

Combinación de datos interferométricos y grandes radiotelescopios para estudios multiescala de regiones de formación estelar

Daniel Jacobo Díaz González, Estudiante de Doctorado en Ciencias (Astrofísica)
Supervisores: Dr. Roberto Galván Madrid, Dr. Stanley Eugene Kurtz Smith
INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

1. Introducción

Las estrellas masivas juegan un papel fundamental en muchos procesos del Universo. De estas estrellas surgen elementos pesados y radiación ultravioleta; la combinación de vientos, eyecciones, la expansión de las regiones HII o las explosiones de supernova tienen una importancia capital en el enriquecimiento del medio y en la generación de turbulencia; los rayos cósmicos, la radiación ultravioleta y la disipación de la turbulencia ya mencionada son las principales causas del calentamiento del medio interestelar, al mismo tiempo que los elementos pesados son responsable del enfriamiento de ese mismo medio debido al reprocesamiento de la radiación; la función de luminosidad está dominada por las estrellas masivas; todo ello justifica ampliamente el estudio y observación de estas estrellas masivas y sus procesos de formación.

Para la observación de estas estrellas masivas debemos tener en cuenta varias cosas:

- Estas estrellas masivas raramente se forman de manera aislada; suelen estar agrupadas, interactuando entre sí en múltiples formas (interacción gravitatoria, vientos, eyecciones de masa) (10).
- Las estrellas de alta masa son escasas debido a dos razones: 1) la función inicial de masa indica que el número de estrellas es muy superior al número de estrellas de alta masa; 2) además, debido a su alta masa, sus tiempos de vida son más cortos.
- También debido a su alta masa, son estrellas muy luminosas, lo que nos permite estudiarlas a grandes distancias.
- Al estar a grandes distancias y formarse en grupos, la resolución angular necesaria para su estudio suele ser muy alta; por poner un ejemplo, para resolver estructuras de 0.025 pc a 5 kpc de distancia es necesaria una resolución de 1 arcsec.
- Se ha demostrado que las estructuras dentro de las que se forman las estrellas masivas están embebidas en estructuras de mayor escala, cuyo estudio resulta de mucho interés para entender el proceso general de la formación de estrellas de alta masa (18) (3).

Hay un consenso en que la formación estelar comienza generalmente con el colapso del gas en un **núcleo grumoso** denso que se ha formado dentro de una nube molecular gigante (5) (4) (15). A su vez, dentro de estos núcleos grumosos o clumps, podemos encontrar estructuras de menor tamaño y mayor densidad (7). Podemos de esta forma distinguir al menos tres escalas dentro de la formación estelar masiva. En primer lugar encontramos las **nubes moleculares**

gigantes (GMC), donde ocurre en general todo aquel proceso de formación estelar. Estas nubes moleculares van a ser los objetos de mayor escala de nuestro estudio. Las nubes moleculares gigantes de nuestra galaxia tienen, típicamente, masas del orden de $10^{4-6} M_{\odot}$, tamaños de entre 20 y 100 pc, y unas densidades de 10^2 cm^{-3} (17) (8). A continuación podemos encontrar los **clumps**, estructuras donde van a surgir los cúmulos estelares y las asociaciones estelares. El tamaño linear de estos núcleos suele estar en el rango de 0.3 - 1.0 pc (14) (13) (12), su temperatura cinética en el rango de los 20-50 °K, la densidad promedio molecular en el rango de $2 \times 10^4 - 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ y las masas en el rango $10^3 - 3 \times 10^4 M_{\odot}$. Y por último tenemos los **núcleos o cores**, considerados como los progenitores de las estrellas individuales y los sistemas estelares múltiples ligados gravitacionalmente; son estructuras con diámetros $< 0.1 \text{ pc}$ (14) (13) (12), con las masas en el rango de las 1 – 100 M_{\odot} y densidades promedio $> 10^6 \text{ cm}^{-3}$. La nueva generación de surveys como aquellos en los que estaremos trabajando alcanzan a ser completos hasta unas pocas masas solares a distancias de kpc.

Esta tesis se va a centrar precisamente en el estudio de estas estructuras y las relaciones existentes entre ellas, buscando la caracterización de parámetros como la cantidad, la distribución de las masas, la distribución espacial, propiedades morfológicas y el tamaño en una muestra de nubes moleculares.

2. Estado del arte y objetivos

Dentro de los múltiples problemas que se pueden abarcar dentro del estudio de la formación de estrellas de alta masa, nosotros vamos a centrarnos en la formación, evolución y jerarquización de los clumps, y en su relación con las nubes que los contienen a ellos y con los núcleos que, a su vez, ellos contienen. La utilización de la combinación de datos de distintos instrumentos en una única imagen puede suponer una gran ayuda en la identificación de estas estructuras a distinta escala, facilitando el estudio de las relaciones jerárquicas entre las mismas.

En los últimos años hemos visto como cada vez son más frecuentes los trabajos que utilizan esta combinación de instrumentos para presentar resultados de alto interés, y con distintos objetivos: mapas de velocidad, estudios de fragmentación, estimación de masas o caracterización de densidades columnares y cálculos de índices de opacidad son algunas de las aplicaciones que has sido presentadas en los últimos años.

De esta forma, en Galván-Madrid et al. (7) se realizó un mapeo multiescala de la GMC W49A, abarcando desde una escala $\gtrsim 100 \text{ pc}$ hasta las escalas de los cores individuales ($\lesssim 0.03 \text{ pc}$), utilizando datos del Submillimeter Array, del Purple Mountain Observatory 14 m, del Very Large Array, del JCMT-SCUBA, del IRAM30m y del Caltech Submillimeter Observatory BOLOCAM Galactic Plane Survey para cubrir las distintas escalas. Entre otros resultados, se obtuvieron mapas de velocidad de CO y determinaron la existencia de una estructura filamentosa que se replica a todas las escalas, centrada en los cores.

Estas estructuras fueron reportadas también en Lin et al. (11), donde las determinaron utilizando un algoritmo de dendrogramas para su identificación. Para ello combinaron imágenes milimétricas y submilimétricas de nubes moleculares formando cúmulos con estrellas tipo OB, provenientes de radiotelescopios (CSO, JCMT, APEX, IRAM30m) y telescopios espaciales (Herschel y Planck); se estudiaron hasta 7 regiones de formación estelar (W49A, W43-Main, W43-South, W33, G10.6-04, G10-2-0.3, y G10.3-0.1), consiguiendo caracterizar para las fuentes seleccionadas la densidad columnar de polvo, la temperatura, la distribución del índice de opacidad del polvo, la función de distribución de densidad columnar del gas, la función de correlación de dos puntos en los mapas de polvo y la ya mencionada identificación de estructuras utilizando el algoritmo de dendrogramas.

También se ha hecho uso de esta técnica de combinación en trabajos para el estudio de la

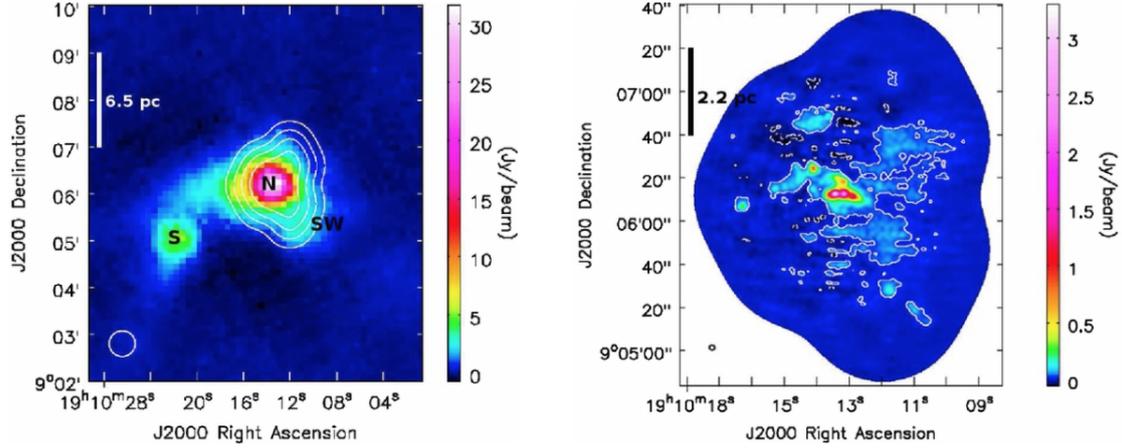


Figura 1: Combinación de datos de SMA y BOLOCAM en la banda de 1.3 mm. Esta combinación no fue del todo exitosa porque la cobertura de Fourier de los datos de SMA es inferior a la de ALMA, y también porque la cámara BOLOCAM y antena CSO tienen un campo de visión menor y son menos sensibles que datos con la nueva cámara MUSTANG-2 en el GBT (7)

fragmentación. En Ahmadi et al. (1) utilizan los datos del interferómetro IRAM NOEMA junto a los datos de la antena IRAM30m para el estudio de la fuente W3(H₂O) para identificar la fragmentación a gran escala del core e indicios de posibles fragmentaciones de disco a pequeñas escalas.

Otro trabajo que nos gustaría destacar es Koda et al. (9); en este trabajo no se combinan varios instrumentos, sino que se combinan distintas configuraciones de ALMA, usando las configuraciones más compactas para recuperar emisión más extendida. Sin embargo, no podemos dejar de comentar que este procedimiento presenta varios inconvenientes:

- La carencia de bolómetros en ALMA es una limitación importante, ya que hace totalmente inviable la recuperación de toda la emisión.
- La sensibilidad que podemos alcanzar con las antenas de estos arrays es muy inferior a la que obtenemos con los grandes radiotelescopios de plato único (GBT, GTM, IRAM30m, Effelsberg).
- No hay una estandarización en la aplicación de la técnica.

Nuestro objetivo durante esta tesis es combinar datos de interferómetros con datos de grandes radiotelescopios de single-dish, buscando aprovechar lo mejor de los dos mundos, utilizando la alta sensibilidad de los grandes radiotelescopios sin renunciar a la alta resolución espacial que ofrecen los interferómetros, todo ello de una forma sistemática y automatizada, que permita la explotación de una gran cantidad de datos de forma eficiente.

Como legacy de nuestro trabajo pretendemos dejar para el uso de la comunidad un software que sea genérico, adaptable y robusto para la combinación de distintos instrumentos; que sea extensible, y que defina claramente las reglas y guías para la incorporación de nuevos instrumentos en un futuro.

En cuanto al aspecto puramente científico, pretendemos identificar, estudiar y caracterizar algunas de las regiones de formación estelar más masivas de nuestra galaxia, generando un catálogo de estructuras que pueda ser utilizado en futuros estudios, y determinando de forma clara las relaciones y jerarquías existentes en dichas regiones.

3. Muestra de objetos a estudiar

Contamos con acceso a los datos de los surveys ALMA-IMF y MGPS90 (GBT-MUSTANG2). Estos datos, más específicamente los de la región W51, serán los que utilizaremos para el desa-

rollo del paquete de software que después utilizaremos en el estudio de las muestras.

MGPS90 es un survey del plano galáctico a 3mm (90 GHz) realizado con MUSTANG2, un nuevo arreglo bolométrico de 215 elementos y un campo de visión de 4.25' instalado en el Green Bank Telescope; puede alcanzar una resolución angular de hasta 9". Ya se encuentran disponibles los datos del programa piloto, en el que se han mapeado las regiones SgrB2, W33, W43, G34.26+0.15, W49 y W51, detectando hasta 709 fuentes compactas.

El ALMA-IMF Large Program fue el primer Large Program aprobado en ALMA para el estudio de los clumps y cores en regiones de formación estelar masiva. Contiene una muestra completa de protoclusters masivos a una distancia de entre 2 y 6 kpc del Sol (fig. 2). Se espera que se puedan detectar del orden de 10^3 cores. Estos datos estarán disponibles en la banda de 1 mm y 3 mm.

Name	d [kpc]	M(<pc ²) [M _⊙]	L _{bol} /M [L _⊙ /M _⊙]	Mosaic, Resol ["×", ""]	1σ 1/3mm [μJy/beam]	Req. time 1mm+3mm	Resp. region
Young protoclusters							
G030.82=W43-MM1	5.5	16 × 10 ³	3.9	120 × 80, 0.37	–/30	0 + 5.3 hr	EU
G338.93	3.9	8.0 × 10 ³	9.3	55 × 55, 0.51	200/60	1 + 1.2 hr	EA
G327.29	2.8	6.5 × 10 ³	10	70 × 70, 0.67	300/90	0.6 + 0.7 hr	EA
G030.70=W43-MM2	5.5	13 × 10 ³	11	60 × 60, 0.37	100/30	3.1 + 5.3 hr	CL
G328.25	2.8	4.2 × 10 ³	13	70 × 70, 0.67	300/90	0.6 + 0.7 hr	EU
G353.41	2.0	3.3 × 10 ³	13	100 × 100, 0.95	600/180	0.6 + 0.7 hr	NA
G008.67	3.4	2.7 × 10 ³	16	70 × 70, 0.67	300/90	0.6 + 0.7 hr	EA
Intermed protoclusters							
G049.49M=W51-E	5.4	22 × 10 ³	25	60 × 60, 0.37	100/30	3.6 + 4.1 hr	NA
G351.77	2.0	2.2 × 10 ³	29	100 × 100, 0.95	600/180	0.6 + 0.7 hr	EU
G030.72=W43-MM3	5.5	6.6 × 10 ³	30	60 × 60, 0.37	100/30	3.2 + 5.3 hr	EU
G012.80=W33	2.4	5.2 × 10 ³	46	100 × 100, 0.95	600/180	0.6 + 0.7 hr	CL
Evolved protoclusters							
G337.92	3.6	3.0 × 10 ³	50	55 × 55, 0.51	200/60	1.0 + 1.2 hr	EA
G010.62=W31C	4.9	7.4 × 10 ³	54	60 × 60, 0.37	100/30	4.7 + 3.4 hr	NA
G049.49=W51-IRS2	5.4	14 × 10 ³	69	60 × 60, 0.37	100/30	3.7 + 4.1 hr	NA
G333.60	4.2	13 × 10 ³	130	110 × 110, 0.51	200/60	3.2 + 1.9 hr	CL

Figura 2: Muestra completa de protoclusters masivos a < 6 kpc en el survey ALMA-IMF

4. Metodología

La idea de combinar imágenes interferométricas con imágenes de single-dish no es nueva; fue introducida en 1975 por Ekers et al. (6) y en 1979 por Bajaja and van Albada (2); sin embargo aún existe un amplio debate sobre cuál es el mejor método para hacerlo. Las técnicas empleadas suelen categorizarse en función del momento en el que los datos son combinados: antes, durante o después de la deconvolución. Cada uno de estas clasificaciones se divide a su vez en dos subcategorías dependiendo de si las operaciones se realizan en el dominio de Fourier o en el dominio de la imagen.

Comenzaremos por realizar un análisis de los métodos existentes actualmente para la combinación de imágenes de interferómetros y radiotelescopios de plato único, comparándolos y escogiendo el que consideremos más óptimo. Una vez hayamos escogido el método, implementaremos las herramientas necesarias para automatizar y sistematizar el procedimiento, aplicándolo al conjunto de datos.

El primer artículo producto de esta tesis combinará la información de continuo obtenida por ALMA-IMF con los datos de continuo obtenidos en MGPS90. El proceso a seguir será el siguiente:

1. El algoritmo seleccionará automáticamente las regiones comunes en los ficheros de datos.

2. Cada región será redimensionada y combinada utilizando el método escogido.
3. Se generará un archivo FITS por cada región con la información combinada.
4. Se procederá al reensamble de las imágenes necesarias.
5. Se aplicará el algoritmo de clasificación escogido (dendrogramas en primera instancia) para la identificación de las distintas jerarquías, tanto en los FITS individuales como en los FITS reensamblados.
6. Se aplicarán los algoritmos necesarios para la caracterización de los parámetros que nos interesan en este trabajo: distribución espacial (Minimum Spanning Tree), cantidad y masa de subestructuras (Mass Functions, dendrogramas); densidades columnares (N -PDF).

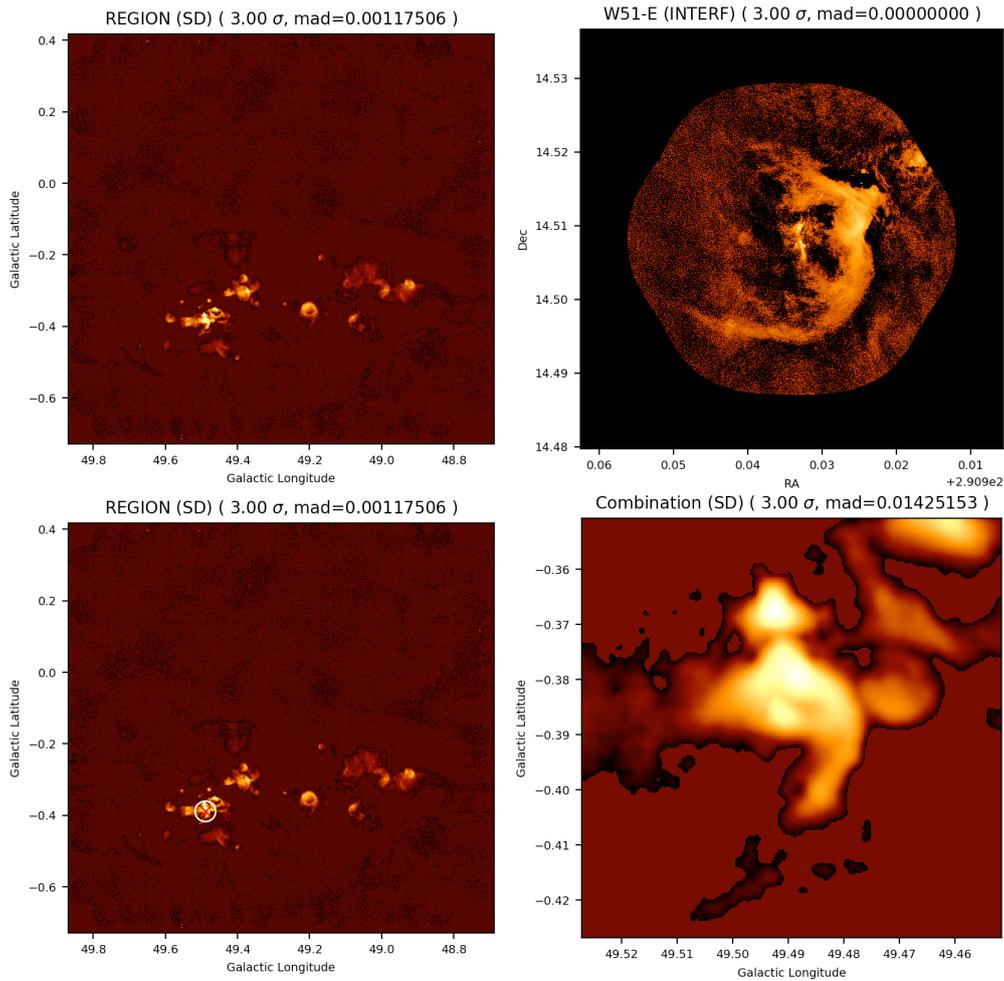


Figura 3: Proceso de selección y combinación. Paquete en desarrollo.

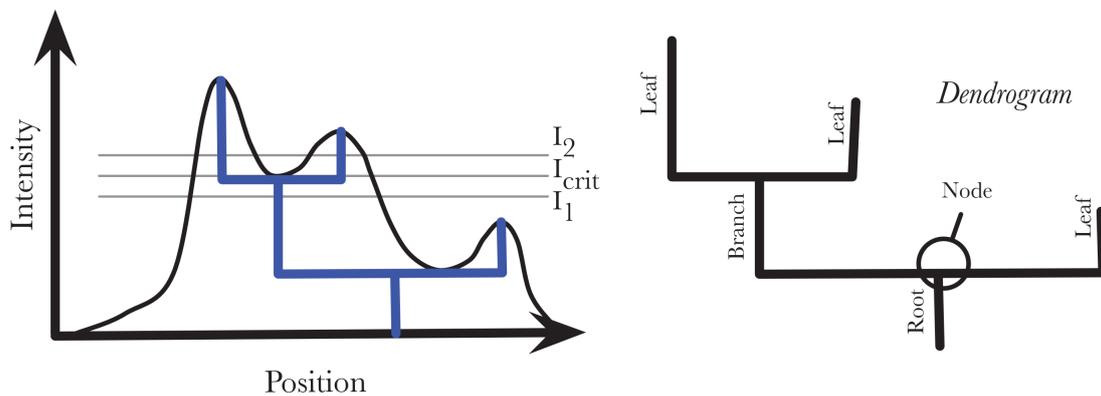


Figura 4: Diagrama del proceso de dendrogramas (16)

El segundo de los artículos se basará en la combinación de los datos de otros grandes radio-telescopios con datos de interferómetros, siguiendo un proceso análogo al del primer artículo.

Nos interesa la posibilidad de usar datos del GTM de regiones de formación estelar y combinarlos con datos del archivo de ALMA. Los datos del segundo son públicos después de 12 meses de ser entregados, mientras que para el GTM consideraremos la posibilidad de explorar su archivo o usar surveys públicos como el Cores to Clouds (C2C) con la nueva cámara TolTEC.

5. Cronograma

Durante el **primer semestre** el objetivo es explorar las alternativas actuales, consultar la literatura y hacer una primera aproximación al problema de la combinación de los datos de ALMA + GBT utilizando datos propietarios. También se debe presentar el presente documento para su aprobación. Los hitos/entregables a destacar son: 1. Entrevista con el Comité Académico. 2. Entrega código fuente que permita la combinación para el caso específico de los dos campos de W51 en las imágenes de continuo a 3mm de ALMA-IMF y el piloto de MGPS90.

El objetivo para el **segundo semestre** es conseguir una herramienta que permita la combinación completamente funcional y relativamente automática de los datos de ALMA-IMF y MGPS90, sentando las bases para convertirla en una herramienta que podamos generalizar a otros instrumentos. Además pretendemos comenzar con el análisis de las regiones coincidentes entre ALMA-IMF y MGPS90. Los hitos/entregables a destacar son: 1. Herramienta sistemática y automatizada para la combinación de imágenes interferométricas y single-dish, aplicable a todos los campos en común entre ALMA-IMF y MGPS90.

En el **tercer semestre** nos centraremos en el análisis de los datos de los que disponemos, evaluando distintos métodos para la identificación y jerarquización de clumps, así como la cuantificación de las estructuras identificadas. En este semestre debemos presentar la candidatura, por lo que también ocuparemos parte del tiempo en la preparación de la misma. Los hitos/entregables a destacar son: 1. Candidatura. 2. Análisis científico de la combinación con vistas a escribir un primer artículo de la tesis.

Durante el **cuarto semestre** pretendemos concluir con el análisis de los datos y escribir el artículo con la vista puesta en enviar el artículo sobre el análisis jerárquico de las regiones coincidentes de ALMA-IMF y MGPS90. Comenzaremos a explorar la posibilidad de utilizar datos de distintos proyectos de GBT, GTM, IRAM30m y Effelsberg para su combinación con los datos de interferometría (ALMA y VLA), así como la combinación de líneas espectrales usando los datos de ALMA-IMF. Los hitos/entregables a destacar son: 1. Envío del artículo. 2. Integración de datos de otros surveys e instrumentos. 3. Combinación de líneas espectrales en ALMA-IMF.

A lo largo del **quinto semestre** tendremos 3 objetivos principales: conseguir la aceptación del primer artículo; comenzar un segundo artículo en el que pretendemos generalizar el trabajo del primer artículo ampliándolo a una muestra mayor de regiones; y terminar la integración de los datos de otros instrumentos. Además pretendemos terminar de desarrollar la documentación pública de la herramienta, y ponerla a disposición del público en general. Los hitos/entregables a destacar son: 1. Publicación del primer artículo. 2. Paquete público de integración de imágenes generalizado.

En el **sexto semestre** trabajaremos en el análisis de los datos de la muestra masiva. Los hitos/entregables a destacar son: 1. Catálogo de regiones a estudiar. 2. Set de datos pertenecientes a esas regiones. 3. Combinación de los datos.

Durante el **séptimo semestre** pretendemos escribir un segundo artículo con los resultados del análisis de la muestra masiva, siendo enviado a finales del semestre. También pretendemos comenzar con la escritura tesis. Los hitos/entregables a destacar son: 1. Primera versión del segundo artículo. 2. Envío del segundo artículo.

Los objetivos para el **octavo semestre** son tres. El primero de ellos será la finalización de la tesis y su aceptación por parte del sínodo; el segundo objetivo será conseguir la publicación del segundo artículo; y el tercer objetivo será concluir con la lectura de la tesis doctoral. Los hitos/entregables a destacar son: 1. Tesis doctoral. 2. Elección del sínodo. 3. Publicación del segundo artículo. 4. Lectura de la tesis.

6. Índice tentativo de la tesis

1. Introducción
2. Muestra
3. Análisis Artículo I
4. Discusión Artículo I
5. Resultados y Conclusión Artículo I
6. Análisis Artículo II
7. Discusión Artículo II
8. Resultados y Conclusión Artículo II
9. Trabajos Futuros

Referencias

- [1] Ahmadi, A., Beuther, H., Mottram, J. C., Bosco, F., Linz, H., Henning, T., Winters, J. M., Kuiper, R., Pudritz, R., Sánchez-Monge, Á., Keto, E., Beltran, M., Bontemps, S., Cesaroni, R., Csengeri, T., Feng, S., Galván-Madrid, R., Johnston, K. G., Klaassen, P., Leurini, S., Longmore, S. N., Lumsden, S., Maud, L. T., Menten, K. M., Moscadelli, L., Motte, F., Palau, A., Peters, T., Ragan, S. E., Schilke, P., Urquhart, J. S., Wyrowski, F., and Zinnecker, H. (2018). *A&A*, 618:A46.
- [2] Bajaja, E. and van Albada, G. D. (1979). *A&A*, 75(1-2):251–254.
- [3] Blitz, L. (1993). *Nature*, 364(6440):757–758.
- [4] Cesaroni, R., Walmsley, C. M., Koempe, C., and Churchwell, E. (1991). *A&A*, 252:278.
- [5] Churchwell, E., Walmsley, C. M., and Cesaroni, R. (1990). *A&AS*, 83:119.
- [6] Ekers, R. D., Goss, W. M., Schwarz, U. J., Downes, D., and Rogstad, D. H. (1975). *A&A*, 43:159–166.
- [7] Galván-Madrid, R., Liu, H. B., Zhang, Z. Y., Pineda, J. E., Peng, T. C., Zhang, Q., Keto, E. R., Ho, P. T. P., Rodríguez, L. F., Zapata, L., Peters, T., and De Pree, C. G. (2013). *ApJ*, 779(2):121.
- [8] Heyer, M., Krawczyk, C., Duval, J., and Jackson, J. M. (2009). *ApJ*, 699(2):1092–1103.
- [9] Koda, J., Teuben, P., Sawada, T., Plunkett, A., and Fomalont, E. (2019). *PASP*, 131(999):054505.
- [10] Lada, C. J. and Lada, E. A. (2003). *ARA&A*, 41:57–115.
- [11] Lin, Y., Liu, H. B., Li, D., Zhang, Z.-Y., Ginsburg, A., Pineda, J. E., Qian, L., Galván-Madrid, R., McLeod, A. F., Rosolowsky, E., Dale, J. E., Immer, K., Koch, E., Longmore, S., Walker, D., and Testi, L. (2016). *ApJ*, 828(1):32.
- [12] Liu, H. B., Jiménez-Serra, I., Ho, P. T. P., Chen, H.-R., Zhang, Q., and Li, Z.-Y. (2012a). *ApJ*, 756(1):10.
- [13] Liu, H. B., Quintana-Lacaci, G., Wang, K., Ho, P. T. P., Li, Z.-Y., Zhang, Q., and Zhang, Z.-Y. (2012b). *ApJ*, 745(1):61.
- [14] Motte, F., Bontemps, S., Schilke, P., Schneider, N., Menten, K. M., and Brogière, D. (2007). *A&A*, 476(3):1243–1260.
- [15] Plume, R., Jaffe, D. T., and Evans, Neal J., I. (1992). *ApJS*, 78:505.
- [16] Rosolowsky, E. W., Pineda, J. E., Kauffmann, J., and Goodman, A. A. (2008). *ApJ*, 679(2):1338–1351.
- [17] Solomon, P. M., Rivolo, A. R., Barrett, J., and Yahil, A. (1987). *ApJ*, 319:730.
- [18] Wilson, T. L. and Walmsley, C. M. (1989). *A&A Rev.*, 1(2):141–176.