini F., Matteucci F., Pardi C., Penco U., 1992, *ApJ*, 387, 138
10. Ferrini F., Mollá M., Pardi M. C., Diaz A. I., 1994, *ApJ*, 427, 745

11. Gavilán M., Buell J. F., Mollá M., 2005, A&A, 432, 861
12. Gavilán M., Mollá M., Buell J. F., 2006, A&A, 450, 509
13. Kroupa P., 2001, MNRAS, 322, 231
14. Kennicutt Jr., R. C., & Huchra J. P., 1994, ApJ, 420, 87
15. Kewley L. J., Rupke D., Zahid H. J., Geller M. J., & Barton E. J. 2010, ApJ, 721, L48
16. Limongi M., Chieffi A., 2003, ApJ, 592, 404
17. Marino R. A., Gil de Paz A., Castillo-Morales A., et al. 2012, ApJ, 754, 61
18. Mollá M., Díaz A. I., 2005, MNRAS, 358, 521 (MD05)
19. Mollá M., Vílchez J. M., Gavilán M., & Díaz A. I. 2006, MNRAS, 372, 1069
20. Mollá M., 2014, Adv. Astron., 2014, 162949
21. Mollá M., Cavichia O., Gavilán M., Gibson B. K., 2015, MNRAS, 451, 3693
22. Mollá M., Díaz A., Ascasibar, Y. and Gibson B.K., Galaxy chemical evolution models: the role of molecular gas formation, MNRAS 468, 305–318 (2017), doi:10.1093/mnras/stx419
23. Pérez-Montero E., García-Benito R., Vílchez J. M., Sánchez S. F., Kehrig C., Husemann B., Duarte Puertas S., Iglesias-Páramo J., Galbany L., Mollá M., Walcher C. J., Ascasibar Y., González Delgado R. M., Marino R. A., Masegosa J., Pérez E., Rosales-Ortega F. F., Sánchez-Blázquez P., Bland-Hawthorn J., Bomans D., López-Sánchez Á. R., Ziegler B. and The CALIFA Collaboration, The dependence of oxygen and nitrogen abundances on stellar mass from the CALIFA survey, A&A 595, A62 (2016), DOI: 10.1051/0004-6361/201628601

24. Portinari L., Chiosi C., Bressan A., 1998, A&A, 334, 505
25. Rich J. A., Torrey P., Kewley L. J., Dopita M. A., & Rupke D. S. N., 2012, ApJ, 753, 5
26. Rosales-Ortega F. F., Díaz A. I., Kennicutt R. C., & Sánchez S. F. 2011, MNRAS, 415, 2439
27. Sánchez S. F., Rosales-Ortega F. F., Marino R. A., et al. 2012b, A&A, 546, A2
28. Sánchez S. F. et al., 2014, A&A, 563, A49
29. Sánchez S. F., Rosales-Ortega F. F., Iglesias-Páramo J. et al., “A characteristic oxygen abundance gradient in galaxy disks unveiled with CALIFA,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 563, pp. 49–74, 2014
30. Sánchez M., Estudio individual de gradientes de abundancia en galaxias de la exploración CALIFA, Trabajo de Fin de Máster, Máster Universitario en Astrofísica Universidad Complutense de Madrid, 2016
31. Steel R.G.D, and Torrie J. H., *Principles and Procedures of Statistics with Special Reference to the Biological Sciences.*, McGraw Hill, 1960, pp. 187, 287
32. Talbot R. J., Jr, Arnett W. D., 1973, ApJ 186, 51

Anexo 1

En este Anexo se presenta el programa elaborado en el presente trabajo en código Python para realizar las interpolaciones de las abundancias de N/O y la tasa de formación de estrellas, SFR, de 255 galaxias de CALIFA así como cálculos que incluyen modelos estadísticos como chi cuadrado, χ^2 , para determinar los modelos que mejor ajustan a los datos CALIFA de un grid de 760 modelos.

Código Python

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Mon Sep 18 13:02:42 2017

@author: Leticia Corral Bustamante
"""

"IMPORTAR DATOS Califa"
Archivo1 = []
archivo = open('Ubicación del archive en la PC /Archivo1.txt')
for linea in archivo:
    Archivo1.append(linea.strip().split())
archivo.close()

"IMPORTAR DATOS Archivo2"
Archivo2 = []
archivo = open('Ubicación del archive en la PC /Archivo2.txt')
for linea in archivo:
    Archivo2.append(linea.strip().split())
archivo.close()

"CREAR Y LLENAR MATRIZ DE Ordenamiento"
Ordenamiento = []
for d in range(len(Archivo2)):
    if len(Archivo2) > d+1:
        if float(Archivo2[d][0]) == float(Archivo2[d+1][0]) and float(Archivo2[d][1]) ==
float(Archivo2[d+1][1]):
            for c in range(len(Archivo1)):
                if float(Archivo1[c][0]) > float(Archivo2[d][2]) and float(Archivo1[c][0]) <
float(Archivo2[d+1][2]):

Ordenamiento.append((float(Archivo2[d][0]),float(Archivo2[d][1]),0.,0.,0.,float(Archivo2[
d][2]),float(Archivo2[d][3]),float(Archivo2[d][4]),0.,0.,0.,0.,0.,0.))
```

```
Ordenamiento.append((float(Archivo2[d+1][0]),float(Archivo2[d+1][1]),float(Archivo1
[c][1]),float(Archivo1[c][2]),float(Archivo1[c][0]),float(Archivo2[d+1][2]),float(Archivo2[d+
1][3]),float(Archivo2[d+1][4]),0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.)
```

"Agregar interpolación a matriz de Ordenamiento"

```
for o in range(len(Ordenamiento)):
```

```
    if len(Ordenamiento) > o+1:
```

```
        if o % 2 == 0:
```

```
            Ordenamiento[o+1][8] =
float(Ordenamiento[o][6])+(float(Ordenamiento[o+1][4])-
float(Ordenamiento[o][5]))*(float(Ordenamiento[o+1][6])-
float(Ordenamiento[o][6]))/(float(Ordenamiento[o+1][5])-float(Ordenamiento[o][5]))
```

```
            Ordenamiento[o+1][9] =
float(Ordenamiento[o][7])+(float(Ordenamiento[o+1][4])-
float(Ordenamiento[o][5]))*(float(Ordenamiento[o+1][7])-
float(Ordenamiento[o][7]))/(float(Ordenamiento[o+1][5])-float(Ordenamiento[o][5]))
```

"Agregar varianza y chi2 a matriz de Ordenamiento"

```
contador = 0
```

```
for o in range(len(Ordenamiento)):
```

```
    if o > 0:
```

```
        if (float(Ordenamiento[o][0]) == float(Ordenamiento[o-1][0]) and
float(Ordenamiento[o][1]) == float(Ordenamiento[o-1][1])) or o+1 ==
len(Ordenamiento):
```

```
            contador += 1
```

```
            "Si es el último elemento hago lo mismo, como si hubiera sido else"
```

```
            if o+1 == len(Ordenamiento):
```

```
                "Calculo la varianza de logNo"
```

```
                sumLogNo = 0
```

```
                for p in range(o-contador,o):
```

```
                    sumLogNo += float(Ordenamiento[p][8])
```

```
                promedio = sumLogNo/(contador/2)
```

```
                varianzaLogNo = 0
```

```

for p in range(o-contador,o):
    if p % 2 != 0:
        varianzaLogNo += (float(Ordenamiento[p][8])-(promedio))**2

varianzaLogNo = varianzaLogNo/(contador/2)
for p in range(o-contador,o):
    Ordenamiento[p][10] = varianzaLogNo

"Calculo la varianza de SFR"
sumSFR = 0
for p in range(o-contador,o):
    sumSFR += float(Ordenamiento[p][9])
promedio = sumSFR/(contador/2)

varianzaSFR = 0
for p in range(o-contador,o):
    if p % 2 != 0:
        varianzaSFR += (float(Ordenamiento[p][9])-(promedio))**2
varianzaSFR = varianzaSFR/(contador/2)

for p in range(o-contador,o):
    Ordenamiento[p][12] = varianzaSFR

"Calculo el chi cuadrado de logNo"
chi2logNo = 0
for p in range(o-contador,o):
    chi2logNo += ((float(Ordenamiento[p][2])-
(float(Ordenamiento[p][8])))**2)/varianzaLogNo

for p in range(o-contador,o):
    Ordenamiento[p][11] = chi2logNo

"Calculo el chi cuadrado de SFR"
chi2SFR = 0
for p in range(o-contador,o):

```

```
chi2SFR += ((float(Ordenamiento[p][3])-
(float(Ordenamiento[p][9]))**2)/varianzaSFR
```

```
for p in range(o-contador,o):
```

```
Ordenamiento[p][13] = chi2SFR
```

```
else:
```

```
"Calculo la varianza de logNo"
```

```
sumLogNo = 0
```

```
for p in range(o-contador,o):
```

```
sumLogNo += float(Ordenamiento[p][8])
```

```
promedio = sumLogNo/(contador/2)
```

```
varianzaLogNo = 0
```

```
for p in range(o-contador,o):
```

```
if p % 2 != 0:
```

```
varianzaLogNo += (float(Ordenamiento[p][8])-(promedio))**2
```

```
varianzaLogNo = varianzaLogNo/(contador/2)
```

```
for p in range(o-contador,o):
```

```
Ordenamiento[p][10] = varianzaLogNo
```

```
"Calculo la varianza de SFR"
```

```
sumSFR = 0
```

```
for p in range(o-contador,o):
```

```
sumSFR += float(Ordenamiento[p][9])
```

```
promedio = sumSFR/(contador/2)
```

```
varianzaSFR = 0
```

```
for p in range(o-contador,o):
```

```
if p % 2 != 0:
```

```
varianzaSFR += (float(Ordenamiento[p][9])-(promedio))**2
```

```
varianzaSFR = varianzaSFR/(contador/2)
```

```
for p in range(o-contador,o):
```

```

Ordenamiento[p][12] = varianzaSFR

"Calculo el chi cuadrado de logNo"
chi2logNo = 0
for p in range(o-contador,o):
    chi2logNo += ((float(Ordenamiento[p][2])-(float(Ordenamiento[p][8])))**2)/varianzaLogNo

for p in range(o-contador,o):
    Ordenamiento[p][11] = chi2logNo

"Calculo el chi cuadrado de SFR"
chi2SFR = 0
for p in range(o-contador,o):
    chi2SFR += ((float(Ordenamiento[p][3])-(float(Ordenamiento[p][9])))**2)/varianzaSFR

for p in range(o-contador,o):
    Ordenamiento[p][13] = chi2SFR

contador = 1
else:
    contador += 1

"Agrego Cabecera"
Cabecera = [['NDIS','N','log(N/O)Califa','SFRCalifa','Robs,i','r
(kpc)','log(N/O)','SFR','interpolog(N/O)','interpoSFR','Varianzalog(N/O)','Chi2log(N/O)','
VarianzaSFR','Chi2SFR']]
Resultado = Cabecera + Ordenamiento

"Escribo el resultado en un txt"
with open('Ubicación en la PC/Nombre del Resultado.txt', 'w') as file:
    file.writelines('\t'.join(str(j) for j in i) + '\n' for i in Resultado)

```

Anexo 2

En este Anexo se presentan las tablas de la sección de Resultados y Discusión del presente trabajo. En la Tabla 4 se muestran los valores de las abundancias de N/O y SFR de los diez modelos (de un grid de 760 modelos) que mejor ajustan a los datos de galaxias de CALIFA. De la misma forma, en la Tabla 5 se presentan las abundancias de O/H.

En la Tabla 6 se presentan los coeficientes de correlación y los errores esperados de acuerdo a los datos CALIFA de Pérez-Montero et al. (2016), así como la desviación estándar de N/O y SFR predichas por los modelos MULCHEM de Mollá et al. (2017). La Tabla 7 muestra las conclusiones que se obtienen de la correlación de los 10 modelos que mejor ajustan a los datos de las galaxias NGC 0477, NGC 4470, UGC 04461 y NGC 6186 de CALIFA. La Tabla 8 presenta la correlación de abundancias de N/O-O/H y su desviación estándar. La Tabla 9 presenta información de la edad de las galaxias para las que se estudió la relación de N/O con SFR. La Tabla 10 describe la relación de las abundancias N/O y O/H con la luminosidad, $L(H_\alpha)$ y, finalmente, la Tabla 11 presenta el coeficiente de correlación y desviación estándar de las abundancias N/O y O/H.

Tabla 4 Los diez modelos que mejor ajustan a los datos CALIFA para las abundancias N/O y la tasa de formación de estrellas, SFR, de acuerdo a los cálculos de chi cuadrado, χ^2 . Coeficiente de correlación, r , y covarianza ($Cov(\log(N/O)_{\text{mod}}, \log(N/O)_{\text{CALIFA}})$ y $Cov(\log(SFR)_{\text{mod}}, \log(SFR)_{\text{CALIFA}})$), entre cada modelo y datos de galaxias CALIFA.

<i>Ndis</i>	<i>N</i>	$\chi^2_{\log(N/O)}$	<i>r</i>	$Cov_{N/O}$	<i>Ndis</i>	<i>N</i>	$\chi^2_{\log(SFR)}$	<i>r</i>	Cov_{SFR}
NGC 0477									
12.4	6	310.86	0.71	0.02	12.31	1	12399.61	0.34	0.14
12.46	7	316.68	0.72	0.02	12.31	2	12403.37	0.34	0.14
12.43	7	344.62	0.70	0.02	12.31	3	12420.53	0.34	0.14
12.37	6	352.14	0.66	0.02	12.31	4	12584.22	0.34	0.14
12.37	5	353.984	0.69	0.02	12.4	1	12906.3	0.32	0.08
12.43	6	357.75	0.74	0.02	12.4	2	12911.36	0.32	0.08
12.49	7	363.99	0.74	0.02	12.4	3	12935.52	0.32	0.08
12.34	5	377.04	0.65	0.02	12.31	5	12967.96	0.34	0.34
12.52	8	380.28	0.70	0.02	12.4	4	13053.60	0.32	0.09
12.34	4	394.99	0.67	0.02	12.25	1	13068.03	0.36	0.20
NGC 4470									
11.38	10	11.62	0.73	0.0022	11.08	8	328.66	0.67	0.12
11.35	10	18.26	0.78	0.0025	10.96	3	347.11	0.67	0.13
11.41	10	33.35	0.63	0.0018	11.05	7	347.68	0.65	0.12
11.32	10	48.16	0.63	0.0028	10.96	4	348.57	0.69	0.14
11.44	9	54.97	0.81	0.0017	11.02	7	348.58	0.70	0.16
11.41	9	55.38	0.53	0.0022	10.96	2	350.19	0.67	0.13
11.38	9	70.80	0.78	0.0037	10.96	1	352.64	0.67	0.13
11.32	7	75.82	0.62	0.0026	10.99	5	354.01	0.65	0.13
11.41	8	78.50	0.59	0.0025	11.02	6	359.35	0.64	0.12
11.47	9	82.27	0.28	0.0012	10.99	6	365.27	0.69	0.16
UGC 04461									
12.07	6	314.28	0.42	0.0088	11.77	3	1864.16	0.46	0.16
12.04	5	317.47	0.40	0.0076	11.77	2	1864.95	0.45	0.16
12.1	6	319.24	0.44	0.0082	11.77	1	1866.11	0.45	0.16

Tabla 4 Los diez modelos que mejor ajustan a los datos CALIFA para las abundancias N/O y la tasa de formación de estrellas, SFR, de acuerdo a los cálculos de chi cuadrado, χ^2 . Coeficiente de correlación, r , y covarianza ($Cov(\log(N/O)_{\text{mod}}, \log(N/O)_{\text{CALIFA}})$ y $Cov(\log(SFR)_{\text{mod}}, \log(SFR)_{\text{CALIFA}})$), entre cada modelo y datos de galaxias CALIFA.

<i>Ndis</i>	<i>N</i>	$\chi^2_{\log(N/O)}$	<i>r</i>	$Cov_{N/O}$	<i>Ndis</i>	<i>N</i>	$\chi^2_{\log(SFR)}$	<i>r</i>	Cov_{SFR}
12.01	5	322.52	0.38	0.0084	11.77	4	1941.35	0.46	0.17
12.01	4	325.86	0.37	0.0071	11.83	4	1968.45	0.36	0.09
11.98	3	331.68	0.34	0.0073	11.83	2	1969.89	0.34	0.09
11.98	4	336.37	0.35	0.0080	11.83	3	1970.10	0.35	0.09
12.16	7	337.10	0.45	0.0094	11.83	1	1970.83	0.34	0.08
11.98	2	337.52	0.33	0.0071	11.83	5	1994.08	0.38	0.10
11.98	1	337.90	0.33	0.0072	11.83	6	2090.10	0.41	0.13
NGC 6186									
12.94	3	0.46	0.63	0.0010	11.26	8	155.96	0.34	0.04
12.94	1	0.47	0.63	0.0010	11.23	8	160.20	0.44	0.07
12.94	2	0.47	0.63	0.0010	11.32	9	164.02	0.30	0.04
12.94	4	0.47	0.63	0.001	11.2	7	168.22	0.34	0.05
12.91	4	0.47	0.62	0.0010	11.29	9	172.88	0.40	0.02
12.91	1	0.47	0.63	0.0010	11.23	7	173.91	0.20	0.02
12.91	5	0.47	0.62	0.0010	11.29	8	181.42	0.20	0.02
12.91	2	0.47	0.62	0.0010	11.2	6	184.68	0.11	0.01
12.91	3	0.47	0.62	0.0010	11.17	6	189.02	0.28	0.04
12.88	5	0.47	0.62	0.0011	11.35	9	191.62	0.17	0.02

Tabla 5 Los diez modelos que mejor ajustan a los datos CALIFA para las abundancias O/H de acuerdo a los cálculos de chi cuadrado, χ^2 . Coeficiente de correlación, r , entre cada modelo y datos CALIFA de Galaxias.

<i>Ndis</i>	<i>N</i>	$\chi^2_{\log(N/O)}$	<i>r</i>	<i>Ndis</i>	<i>N</i>	$\chi^2_{\log(O/H)}$	<i>r</i>
NGC 0477				NGC 4470			
13	10	68658.54	0.42	12.22	10	16114.94	-0.04
13	9	68909.80	0.43	12.28	10	16114.95	-0.07
12.97	10	68975.28	0.40	12.25	10	16144.00	-0.06
12.94	10	69170.03	0.39	12.19	10	16147.36	-0.02
12.97	9	69201.37	0.42	12.31	10	16224.06	-0.09
12.91	10	69298.39	0.38	12.34	10	16232.32	-0.09
13	8	69349.10	0.44	12.16	10	16235.59	0.03
12.94	9	69464.20	0.41	12.37	10	16284.83	-0.09
12.85	10	69473.00	0.38	12.4	10	16352.86	-0.10
12.88	10	69478.73	0.37	12.13	10	16399.29	0.08
UGC 04461				NGC 6186			
<i>Ndis</i>	<i>N</i>	$\chi^2_{\log(N/O)}$	<i>r</i>	<i>Ndis</i>	<i>N</i>	$\chi^2_{\log(O/H)}$	<i>r</i>
12.43	10	38767.26	0.70	11.95	10	5887.59	-0.02
12.4	10	38856.38	0.72	11.98	10	5907.35	-0.07
12.46	10	39024.17	0.67	11.92	10	5917.45	0.0020
12.49	10	39428.86	0.63	13	10	5960.37	0.0043
12.37	10	39539.81	0.72	12.01	10	5965.22	-0.35
12.4	9	39633.76	0.73	13	9	5977.18	-0.27
12.43	9	39740.47	0.70	13	8	5989.83	-0.35
12.37	9	39970.57	0.75	11.89	10	6024.43	-0.35
12.46	9	40000.75	0.67	12.04	10	6024.90	-0.68
12.49	9	40297.61	0.65	13	7	6035.72	-0.35

Tabla 6 Coeficiente de determinación y error esperado para las abundancias de N/O, tasa de formación de estrellas, SFR, y abundancias O/H en 4 galaxias.

Galaxia	Coeficiente de determinación de los 10 modelos que mejor ajustan a los datos	Coeficiente de determinación, R^2 , de datos CALIFA	Error de datos CALIFA (error esperado para la población)	Desviación estándar Modelos MULCHEM-CALIFA	Promedio de las pendientes (Figs. 5-8)
Abundancias de N/O					
NGC 0477	$0.82 > R^2 > 0.76$	0.51	$0.23 > error_{\log(N/O)} > 0.03$	0.15	-0.41
NGC 4470	$0.75 > R^2 > 0.05$	0.72	$0.14 > error_{\log(N/O)} > 0.0$	0.08	-0.08
UGC 04461	$0.89 > R^2 > 0.75$	0.34	$0.16 > error_{\log(N/O)} > 0.0$	0.16	-0.26
NGC 6186	$0.99 > R^2 > 0.99$	0.41	$0.18 > error_{\log(N/O)} > 0.0$	0.04	-0.06
Tasa de formación de estrellas, SFR					
NGC 0477	$0.32 > R^2 > 0.27$	0.44	$> error_{\log(SFR)} >$	0.84	-1.32514

Tabla 6 Coeficiente de determinación y error esperado para las abundancias de N/O, tasa de formación de estrellas, SFR, y abundancias O/H en 4 galaxias.

Galaxia	Coeficiente de determinación de los 10 modelos que mejor ajustan a los datos	Coeficiente de determinación, R^2 , de datos CALIFA	Error de datos CALIFA (error esperado para la población)	Desviación estándar Modelos MULCHEM-CALIFA	Promedio de las pendientes (Figs. 5-8)
NGC 4470	$0.47 > R^2 > 0.35$	0.66	$> error_{\log(SFR)} >$	0.43	-0.5762
UGC 04461	$0.40 > R^2 > 0.26$	0.77	$> error_{\log(SFR)} >$	0.69	-0.75598
NGC 6186	$0.50 > R^2 > 0.18$	0.88	$> error_{\log(SFR)} >$	0.04	-0.27709
Abundancias de O/H					
NGC 0477	$0.91 > R^2 > 0.75$	0.29	$> error_{\log(O/H)} >$	0.19	-0.25
NGC 4470	$0.99 > R^2 > 0.55$	0.01	$> error_{\log(O/H)} >$	0.14	-0.15

Tabla 6 Coeficiente de determinación y error esperado para las abundancias de N/O, tasa de formación de estrellas, SFR, y abundancias O/H en 4 galaxias.

Galaxia	Coeficiente de determinación de los 10 modelos que mejor ajustan a los datos	Coeficiente de determinación, R^2 , de datos CALIFA	Error de datos CALIFA (error esperado para la población)	Desviación estándar Modelos MULCHEM-CALIFA	Promedio de las pendientes (Figs. 5-8)
UGC 04461	$0.78 > R^2 > 0.61$	0.62	$> error_{\log(O/H)} >$	0.17	-0.12
NGC 6186	$0.99 > R^2 > 0.29$	0.14	$> error_{\log(O/H)} >$	0.17	0.01

Tabla 7 Relación que presentan los datos de abundancias de N/O predichos por los MULCHEM de Mollá et al. (2017) y los datos observados de CALIFA de acuerdo al coeficiente de correlación.

Galaxia	No. de datos de cada modelo	Coeficiente de correlación, r	Comportamiento de datos teóricos y experimentales
<hr/>			
log(N/O)			
NGC 0477	59	$0.65 < r < 0.74$	Existe una fuerte correlación entre ambas series de datos.
NGC 4470	36	$0.28 < r < 0.81$	Existe fuerte correlación la mayoría de ambas series de datos.
UGC 04461	39	$0.33 < r < 0.45$	Existe correlación positiva entre ambas series de datos.
NGC 6186	10	$0.62 < r < 0.63$	Existe correlación positiva adecuada entre los datos
<hr/>			
log(SFR)			
NGC 0477	59	$0.32 < r < 0.36$	Existe dependencia débil entre ambas series de datos.
NGC 4470	36	$0.64 < r < 0.70$	Existe una fuerte correlación entre ambas series de datos.
UGC 04461	39	$0.34 < r < 0.46$	Existe correlación positiva entre ambas series de datos.
NGC 6186	10	$0.0 < r < 0.44$	Pareciera que no existe algún tipo de correlación entre los datos con este criterio, sin embargo, el cálculo de covarianza, la recta de regresión y coeficiente de determinación permite verificar que si existe relación entre ellos, incluso esta galaxia presenta las mayores eficiencias.

Tabla 8 Valores del índice de correlación, r , para medir el grado de relación de N/O y O/H y su correspondiente desviación estándar como medida de dispersión aplicada a los datos.

Galaxia	Coefficiente de correlación, r , de N/O-O/H	Desviación estándar de N/O-O/H
NGC 0477	0.667435	4.484032
NGC 4470	0.025262	4.638868
UGC 04461	0.769521	4.495774
NGC 6186	-0.04978	4.419916

Tabla 9 Edad de las galaxias cuyos resultados de la relación de N/O con SFR se reporta en este trabajo.

Galaxia	Edad
NGC 0477	Edad en Redshift 0.018713: 13.051 Gyr
NGC 4470	Edad en corrimiento al rojo 0.008936: 13.180 Gyr
UGC 04461	Edad en Redshift 0.017111: 13.072 Gyr
NGC 6186	Edad en corrimiento al rojo 0.009928: 13.167 Gyr

Tabla 10 Relación de abundancias de N/O y O/H con la tasa de formación de estrellas con los 10 modelos que mejor ajustan a los datos de galaxias de CALIFA.

Galaxia	N/O	O/H	Luminosidades, $L(H_\alpha)$
NGC 0477	$-0.74 > \log(N/O) > -1.47$	$8.12 > \log(O/H) > 7.95$	$40.27 > LH_\alpha > 38.35$
NGC 4470	$-0.87 > \log(N/O) > -1.20$	$8.34 > \log(O/H) > 8.13$	$39.96 > LH_\alpha > 38.17$
UGC 04461	$-0.57 > \log(N/O) > -1.37$	$8.31 > \log(O/H) > 7.71$	$40.72 > LH_\alpha > 38.33$
NGC 6186	$-0.62 > \log(N/O) > -0.71$	$8.22 > \log(O/H) > 7.91$	$40.93 > LH_\alpha > 38$

Tabla 11 Correlación, r , y la desviación estándar, σ de abundancias de N/O y O/H y la tasa de formación de estrellas, SFR, calculadas con los 10 modelos que mejor ajustan a los datos de galaxias de CALIFA.

Galaxia	N/O		O/H	
	r	σ	r	σ
NGC 0477	0.705342	0.379175	0.293811	4.21243
NGC 4470	0.301264	0.315437	0.034984	4.934053
UGC 04461	0.780749	0.502337	0.355738	4.566442
NGC 6186	0.465954	0.412732	0.249668	4.790039