

CIENCIA 22(3), 138 - 149, 2014
Maracaibo, Venezuela

Caracterización de la población estelar en el cúmulo NGC 2169 y sus discos protoplanetarios

María Ocando^{1,2}, Jesús Hernández^{2*}, Nuria Calvet³, Rob Jeffries⁴, Rob Gutermuth⁵,
James Muzerolle⁶ y María Stock¹

¹Departamento de Física, Universidad del Zulia (LUZ), Venezuela.

²Centro de Investigaciones de Astronomía, Apdo. Postal 264, Mérida 5101-A, Venezuela.

³Department of Astronomy, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, US.

⁴Astrophysics Group, School of Physical and Geographical Sciences, Keele University,
Keele, Staffordshire ST5 5BG.

⁵Department of Astronomy, University of Massachusetts Amherst, MA 01003, US.

⁶Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Dr., Baltimore, MD 21218, US.

Recibido: 30-01-14 Aceptado: 03-07-14

Resumen

Se presenta un estudio del cúmulo NGC 2169 abarcando el rango completo de masas estelares, en el cual se caracteriza su población estelar y sus discos protoplanetarios. Combinando fotometría óptica e infrarroja y datos de movimientos propios, pudimos seleccionar 682 estrellas candidatas a miembros del cúmulo NGC 2169. Estudiando la distribución espectral de energía realizada con datos del Telescopio Espacial Spitzer, presentamos el primer censo completo en masas estelares de discos protoplanetarios en NGC 2169. Finalmente, comparamos los estados evolutivos de NGC 2169 y el cúmulo estelar 25Ori concluyendo que NGC 2169 tiene una población de discos protoplanetarios más evolucionada. Esto concuerda con las estimaciones de edad para los cúmulos en donde NGC 2169 es ligeramente más viejo que 25 Ori.

Palabras clave: formación estelar, discos protoplanetarios, cúmulos estelares, NGC 2169.

Characterization of the stellar population and protoplanetary disks in NGC 2169

Abstract

We present a study on the entire range of stellar masses of the cluster NGC 2169. Combining optical photometry, near infrared photometry and proper motions measurements, we selected 682 possible members of the cluster. Based on infrared observations from Spitzer Space Telescope and analysis of spectral energy distributions, we present the first complete census of protoplanetary disks in NGC 2169. Finally, comparing the disk populations in NGC 2169 and the stellar cluster 25 Ori, we concluded that disks populations in NGC 2169 are more evolved than those observed in 25 Ori. This is in agreement with the age determined for both cluster, in which NGC 2169 is slightly older than the 25 Ori stellar cluster.

Keywords: stellar formation, protoplanetary disks, stellar cluster, NGC 2169.

* Autor para la correspondencia: hernandj@cida.ve

1. Introducción

Los discos protoplanetarios primigenios son productos naturales de la conservación del momento angular durante el colapso de la nube protoestelar en la formación de una estrella (1). Estos discos evolucionan mediante mecanismos de disipación de gas y polvo (como foto-evaporación y foto-disociación), asentamiento de material al plano medio del disco y crecimiento de sólidos, los cuales pueden dar origen a la formación de sistemas planetarios. El Telescopio Espacial infrarrojo Spitzer ha sido crucial para un mejor entendimiento de como un disco protoplanetario primigenio (compuesto de 1% de polvo y 99% de gas) evoluciona durante los primeros millones de años (ahora en adelante Ma) a un disco de escombros carente de gas y en donde el polvo es creado por colisiones entre planetésimos ya formados. Fases intermedias en este proceso evolutivo dan origen a otras clases de discos protoplanetarios:

1. discos en transición, donde la parte interna del disco ha disipado su material probablemente debido a los efectos de marea producidos por la presencia de un planeta gigante cerca de la estrella o a otros mecanismos de disipación del material interno (2), y
2. discos evolucionados o discos homogéneamente agotados (3), que muestran una emisión modesta en todo el rango infrarrojo debido a que los mecanismos de disipación afectan más uniformemente el disco protoplanetario (2). En general, estos discos se detectan midiendo el exceso en el rango infrarrojo del espectro electromagnético originados por el material circundante de la estrella. Su caracterización y clasificación se determina mediante el análisis del flujo medido en diferentes longitudes de ondas o distribución espectral de energía (ahora en adelante SED, por sus siglas en inglés Spectral Energy Distribution).

Los cúmulos estelares jóvenes son laboratorios naturales para estudiar la formación y evolución temprana de las estrellas y sus discos protoplanetarios. Particularmente, el cúmulo estelar NGC 2169 (por sus siglas en inglés New General Catalogue) es uno de los pocos grupos estelares dentro de un kiloparsec¹ de distancia en una etapa evolutiva en la que el material primigenio del disco protoplanetario se ha disipado casi completamente, y el polvo producto de colisiones que se observa en discos de escombros se hace prominente (4). Este cúmulo, descubierto en 1784 por William Herschel, tiene un tamaño aparente de ~15 minutos de arco (5). En este trabajo usaremos estimaciones de edad ($11+5/-2$ Ma) y distancia ($982+35/-32$ pc) suministradas por Jeffries y obtenidas por Bell y colaboradores (6). Es importante notar que, estudios previos realizados con datos del catálogo 2MASS (por sus siglas en inglés, Two Micron All Sky Survey) (7), no han reportado población de discos en NGC 2169 (8). Probablemente esto se debe a que los discos en NGC 2169 son relativamente evolucionados, y así, su emisión en el cercano infrarrojo es relativamente débil.

En este trabajo presentamos un estudio de la población estelar de NGC 2169 y sus discos protoplanetarios, en el rango completo de masas estelares, desde sus miembros más masivos (~7 masas solares²) hasta el límite subestelar (0,08 masas solares). Para seleccionar los posibles miembros del cúmulo, analizamos imágenes ópticas tomadas en el Observatorio MDM (Kitt Peak, Arizona) (9), fotometría del cercano infrarrojo del catálogo 2MASS y los movimientos propios proporcionados por el catálogo UCAC3 (por sus siglas en inglés, 3th U.S. naval observatory CCD Astrograph Catalog) (10). Estos posibles miembros formarán una base fundamental para investigaciones futuras.

1 1 kiloparsec (kpc) = 1000 parsec; 1 parsec (pc) = 3.09×10^{18} cm

2 1 masa solar = 2×10^{33} g

El censo de discos se basa en datos del Telescopio Espacial Spitzer, el cual proporciona fotometría a 3,6; 4,5; 5,8 y 8,0 μm obtenida con el instrumento IRAC (por sus siglas en inglés Infrared Array Camera) y fotometría a 24 μm obtenidas con el instrumento MIPS (por sus siglas en inglés Multiband Imaging Photometer for SIRTf). Ya que, la fotometría de Spitzer es más sensible al exceso infrarrojo originado en discos protoplanetarios, esta data no solamente nos permite detectar por primera vez discos en NGC 2169, sino que además podemos realizar una caracterización inicial de tales discos.

2. Observaciones

2.1. Two Micron All Sky Survey o 2MASS

Como catálogo principal de las fuentes estudiadas en NGC 2169 usamos el catálogo 2MASS, el cual abarca todo el cielo en las bandas del infrarrojo cercano, J (1,235 μm), H (1,662 μm) y K (2,159 μm). El límite de completitud de 2MASS es de $J = 15,8$ magnitudes, lo que corresponde a una estrella de un décimo de la masa del sol, usando las trayectorias evolutivas teóricas de Siess y Forestini (11) y los valores de edad (11+5/-2 Ma) y distancia (982+35/-32 pc) asumidos para NGC 2169. El catálogo 2MASS incluye estrellas más débiles que el límite de completitud, con lo que podemos obtener una muestra no completa cerca del límite subestelar.

2.2. Fotometría óptica

La fotometría óptica del cúmulo NGC 2169 fue obtenida en el Observatorio MDM (Kitt Peak, Arizona, US), con el Telescopio Hiltner de 2,4 metros. La fotometría en el sistema Johnson-Cousin U (0,36 μm), V (0,55 μm), Rc (0,64 μm) e Ic (0,79 μm), se obtuvo con el instrumento OSMOS (por sus siglas en inglés Ohio State Multi-Object Spectrograph). Se obtuvieron imágenes de cuatro campos alrededor de NGC 2169, con el fin de obtener una mayor cobertura en las vecin-

dades del cúmulo (figura 1). Estas imágenes se obtuvieron el 9 y 10 de marzo de 2011 bajo condiciones fotométricas, y con tiempos de exposición cortos ($U = 15$ s y $VRI = 5$ s) y largos ($U = 90$ s y $V = Rc = Ic = 60$ s).

Adicionalmente, se obtuvieron 5 imágenes de campos Landolt (12), los cuales proporcionan magnitudes en el sistema Johnson-Cousin de estrellas conocidas en campos selectos. Esto nos permite obtener las ecuaciones de transformación de la fotometría instrumental al sistema estándar en cada filtro.

La corrección por pedestal (overscan), ruidos electrónicos internos (bias), y por la no uniformidad de la sensibilidad de los detectores (flats), así como el proceso para obtener los parámetros de calibración fotométrica de la noche (masa de aire, coeficientes de extinción atmosférica, entre otros), se realizaron usando el software astronómico IRAF (por sus siglas en inglés Image Reduction and Analysis Facility) (13), empleando las rutinas estándares tales como: setairmass, phot, photcal. Se obtuvo la fotometría en cada filtro usando una apertura de 2,2 segundos de arco. Esta apertura se estimó mediante un análisis del perfil estelar esperado, buscando minimizar los errores fotométricos instrumentales. El proceso de reducción y calibración de la fotometría se explica con más detalle en Ocando (14). Se elaboró un catálogo con las magnitudes en el sistema fotométrico Johnson-Cousin de 5434 fuentes del catálogo 2MASS dentro de la región estudiada. El rango de brillo abarcado en nuestras observaciones en el filtro V es de 11 a 22 magnitudes con un error mejor al 10% (0,1 magnitudes).

Debido al límite de saturación de nuestra fotometría ($V = 11$ magnitudes), se completó la parte brillante de este cúmulo usando las magnitudes y colores de 12 estrellas reportadas como probables miembros por Hoag A. y colaboradores (15).

Adicionalmente, se obtuvieron del catálogo UCAC3 los movimientos propios en as-

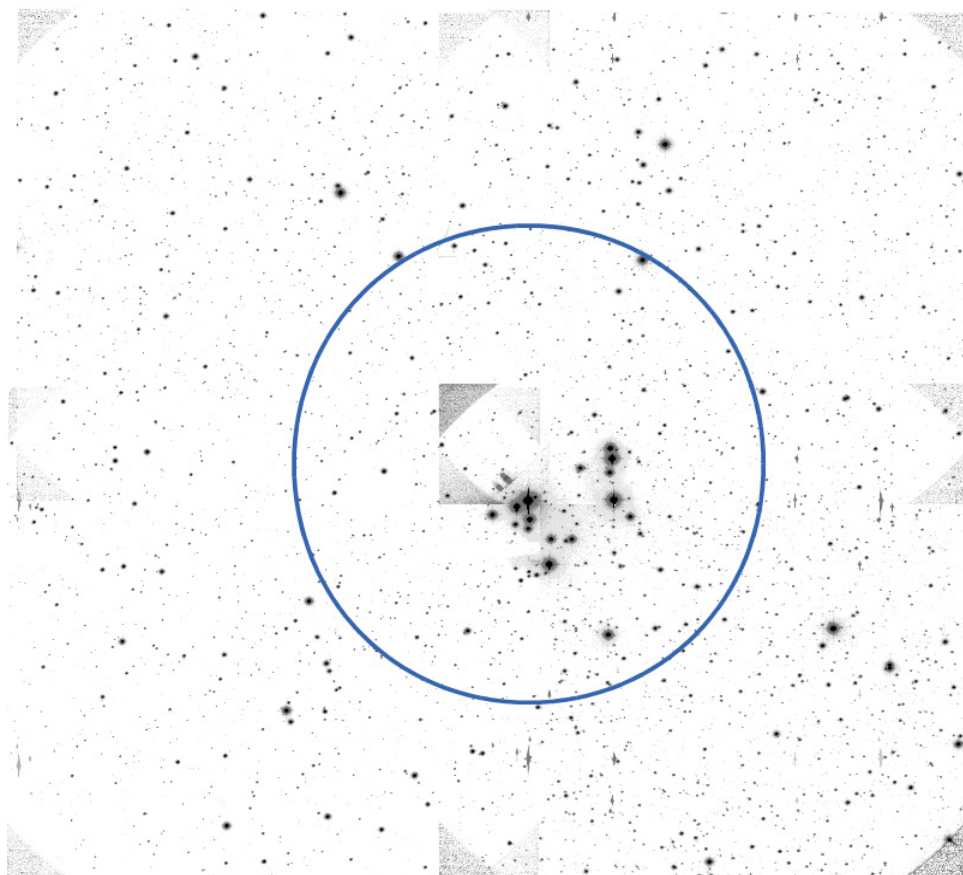


Figura 1. Cúmulo Abierto NGC 2169. Se muestra un mosaico con los 4 campos alrededor de NGC 2169 tomados en el Observatorio MDM. El círculo azul delimita el tamaño del cúmulo.

censión recta y declinación de 703 estrellas en la región de NGC 2169. Esto nos permitiría realizar estudios cinemáticos de nuestra muestra.

2.3. Fotometría infrarroja

La fotometría del cercano y mediano infrarrojo del cúmulo NGC 2169 fue tomada bajo el programa del Telescopio Espacial Spitzer “Disk census in NGC 2169: the final phase of primordial disk” (16).

El mosaico de IRAC fue realizado por Gutermuth R. usando programas IDL (por sus siglas en inglés Interactive Data Language) desarrollados para la unión y calibración de imágenes individuales, y corrección de fuentes contaminantes (17). El mosaico de

MIPS fue realizado por Muzerolle J. usando la herramienta DAT (por sus siglas en inglés, Data Analysis Tool) desarrollada para este instrumento (18). La fotometría de IRAC y MIPS fue obtenida con la tarea “phot” de IRAF (13) usando los valores de aperturas y factores de conversión descritas en los manuales de cada instrumento (19, 20). Mayores detalles del proceso de reducción y calibración de IRAC y MIPS se encuentran en Ocando (14).

Se detectaron 3500, 3460, 3470 y 3449 fuentes en las bandas IRAC de 3,6; 4,5; 5,8 y 8,0 μm , respectivamente y 2176 fuentes en las bandas de MIPS de 24 μm . Se realizó una correlación cruzada entre el catálogo óptico y las detecciones obtenidas de IRAC y/o MIPS.

3. Selección de candidatas a miembros

Seleccionamos posibles miembros a partir de la data fotométrica (candidatas fotométricas) y de los datos de movimientos propios (candidatas cinemáticas). Para la selección de candidatas fotométricas de baja masa se realizaron diversos diagramas color-magnitud (figura 2). El proceso de selección fotométrica consistió en calcular el promedio de las magnitudes y colores y sus desviaciones estándar (σ) de los miembros de baja masa, confirmados espectroscópicamente por Jeffries y colaboradores (8), en

rangos de una magnitud a fin de obtener los valores característicos de las estrellas pertenecientes a NGC 2169. Se definió una isocrona empírica ajustando un polinomio de segundo grado a las magnitudes y colores característicos en cada diagrama. La región de probables miembros (región de membresía) se define usando un límite de 2.5σ a partir de la isocrona empírica. Este límite se definió de tal manera que el número de candidatas fueran similares en los cuatro diagramas color-magnitud. Seleccionamos como candidatas fotométricas las estrellas que caen dentro de las regiones de membresía en los cuatro diagramas.

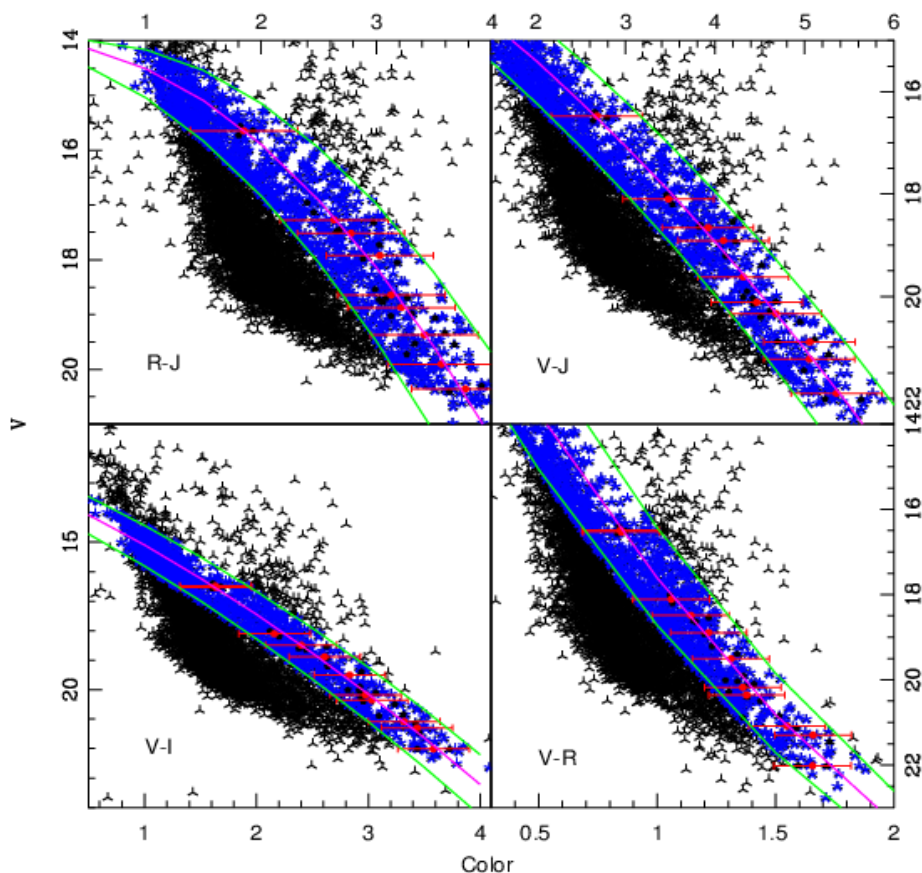


Figura 2. Diagramas color-magnitud para la selección de candidatas fotométricas. Las cruces negras representan la fotometría obtenida. Los círculos negros representan los miembros de baja masa reportados por Jeffries R. y col. (8) Los círculos y barras rojas representan el promedio y 2.5 veces la desviación estándar de los valores típicos de los miembros. La línea magenta representa la isocrona empírica. Las líneas verdes representan los límites de la región de membresía. Las cruces azules representan las candidatas fotométricas en los diagramas.

El proceso de selección de las candidatas cinemáticas se realizó mediante la elaboración de un diagrama punto vector (figura 3). El criterio de selección está basado en los movimientos propios en ascensión recta y declinación de miembros de alta masa confirmados anteriormente por Cuffey y McCuskey (21), Hoag (15) y Hohle y colaboradores (22). Este proceso de selección consiste en hacer un ajuste gaussiano alrededor del pico más alto de las distribuciones de movimientos propios ($\mu\alpha$ y $\mu\delta$ en milisegundos de arco por año, msa/año) de miembros de alta masa estudiados previamente. Conociendo la media y la desviación estándar (σ) de las

gaussianas, se definió la región de probables miembros usando un límite de 3σ alrededor del centroide de cada gaussiana (en ascensión recta es $-1,8+2$ y en declinación es $-3,0+-3,5$). Esto permite seleccionar como candidatas estrellas que comparten movimientos propios similares.

La lista final de candidatas a miembro de NGC 2169 consta de 682 candidatas que fueron seleccionadas por fotometría, movimientos propios y los miembros más brillantes ($V < 11$ magnitudes) confirmados previamente. Esta muestra de candidatas será estudiada en el infrarrojo con el fin de detectar

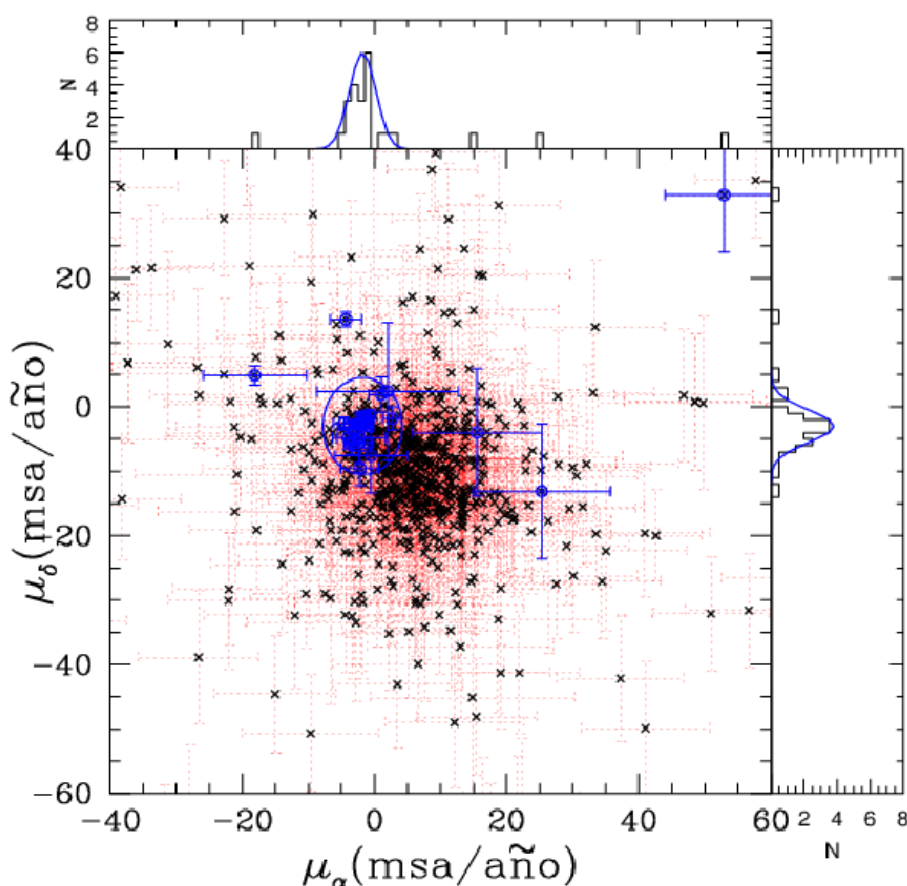


Figura 3. Diagrama Punto Vector. Las cruces negras representan los objetos que poseen movimientos propios en UCAC3 (10). Los círculos azules son los miembros de alta masa confirmados anteriormente. La elipse azul es la región utilizada para la selección de las candidatas, la cual representa (3σ) alrededor del centroide definido al ajustar gaussianas a la distribución de movimientos propios (panel superior y panel derecho) de miembros previamente reportados.

y caracterizar sus discos protoplanetarios. Además, el catálogo de posibles miembros será utilizado en futuras observaciones espectroscópicas destinadas a confirmar si realmente las candidatas pertenecen al cúmulo NGC 2169.

4. Análisis infrarrojo

El análisis del exceso infrarrojo nos permite detectar y caracterizar discos protoplanetarios. El exceso de emisión en las bandas 3,6 a 8,0 μm del instrumento IRAC y 24 μm del instrumento MIPS puede deberse a estrellas con discos primigenios o discos evolucionados. Estos últimos muestran una emisión más modesta en todas las bandas

infrarrojas (4). Se espera que los discos en transición exhiban muy poca emisión en las bandas de IRAC y emisión comparable a un disco primigenio en la banda de 24 μm de MIPS. Finalmente, los discos de escombros generalmente no poseen excesos infrarrojos medibles a menos de 8 μm y muestran un exceso modesto a 24 μm .

4.1. Censo de discos

La figura 4 muestra la pendiente de la Distribución Espectral de Energía (de ahora en adelante, "SEDSlope" por sus siglas en inglés Spectral Energy Distribution slope), del color [3,6]-[8,0] versus la magnitud [8,0].

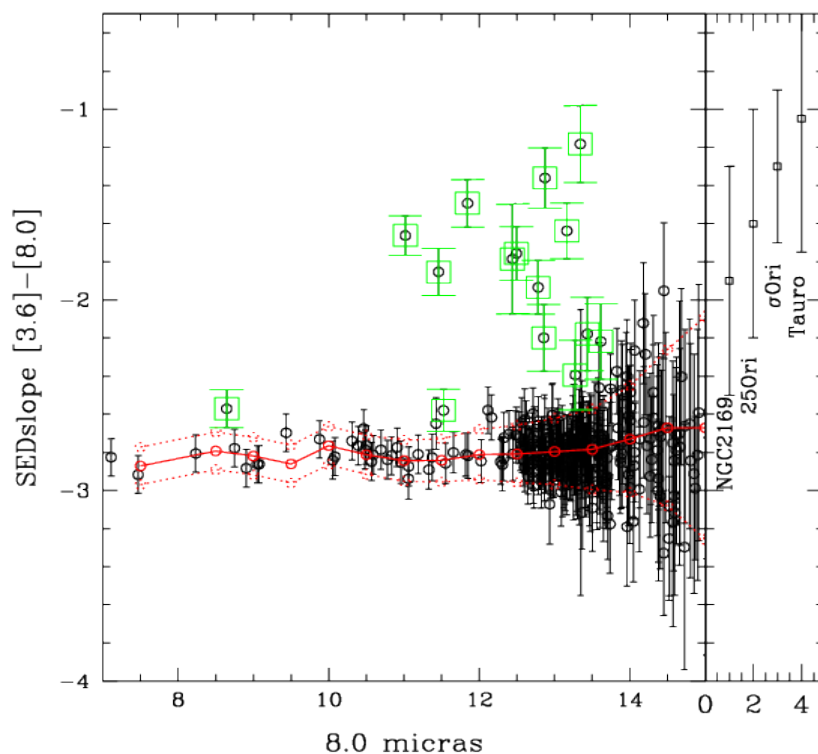


Figura 4. Diagrama para detectar exceso de emisión en 8,0 μm . Los círculos negros representan las candidatas seleccionadas (Sec. 3). La línea roja representa la mediana del color en rangos de magnitud de estas candidatas. Las líneas rojas punteadas representan los límites de la fotosfera estelar. Los cuadros y barras de error verde representan las candidatas con exceso de emisión a 8,0 μm . El panel derecho muestra excesos globales a 8,0 μm representados por el rango abarcado por el cuartil 2 y 3 (50%) de la población de discos en Tauro (1-2 Ma), σ Ori (3 Ma), 25Ori (8 Ma) y NGC 2169 (11 Ma).

Definida por:

$$SEDslope = \frac{\log[\lambda_1 F_{\lambda_1}] - \log[\lambda_2 F_{\lambda_2}]}{\log[\lambda_1] - \log[\lambda_2]}$$

donde F es el flujo en cada longitud de onda, donde $\lambda_1 = 3,6 \mu\text{m}$ y $\lambda_2 = 8,0 \mu\text{m}$.

Las estrellas con exceso de emisión a $8,0 \mu\text{m}$ se encuentran ubicadas por encima del locus de la fotosfera estelar, definido usando ± 3 veces los errores fotométricos típicos para cada magnitud a $8 \mu\text{m}$, en intervalos de 1 magnitud. Los cuadros y barras de error verdes corresponden a las estrellas con exceso a $8 \mu\text{m}$.

Comparando la cantidad de excesos infrarrojos a $8,0 \mu\text{m}$ de la población de discos

en la región de Tauro (1-2 Ma) (1), el cúmulo sigma Ori (~ 3 Ma) (23), el agregado estelar 25 Ori (7-10 Ma) (24) y NGC 2169 (~ 11 Ma), se infiere que Tauro y sigma Ori presentan un mayor grado de exceso a $8,0 \mu\text{m}$ debido a una mayor presencia de discos no evolucionados (discos primigenios). NGC 2169 y 25 Ori poseen un menor grado de exceso a $8,0 \mu\text{m}$. Sin embargo, se evidencia que NGC 2169 posee el menor exceso a $8,0 \mu\text{m}$, lo cual indica una población de disco más evolucionada, en la que el gas y polvo del disco comienza a asentarse en el plano medio del mismo.

La figura 5 muestra un diagrama color-color (V-J vs K-24) que permite identificar el exceso a $24 \mu\text{m}$. Para conocer el color característico de la fotosfera estelar se gra-

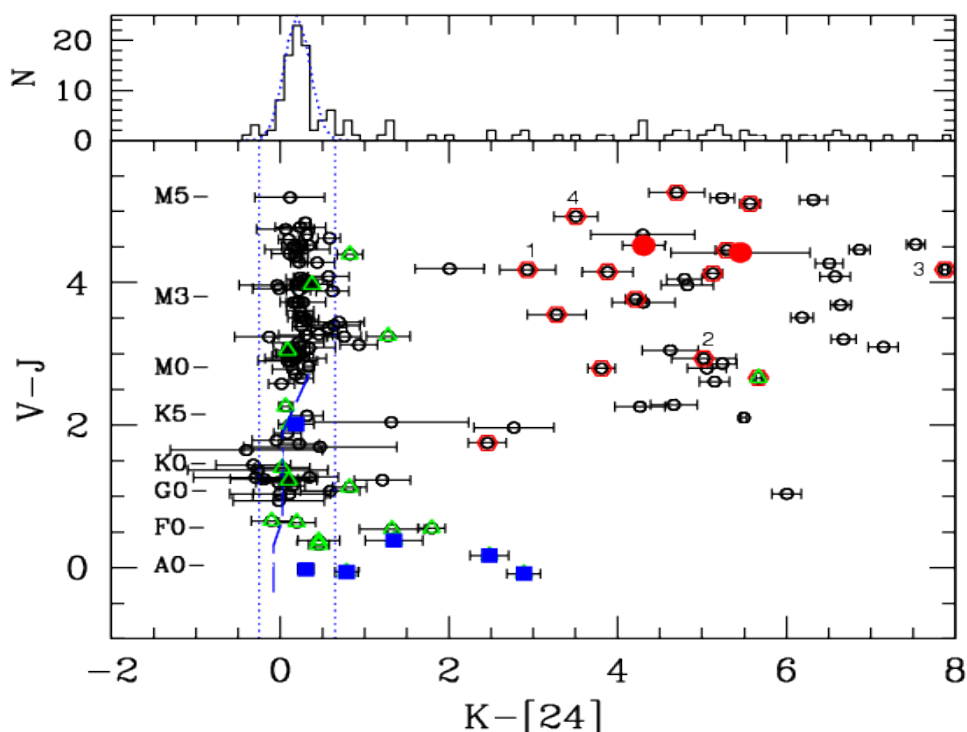


Figura 5. Diagrama color-color (V-J vs K-24) para detectar exceso de emisión en $24 \mu\text{m}$. Las líneas punteadas azules muestran los límites de la fotosfera estelar los cuales representan $\pm 3\sigma$ alrededor del color promedio de estrellas sin discos. Los círculos rojos sin relleno representan las candidatas a miembros del cúmulo seleccionadas por fotometría. Los círculos rojos rellenos representan los miembros del cúmulo reportados por Jeffries y col. (8) Los triángulos verdes representan las candidatas a miembros del cúmulo seleccionadas por movimientos propios. Los cuadros azules son los miembros reportados por Hohle y col. (22).

ficaron todos los objetos con fotometría en las bandas V, J, K y 24; luego se realizó un ajuste gaussiano a la distribución de colores K-24, como se muestra en la parte superior del diagrama. Este ajuste indica que el color K-24 característico de la fotosfera es de 0,20; con una desviación estándar de $\sigma = 0,15$. Usando un criterio de 3σ , se define que las estrellas con exceso a $24 \mu\text{m}$ tienen un color K-24 $> 0,65$. En la figura se aprecia que las estrellas tempranas (B, A, F, V-J < 1), poseen una modesta emisión a $24 \mu\text{m}$ consistente con la presencia de un disco de escombros (4).

4.2. Inspección en búsqueda de objetos contaminados

Se realizó una revisión de las imágenes en todas las bandas estudiadas para cada objeto con exceso. En este proceso se identificaron objetos con contaminación de campo. Estos son: 1) L1-1134 es una estrella muy débil, indistinguible del fondo de cielo en 4,5; 5,8 y $24 \mu\text{m}$, adicionalmente no tiene exceso en 3,6 y $8,0 \mu\text{m}$ y el exceso detectado a $24 \mu\text{m}$ probablemente sea debido a fluctuaciones en el fondo de cielo (25); 2) L2-1407 es una estrella contaminada por otra estrella cercana muy brillante, debido a esto su exceso en $24 \mu\text{m}$ es incierto; 3) L3-1420 es una estrella en el borde de la imagen, su exceso en $24 \mu\text{m}$ es incierto; 4) L4-160 no posee un perfil estelar, en la imagen a $24 \mu\text{m}$ se observa un objeto extendido (galaxia). Las demás estrellas con exceso no presentan ningún tipo de contaminación, por lo cual se realizó la SED a cada una de las 25 estrellas restantes con excesos infrarrojos para determinar el tipo de disco.

4.3. Distribución espectral de energía o SED

Se obtuvo la SED para 25 estrellas. El tipo espectral mostrado en la SED corresponde al límite más tardío de la estrella y es calculado interpolando el color V-J observado al color intrínseco establecido para cada

tipo espectral por Kenyon y Hartmann (26). Es decir, debido al enrojecimiento la estrella puede tener un tipo espectral más temprano que el mostrado. En la caracterización de las SED's se distinguen dos grupos:

Discos en estrellas de masa intermedia (tipos espectrales B, A y F). Se caracterizaron 6 estrellas de masa intermedia con exceso modesto a $24 \mu\text{m}$. En la figura 6 se grafican las estrellas C2-1355 y C2-1329 como muestra de este tipo de objetos. El rango de exceso a $24 \mu\text{m}$ de este grupo es similar al encontrado en candidatas a estrellas con discos de escombros localizados en otros grupos estelares con edades similares (4).

Discos en estrellas de baja masa (tipos espectrales K y M). Se caracterizaron 13 estrellas de baja masa con exceso a $24 \mu\text{m}$. Adicionalmente 4 estrellas de baja masa que muestran exceso en la figura 5 fueron rechazadas en la inspección visual (Sección 4.2). En general, los excesos observados en NGC 2169 están por debajo de la mediana de Tauro, la cual indica el flujo esperado en discos primigenios. Esto indica que los discos en NGC 2169 se encuentran en una fase intermedia entre el disco primigenio y el disco de escombros. Se observan candidatas a discos en transición con un exceso modesto en las bandas de IRAC y un exceso en MIPS comparable al observado en los discos primigenios (ejemplo las estrellas L3-1470 y L2-1450 en la figura 6). Discos evolucionados, como L3-1326 y L3-790 (figura 6), exhiben un exceso menor en las bandas de IRAC y MIPS comparado a la población de discos en Tauro, indicando una mayor concentración de material en el plano medio del disco, lugar donde se podrían formar planetas.

Finalmente, se observan 6 estrellas de baja masa con poco exceso a $8,0 \mu\text{m}$ que no fueron detectadas con MIPS. Estos objetos, como los mostrados en los paneles derechos de la figura 6 (L3-1323 y L2-895), no pueden ser analizados debido a la falta de data en la banda más infrarroja de este trabajo.

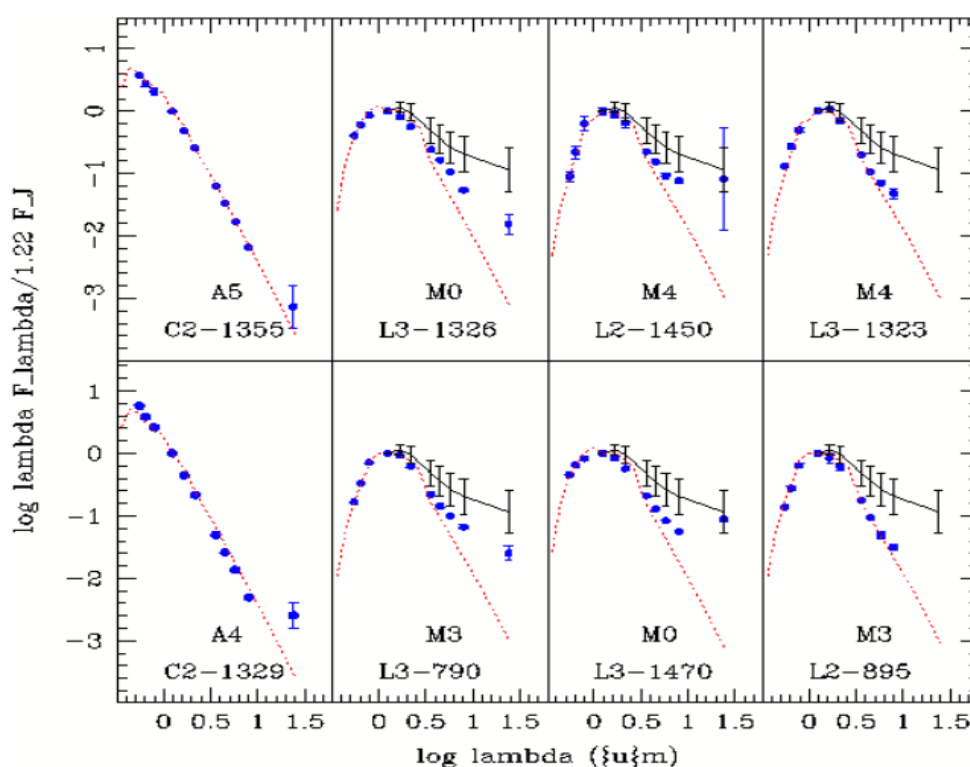


Figura 6. Distribución Espectral de Energía o SED de estrellas de intermedia y baja masa. La línea punteada roja muestra el flujo fotosférico estándar para cada estrella según su tipo espectral. Los puntos azules con sus barras de error representan el flujo obtenido en cada banda fotométrica. Las líneas negras con barras de error corresponden a la media de Tauro para estrellas con discos primigenios. Como muestra representativa de discos en NGC 2169 se grafican las SED para 8 estrellas. Las SED para la muestra completa de discos se reportan en Ocando (14).

4.4. Comparación con otras poblaciones estelares jóvenes

Se calculó para NGC 2169 una fracción de discos primigenios de $5,5\% \pm 4\%$ usando el número de estrellas con exceso a $8,0 \mu\text{m}$ en la muestra de miembros confirmados por Jeffries y colaboradores (8). Como se muestra en la figura 7 (27), el valor obtenido para NGC 2169 es consistente con la tendencia observada por otros autores (24) en la que la fracción de discos decrece a medida que aumenta la edad. Esta medida también concuerda con los valores de grupos estelares con edades similares como 25 Ori ($6,1\% \pm 2,3\%$) (24) y el cúmulo estelar NGC 7160 ($4,0\% \pm 4\%$) (28). Comparando las propiedades globales de la población de NGC 2169

con el agregado estelar 25 Ori, el cual está mejor caracterizado (24, 29), podemos inferir lo siguiente: a) La cantidad y rango de exceso a $24 \mu\text{m}$ de la población de discos de escombros en estos dos grupos estelares son similares. b) La fracción de discos primigenios en estrellas de baja masa encontrados en NGC 2169 es ligeramente menor al encontrado en 25 Ori. c) El rango de exceso a $8,0 \mu\text{m}$ detectado en NGC 2169 es estadísticamente menor al encontrado en 25 Ori. Esto implica una mayor evolución en la parte interna del disco en la población de NGC 2169.

El hecho de encontrar una población de discos más evolucionados en NGC 2169 que en 25 Ori, concuerda con lo esperado para las edades de estos grupos, en donde NGC

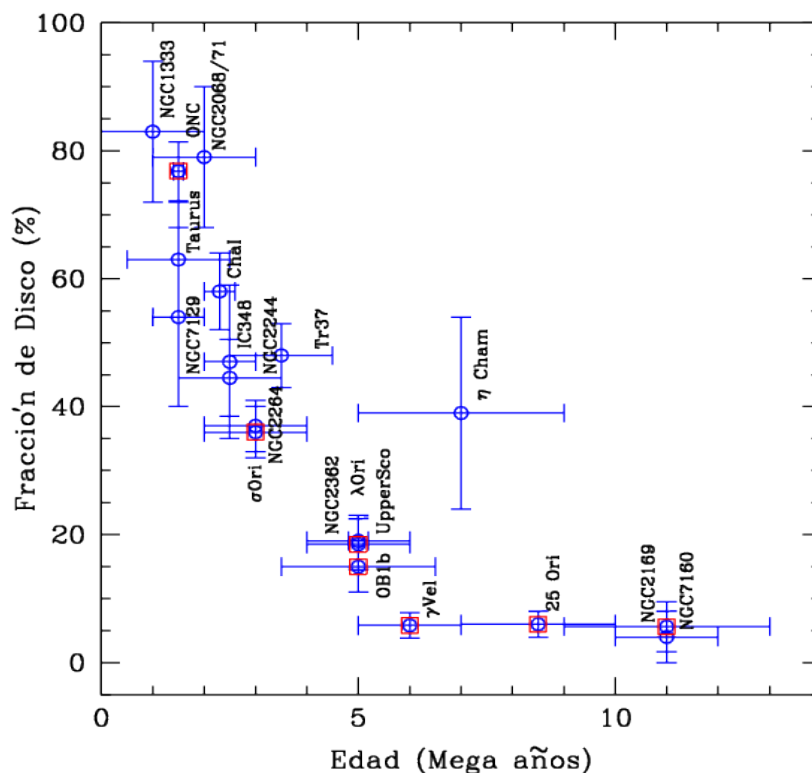


Figura 7. Fracción de estrellas con discos primigenios con emisión a $8,0 \mu\text{m}$ como función de las edades de los grupos estelares.

2169 ($\sim 11+5/-2\text{Ma}$) es más viejo que 25 Ori ($\sim 8 \text{ Ma}$).

Conclusiones

Luego de analizar toda la data obtenida de NGC 2169 logramos caracterizar su población estelar, teniendo como resultado:

Un catálogo general que combina la data de los catálogos 2MASS y UCAC3 con nuestra fotometría óptica e infrarroja para la región de NGC 2169 mostrada en la figura 1. Para obtener información de este catálogo, consultar Ocando (14).

Una lista de 682 candidatas a miembros del cúmulo, las cuales serán objeto de estudios espectroscópicos en una investigación futura.

El primer censo de discos en el cúmulo NGC 2169, abarcando un rango de masas de

~ 0.1 a 7 masas solares. Detectamos un total de 25 candidatas a miembros del cúmulo con excesos infrarrojos indicativos de la presencia de discos protoplanetarios, que clasificamos de la siguiente manera: 6 estrellas de masa intermedia con discos de escombros; 6 estrellas sin información a $24 \mu\text{m}$ que impide su caracterización, 4 estrellas que muestran discos en transición y 9 estrellas que muestran discos evolucionados.

Al realizar una comparación de nuestros resultados en NGC 2169 con estudios similares en el agregado estelar 25 Ori, el cual está mejor caracterizado (edad $\sim 8 \text{ Ma}$), NGC 2169 presenta un rango de excesos a $24 \mu\text{m}$ similar a 25 Ori, aunque la fracción de discos primigenios encontrados en NGC 2169 es de $5,5\% \pm 4\%$, ligeramente menor a lo que se ha determinado en 25 Ori ($6,1\% \pm 2,3\%$) (24), y el rango de exceso a $8,0 \mu\text{m}$ es estadísticamente menor a 25 Ori. Lo ante-

rior nos sugiere que la población de discos de NGC 2169 es más evolucionada que la de 25 Ori. Tomando en cuenta estos argumentos podemos decir que la edad de referencia para NGC 2169 es consistente con el estado evolutivo estimado para su población de discos protoplanetarios.

Referencias

1. HARTAMANN L. *Astr Soc P* 337:3. 2005.
2. WILLIAMS J., CIEZA L. *Ann Rev Astr Astrophy* 49:67-117. 2011.
3. MUZEROLLE J., ALLEN L., MEGEATH S., HERNANDEZ J., GUTERMUTH R. *ApJ* 708:1107. 2010.
4. HERNÁNDEZ J., BRICEÑO C., CALVET N., HARTMANN L., QUINTERO A. *ApJ* 652:472-481. 2006.
5. KHARCHENCHO N., PISKUNOV A., RÖSER S., SCHILBACH E., SCHOLZ R., *A&A* 438:1163-1173. 2005.
6. BELL C., NAYLOR T., MAYNE N., JEFFRIES R., LITTLEFAIR S. *MNRAS* 000:1-28. 2013.
7. <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>. Fecha de consulta: 30/07/2014.
8. JEFFRIES R., OLIVEIRA J., NAYLOR T., MAYNE N., LITTLEFAIR S. *MNRAS* 376:580-598. 2007.
9. http://mdm.kpno.noao.edu/index/MDM_Observatory.html. Fecha de consulta: 30/07/2013.
10. ZACHARIAS N., FINCH C., GIRARD T., HAMBLY N., WYCOFF G., ET AL. *ApJ* 139:2184-2199. 2010.
11. SIESS L., DUFOUR E., FORESTINI M. *A&A* 358:593-599. 2000.
12. BIRNEY D., GONZALEZ G., OESPER D. *Observational Astronomy* Cambridge Univ Pr., Exeter (UK). 2006.
13. <http://iraf.noao.edu/>. Fecha de consulta: 30/07/2013.
14. OCANDO M. Caracterización de la Población Estelar del cúmulo NGC 2169 y sus sistemas planetarios en formación. (Para optar al Título de Licenciada en Física). Facultad Experimental de Ciencias. Universidad del Zulia. Maracaibo (Venezuela). 69 pp. 2012.
15. HOAG A., JOHNSON H., IRIARTE B. MITCHELL R., HALLAM K. *USNO* 17(7):344-542. 1961.
16. <http://www.spitzer.caltech.edu/>. Fecha de consulta: 30/07/2013.
17. GUTERMUTH R., MEGEATH S., MUZEROLLE J., ALLEN L., PIPHER J., MYERS P., FAZIO G., *ApJ* 154(1):374. 2004.
18. GORDON K., RIEKE G., ENGELBRACHT C., MUZEROLLE J., et al. *Astr Soc P* 117(831): 503-525. 2005.
19. <http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irac/iracinstrumenthandbook/home/>. Fecha de consulta: 28/07/2013.
20. <http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/mips/mipsinstrumenthandbook/1/>. Fecha de consulta: 28/07/2013.
21. CUFFEY J., McCUSKEY S. *ApJ* 123:59. 1956.
22. HOHLE M., EISENBEISS T., MUGRAUER M., FREISTETTER F., MOUALLA M., NEUHAUSER R., et al. *Astr Nachr* 330(5):1-7. 2009.
23. HERNÁNDEZ J., HARTMANN L., MEGEATH T., GUTERMUTH R., MUZEROLLE R., ET AL. *ApJ* 662:1067-1081. 2007a.
24. HERNÁNDEZ J., CALVET N., BRICEÑO C., HARTMANN L., VIVAS A., et al. *ApJ* 671:1784-1799. 2007b.
25. LUHMAN K., HERNÁNDEZ J., DOWNES J., HARTMANN L., BRICEÑO C. *ApJ* 688:362-376. 2008.
26. KENYON S., HARTMANN L. *ApJ* 101:117-171. 1995.
27. HERNÁNDEZ J., HARTMANN L., CALVET N., JEFFRIES R., GUTERMUTH R., et al. *ApJ* 686:1195-1208. 2008.
28. SICILIA-AGUILAR A., HENNING T., DULLEMOND C., PATEL N., JUHÁSZ A., et al. *ApJ* 742(1):25. 2011.
29. BRICEÑO C., HARTMANN L., HERNÁNDEZ J., CALVET N., VIVAS K., FURESZ G., SZENTGYORGYI A., *ApJ* 661(2): 1119-1128. 2007.