

4

Una nueva minibúsqueda en el centro del cúmulo σ Orionis

My God, it's full of stars

David Bowman (2001: A Space Odyssey)

4.1 Antecedentes

Irónicamente, el núcleo del cúmulo σ Orionis es la región peor conocida en cuanto a estrellas de masa intermedia y baja y objetos subestelares se refiere. En este capítulo de memoria de Tesis se va a ofrecer información sobre el corazón de σ Orionis a partir de una búsqueda de haz de lápiz (*pencil-beam*) en las bandas IJK_s , en la que la detección de fuentes emisoras de rayos X ha cobrado vital importancia. Este estudio no es el primero de su tipo, ya que en su memoria de Tesis, Scott Wolk (1996) presentó observaciones fotométricas de fuentes de rayos X detectadas con *ROSAT* en las asociaciones Ori OB1a y Ori OB1b. Una de las regiones que estudió con mayor detenimiento fue la de σ Orionis. En ella caracterizó fotométricamente una muestra de considerable tamaño de fuentes X y estrellas que él catalogó como de pre-secuencia principal. Algunos de los objetos, con masas entre la solar y unas pocas décimas de $M_\odot$, también fueron caracterizados espectroscópicamente. Otros objetos cerca del corazón de σ Orionis han sido estudiados posteriormente por Zapatero Osorio et al. (2002a) y Sanz-Forcada, Fraciosini & Pallavicini (2004). En el estudio presentado aquí se han realizado observaciones más profundas que las de Wolk (1996).

4.2 Observaciones y análisis

4.2.1 Imagen IJK_s

Se han utilizado dos telescopios de clase 1 m para estudiar la región central del cúmulo. Con el instrumento CAIN-2 en el Telescopio Carlos Sánchez (TCS) se ha realizado imagen infrarroja JK_s profunda, e imagen I en el óptico con la cámara CCD del IAC-80. Se ha realizado también una observación de apoyo con LIRIS en el William Herschel Telescope (WHT) en la banda K_s . En la Tabla 4.1 se muestra un *log* esquemático de las observaciones

en los tres telescopios, en la que se proporcionan el nombre del instrumento, la fecha de observación, el filtro o filtros usados y el número de repeticiones.

Tabla 4.1: Log de las observaciones.

Telescopio/Instrumento	Fecha	Filtro	Núm. rep. ^a
TCS/CAIN-2	2002 sep. 27	J	1
		H	1
		K_s	5
	2002 dic. 02	J	8
	2003 dic. 22	J	1
		H	1
		J	2
	2004 oct. 04	H	2
		K_s	1
		J	4
	2004 oct. 05	H	4
		K_s	4
		J	2
	2004 oct. 08	K_s	5
	2004 dic. 07	K_s	3
IAC-80/CCD	2004 nov. 17	I	30
WHT/LIRIS	2005 mar. 05	K_s	1

^a: En el infrarrojo, entiéndase como número de ciclos (véase la descripción de los ciclos y tiempos de exposición en el texto). En el óptico, como número de exposiciones individuales.

CAIN-2/TCS

Durante ocho noches distribuidas en un período de dos años se observó un campo de 4.3×4.3 arcmin² centrado en σ Orionis A con el instrumento CAIN-2 (véanse detalles sobre el instrumento en la Sección C.10.1). El orden de la observación en cada una de las tres bandas JHK_s fue arbitraria. Sin embargo, se tuvo en cuenta que la profundidad alcanzada fuese la suficiente para detectar los objetos de masa planetaria del cúmulo más brillantes ($J > 18.0$, $J - K_s > 1.2$ mag, aproximadamente). En la Tabla 4.1 se muestran el número de ciclos realizados en el campo, en cierto filtro y en cada una de las noches. Un ciclo típico comprendía 5 min de exposición total, distribuidos en 6 exposiciones individuales de 10 s en cada posición en los filtros JH ; en K_s se utilizaron 10 exposiciones individuales de 6 s. Se usó un patrón de *dithering* de 5 posiciones. Todas las noches estuvieron libres de cirros o nubes, pero el *seeing* era variable de una noche a otra (entre 1 y 2 arcsec). Algunas imágenes, con el peor *seeing*, no se tuvieron en cuenta en la combinación (en la Tabla 4.1 sólo se muestran las imágenes usadas). Tras alinear y combinar todos los ciclos escogidos, se disponía de imágenes con tiempos de exposición combinados de 80, 40 y 90 min en J , H y K_s , respectivamente. En la fila superior, a la izquierda y a la derecha, de la Figura 4.1 se ofrecen dos imágenes en falso color tras combinar los filtros JHK_s . En ambas, K_s codifica al rojo, H al verde y J al azul. Ambas son complementarias, ya que muestran distintos rangos de brillo (en la primera se puede resolver el sistema múltiple central $-AB+C+D-$, mientras que en la segunda no; por el contrario, en la segunda es visible la práctica totalidad de los objetos más débiles). Nótese la presencia de objetos extremadamente rojos.

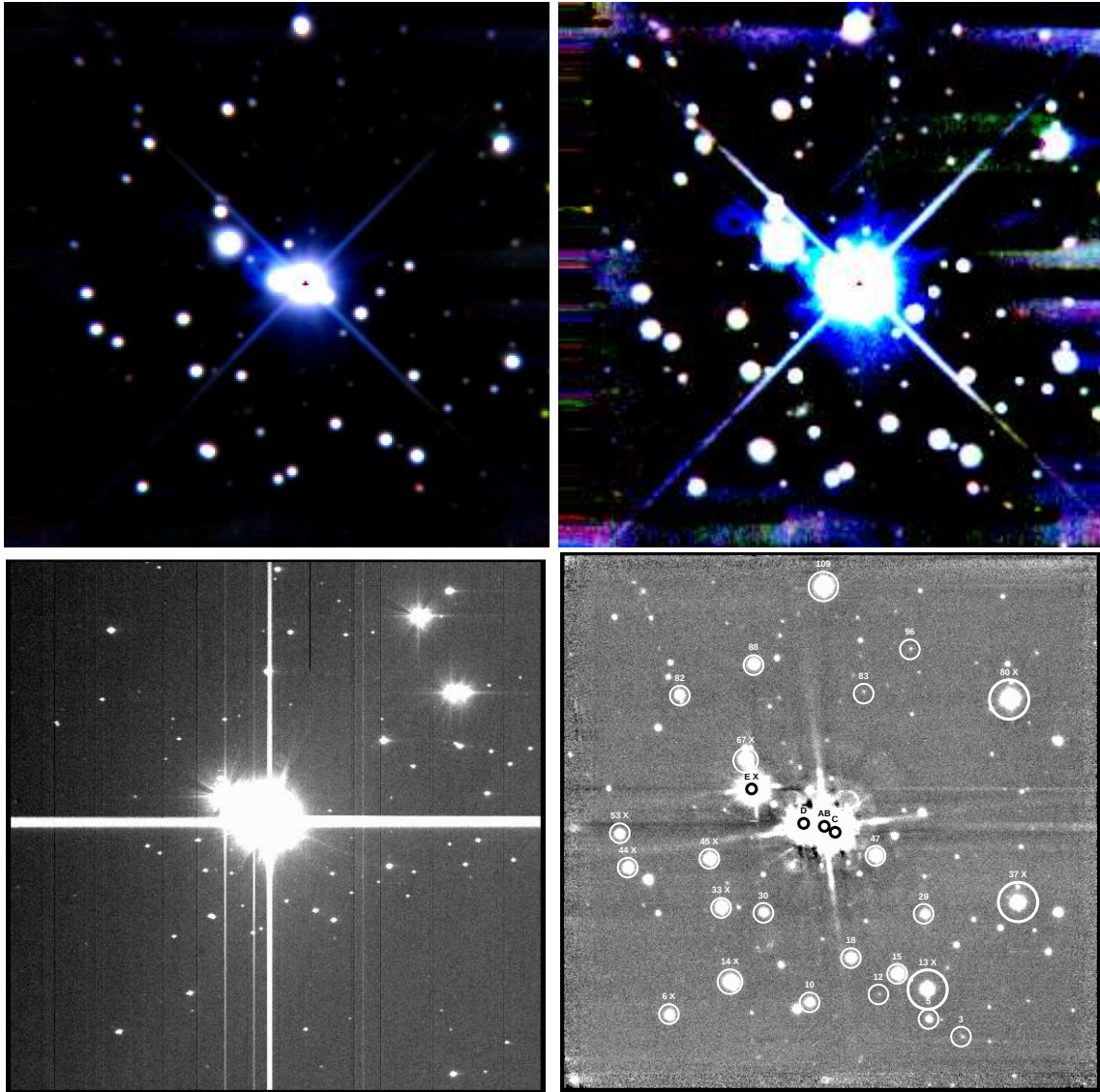


Figura 4.1: *Arriba izquierda*: imagen en falso color combinado imágenes J (azul), H (verde) y K_s (rojo) centradas en σ Orionis AB tomadas con CAIN-2. *Arriba derecha*: lo mismo que la anterior, pero mostrando un rango de brillos diferentes. *Abajo izquierda*: imagen I tomada con la cámara CCD del IAC-80. *Abajo derecha*: imagen LIRIS en la banda K_s , en la que se han marcado y etiquetado los objetos seleccionados como miembros y candidatos a miembros del cúmulo.

Se tomó la imagen K_s como referencia de coordenadas físicas de 113 fuentes con número de cuentas en el pico mayor de 5 veces la desviación estándar promedio del fondo (5σ). La fotometría de apertura y de PSF en la imagen combinada de cada filtro se realizó de la forma estándar, usando 4, 5, 2 y 3 veces la FWHM promedio de cada imagen como valores de los parámetros apertura, radio interno del anillo de cielo, anchura del anillo de cielo y radio de ajuste de PSF, respectivamente. Se obtuvieron magnitudes J , H y K_s instrumentales de 98 fuentes. Las otras 15 fuentes no poseían contrapartida en las bandas J o H detectadas

a 5σ o mayor. Todo el proceso se realizó dentro del entorno IRAF.

El número total de fuentes presentes en el campo de visión es superior que el de otros campos no asociados a ningún cúmulo (~ 20 ; véase, p.e., Cap. 10) o incluso de σ Orionis (~ 80 ; p.e., Cap. 7) de la misma profundidad.

La calibración fotométrica y astrométrica se realizó usando funciones MATLAB similares a las detalladas en el Capítulo 6. Los errores típicos en la calibración fotométrica fueron 0.080, 0.060 y 0.090 mag en JHK_s , respectivamente. El error típico en la astrometría fue del orden de 0.45 arcsec. Tras la calibración fotométrica, cuatro de las fuentes mostraban claras discordancias en la fotometría J de CAIN-2 respecto a J de 2MASS, al ser la diferencia entre ambas mayor que la suma de sus errores. Tras estudiar cada caso, se comprobó que las fuentes se encontraban en la zona más externa de la búsqueda. Dos de ellas estaban en la región de viñeteo por el *dithering* y las otras dos en otra región en que las deformaciones ópticas de CAIN-2 son más patentes (con lo que la PSF también estaba deformada¹). Para las cuatro fuentes, se usó la fotometría J catalogada por 2MASS, con marcas de calidad AAA. Otras dos fuentes poseían también leves diferencias de magnitud entre las medidas CAIN-2 y 2MASS en las tres bandas infrarrojas; sin embargo, en esta ocasión, binariedad y variabilidad parecen ser las razones de las diferencias (como se comentará más adelante). Para ambas se ha usado la fotometría de CAIN-2.

Las tres fuentes más brillantes del campo (σ Orionis AB, D y E), con magnitudes J más brillantes que $J = 7.2$, saturan en las imágenes JHK_s de CAIN-2. Se han tomado las magnitudes tabuladas por 2MASS. Gracias a esta incorporación, en una misma búsqueda se posee información fotométrica de objetos en el rango de magnitudes de J entre 4.8 y 20.2 (es decir, se cubre el dominio espectral desde O9.5 hasta la magnitudes y colores que corresponden a las enanas L intermedias de σ Orionis). En la Tabla 4.3 se ofrecen las magnitudes de completitud (10σ) y límite (3σ) para las imágenes en cada una de las bandas. Nótese que se ha detectado un número apreciable de fuentes con magnitudes más débiles que la límite.

CCD/IAC-80

En la noche del 17 de noviembre de 2004 se obtuvieron con la cámara CCD del telescopio IAC-80 (véase Sección C.13.1) 30 imágenes de 30 s en la banda I centradas en σ Orionis AB. Se aprovechó la circunstancia de que el cielo estuviese cubierto por una fina capa de nubes, ya que se impedía así que las estrellas centrales saturaran demasiado y sus líneas de sangrado contaminasen la búsqueda. También se tomaron imágenes de la misma región en las bandas VRI con tiempos de exposición más cortos. De nuevo, las imágenes fueron reducidas (sustraídas de *overscan* y corregidas de *flat field* –tomado al atardecer–), alineadas y combinadas dentro del entorno IRAF. La imagen I combinada se muestra a la izquierda de la fila inferior de la Figura 4.1. Nótese que el campo de visión de la cámara CCD en el IAC-80, 7.4×7.4 arcmin², es mayor que el de CAIN-2. Esta búsqueda se restringe a la región de solapamiento, que es todo el área cubierta con CAIN-2 (18 arcmin²).

¹Nota de interés para los usuarios de CAIN-2/TCS: parece ser que estas deformaciones de la PSF no eran tan claras hace un quinquenio. Se deduce, pues, que la calidad óptica del instrumento/telescopio ha empeorado recientemente. V.J.S. Béjar ha planteado también como posible explicación un mal centrado del dicróico durante un cambio de instrumentación. Sin embargo, las deformaciones están presentes en *todas* las imágenes individuales obtenidas durante dos años.

Se realizó fotometría de PSF en la imagen I combinada usando los mismos parámetros que durante la fotometría infrarroja. No se realizó calibración astrométrica. Debido a la presencia de nubes, no se pudieron obtener imágenes de estrellas estándares de calibración fotométrica durante la noche del 17 de noviembre de 2004. La calibración fotométrica se realizó *a posteriori* mediante la comparación con datos publicados anteriormente en la misma banda (I de Johnson). En particular, se utilizaron los datos presentados en la Tesis de Wolk (1996), cuyo área de búsqueda se solapaba en gran medida con la de este trabajo. No todos los objetos en común (una treintena en total) se pudieron utilizar para la calibración, ya que algunos de los nuestros saturaban en el estudio de Wolk o presentaban disparidades claras (que pueden deberse a errores tipográficos). La desviación estándar de la diferencia entre las magnitudes I de Wolk e I instrumental de IAC-80 de 21 objetos en común, utilizados como calibradores fotométricos, fue tan sólo de 0.090 mag, similar a los errores promedio de la calibración JHK_s . En la Tabla 4.2 se muestran los objetos en común entre este estudio y el de Wolk. Las líneas horizontales separan, de arriba a abajo, a los objetos clasificados por Wolk como fuentes de rayos X en el área de CAIN-2, a las fuentes X en el área perimetral de CCD/IAC-80, pero no en CAIN-2, estrellas de pre-secuencia principal en el área de CAIN-2 y estrellas de pre-secuencia en CCD/IAC-80 y no en CAIN-2. En la primera columna se muestran las identificaciones tal y como las proporcionó Wolk, y en la segunda la identificación de los objetos seleccionados en este trabajo (este punto se tratará con más detenimiento en una próxima sección; nótese que una de las estrellas clasificadas por Wolk como de pre-secuencia principal no ha sido seleccionada en esta búsqueda). La magnitud V y el tipo espectral que Wolk proporcionó se muestran en la tercera y cuarta columnas, respectivamente. Los tipos espectrales determinados por Wolk (1996) son, en promedio, unos cinco subtipos más tempranos que los determinados por ZO02b. Para las más brillantes se muestra la fotometría V de Johnson, transformada desde V_T de Tycho, medida por *HIPPARCOS*, ya que saturaban en la búsqueda de Wolk (1996). Junto con el tipo espectral se menciona si están presentes otros rasgos espectroscópicos interesantes, como Li I $\lambda 6707.8 \text{ \AA}$ en absorción o H α $\lambda 6562.8 \text{ \AA}$ en emisión (junto con una estimación cualitativa de su intensidad). En la quinta columna aparece la clasificación del objeto según Wolk (X: fuente de rayos X; PMS: estrella de pre-secuencia principal, no emisora de rayos X). En la sexta y última columna se proporciona otro tipo de información extraída de SIMBAD (como tipos espectrales alternativos publicados por otros autores o tabulados por SIMBAD, binariedad visual derivada a partir de los datos de este trabajo o nombres IAU/IAI para los objetos que no están en la región de CAIN-2).

En la Figura 4.2 se muestran la relación entre las magnitudes I de Wolk e I instrumentales de CCD/IAC-80 (a la izquierda) y el número de objetos por intervalo de magnitud detectados en este trabajo en función de la magnitud I calibrada (a la derecha). Las magnitudes de completitud y límite en la banda I de esta búsqueda son sólo $I_{\text{compl}} \sim 17.5$, $I_{\text{lim}} \sim 18.5$ (debido a las limitaciones meteorológicas, de tiempo de exposición –15 min en total– y al procedimiento de observación –el uso de tiempos de exposición individuales muy cortos hace que la contribución del ruido del lectura sea mayor–). Tan sólo los objetos del cúmulo más brillantes que $J \sim 16.5$ tendrán contrapartida detectada en la banda I . Este hecho impide, por tanto, detectar enanas marrones de baja masa y objetos de masa planetaria pertenecientes al cúmulo únicamente a partir de la correlación entre las imágenes I del IAC-80 con las infrarrojas del TCS.

Tabla 4.2: Miembros y candidatos a miembros de σ Orionis catalogados por Wolk (1996)^a.

Id. (Wolk)	Id.	V (Wolk)	T. Esp. ^b (Wolk)	Clas. ^c (Wolk)	Más
SIGMA ORI.	AB	3.782(10) ^d	–	X	O9.5V+B2V
R053847-0235	E	6.352(11) ^d	–	X	B2Vp
4771 1147	80	13.713(78)	K0, SB, H α , Li I	X	K5
R053838-0236	37	14.053(7)	–	X	K8
R053841-0237	13	14.582(71)	K3, H α , Li I	X	K3
R053847-0237	14	15.982(22)	K5, H α , Li I	X	
R053851-0236	44	17.680(87)	K5, d, H α **	X	
4771 1133 ^e		8.388(16) ^d	–	X	B8V, HD 294272 A
4771 1133 ^e		8.555(17) ^d	–	X	~A0, HD 294272 B
4771 1049		13.021(44)	K5, H α , Li I	X	
R053844-0232		13.741(18)	–	X	
R053834-0234		14.726(18)	K0, Li I	X	Doble (IAC-80)
R053831-0235		15.658(11)	K7, H α , Li I	X	M0.0, [W96] r053831-0235
R053832-0235		14.548(72)	–	X	
R053849-0238		14.838(194)	K5, d, H α *	X	M0.5, [W96] rJ053849-0238
R053853-0239		15.653(258)	M1, H α , Li I*	X	
R053833-0236		16.403(180)	K5, d, H α *, Li I	X	M3.5, [W96] r053833-0236
R053843-0233		15.130(34)	–	X	
P053844-0233	109	~12	–	PMS	
P053842-0237	15	15.080(7)	–	PMS	
P053847-0234	88	17.356(88)	–	PMS	
P053843-0237	18	17.928(81)	–	PMS	
P053841-0236	29	17.206(50)	–	PMS	
P053850-0237	6	18.172(107)	–	PMS	
P053836-0236	...	18.427(123)	–	PMS	
4771 1138		~11	–	PMS	BD-02 1324D
P053834-0239		14.065(3)	–	PMS	
P053833-0236		15.866(13)	–	PMS	
P053831-0236		16.303(18)	–	PMS	Kiso A-0904 71
P053842-0238		17.064(35)	–	PMS	¿IRAS 05362-0240?
P053840-0233		17.638(61)	–	PMS	
P053840-0232		17.645(64)	–	PMS	

^a: Fuentes X en el campo de CAIN-2 (primera sección), fuentes X en el campo del IAC-80 y no en CAIN-2 (segunda), estrellas de la pre-secuencia principal en el campo de CAIN-2 (tercera) y estrellas de la pre-secuencia principal en el campo del IAC-80 y no en CAIN-2 (cuarta).

^b: Tipo espectral, nota (SB: binaria espectroscópica; d: espectro débil), H α en emisión (*: $-50 \text{ \AA} < \text{pEW} < -10 \text{ \AA}$; **: $\text{pEW} < -50 \text{ \AA}$), Li I en absorción (*: $\text{pEW} < +0.1 \text{ \AA}$).

^c: X: *X-ray sources near σ Orionis*; PMS: *non X-ray pre-main sequence stars near σ Orionis*.

^d: Fotometría de Johnson, transformada de Tycho.

^e: Objeto doble no resuelto por Wolk (tratado en Cap. 3).

LIRIS/WHT

Además de las observaciones con telescopios de clase 1 m, se utilizó el instrumento LIRIS en el WHT (véase Sección C.2.3) para tomar una única imagen profunda de la región en la banda K_s . Se tomaron 14 posiciones, en cada una de las cuales se promediaron 60 imágenes de 1 s de exposición individual. Para la combinación final sólo se tomaron las 10 posiciones con el mejor *seeing*. La imagen resultante se muestra a la derecha de la fila inferior de la Figura 4.1. Sobre ella se han marcado con círculos los candidatos a miembros detectados en la búsqueda y que se comentarán en la sección siguiente (están etiquetados con su número

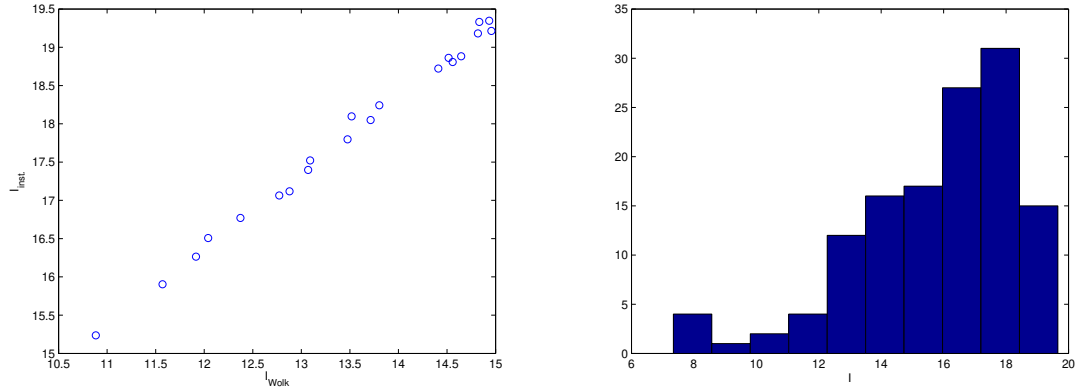


Figura 4.2: *Izquierda:* comparativa entre la magnitud I instrumental medida con IAC-80 (eje vertical) con la magnitud I calibrada por Wolk (1996) (eje horizontal). *Derecha:* número de objetos por intervalo de magnitud en función de la magnitud I del IAC-80 tras la calibración. Las magnitudes de completitud y límite son $I_{\text{compl}} \sim 17.5$ e $I_{\text{lim}} \sim 18.5$, respectivamente.

de identificación; el símbolo X informa, además, de que el objeto es una fuente de rayos X catalogada por *ROSAT*). La imagen es aproximadamente igual de profunda que la imagen K_s tomada con CAIN-2 ($K_{s,\text{lim}} \sim 17.5$), pero con una resolución espacial 2.5 veces mejor.

Tabla 4.3: Magnitudes de completitud y límite en las imágenes ópticas e infrarrojas.

Banda	Completitud (mag)	Límite (mag)
I	17.5	18.5
J	17.5	19.0
H	17.5	18.5
K_s	16.5	17.5

4.2.2 Selección

En la región estudiada se conocían nueve objetos publicados en artículos arbitrados más otros ocho objetos catalogados por Wolk (1996). De los primeros nueve objetos, seis forman parte del sistema OB central, previamente descrito en el Cap. 2 (σ Orionis A, B, C, D, E e IRS1). Estas observaciones óptico-infrarrojas no han sido capaces de resolver el sistema σ Orionis A+B+IRS1, por lo que se tratarán como un único objeto (identificado como AB). Los otros tres son fuentes previamente detectadas por Wolk, y con valores de $\log(L_X/L_{\text{bol}})$ muy altos. De estos tres objetos, Wolk (1996) y Sanz-Forcada et al. (2004) presentaron información espectroscópica y de flujos X medidos con *XMM-Newton*, respectivamente, de dos (GSC 04771-01147 y [W96] rJ053841-0237). Ambas fuentes son estrellas K tempranas con rasgos espectrales de juventud y con luminosidades en rayos X entre 0.15 y 0.20 veces la de σ Orionis AB. El restante objeto, [W96] rJ053838-0236, fue estudiado espectroscópicamente por primera vez por ZO02b. De los ocho objetos identificados

únicamente por Wolk, dos son fuentes de rayos X detectadas con *ROSAT* y seis fueron catalogados como estrellas de pre-secuencia principal a partir de su posición en diagramas color-magnitud. De nuevo, Wolk mostró información espectroscópica sobre las dos fuentes de rayos X. Ambas poseen también rasgos espectrales de juventud. Véanse más detalles sobre los objetos en la Sección 4.3.1.

La selección de objetos se ha realizado en distintos pasos: (i) catálogo de miembros conocidos en la región estudiada (los 17 comentados arriba); (ii) catálogo de fuentes de rayos X no conocidas hasta ahora; (iii) delimitación de una envolvente inferior de todos los miembros conocidos y las contrapartidas óptico-infrarrojas de las nuevas fuentes X en los diagramas color-magnitud I vs. $I - J$ y J vs. $J - K_s$; (iv) selección como candidatos a miembros del cúmulo de todas aquellas fuentes a la derecha y arriba de la envolvente inferior en los diagramas color-magnitud.

Rayos X

En la Sección 3.3.10 se comentó que la emisión intensa en rayos X de un objeto es una prueba adicional de extrema juventud. Mientras que en el caso de las estrellas más tempranas la causa principal es la de la existencia de vientos, en las estrellas más tardías existen corrientes electromagnéticas inducidas en la zona de convección e incluso puede haber interacción entre la estrella y un disco de acreción. Se ha realizado un estudio de la región cubierta por CAIN-2/TCS utilizando la herramienta de Astronomía Virtual *Aladin* en busca de fuentes detectadas por los instrumentos a bordo del observatorio de ultravioleta extremo y rayos X *ROSAT* (en particular el High Resolution Imager, HRI, y los dos Position Sensitive Proportional Counters, PSPC) y presentes en sus más importantes catálogos (*ROSAT* All-Sky Bright Source Catalogue –1RXS, Voges et al. 1999–, Second *ROSAT* Position Sensitive Proportional Counter Catalog –2RXP, *ROSAT* 2000–, la versión WGACAT de las fuentes *ROSAT* –WGACAT, White et al. 2000– y *ROSAT* Source Catalog of Pointed Observations with the High Resolution Imager –1RXH, *ROSAT* Team 2000–). Dependiendo del catálogo utilizado, para cada suceso (“evento”) detectado por el satélite espacial se tabulan principalmente sus coordenadas, el número de cuentas por segundo en la región de energías estudiadas y, en ocasiones, los cocientes de dureza.

Tres fuentes, con números identificativos en la imagen en la banda K_s ids. 6, 45 y 67, se han detectado en esta búsqueda virtual y no fueron clasificadas en el estudio de Wolk (1996) como fuentes de rayos X. Viceversa, Wolk no presentó ningún objeto que no apareciese en los catálogos anteriores. Las fuentes ids. 6 y 45 fueron clasificadas por Wolk como estrellas de pre-secuencia principal. El hecho de la no identificación de la fuente 67 se debe muy probablemente a su proximidad a σ Orionis E.

A la izquierda de la Figura 4.3 se muestra una imagen en falso color de la región central, con un campo de visión de unos 4 arcmin de lado. Para su composición se utilizó la herramienta *Aladin*. En azul se representa la emisión en rayos X detectada por HRI/*ROSAT*, y en verde y rojo las fuentes 2MASS en los filtros J y K_s , respectivamente. En ella son visibles la mayoría de las fuentes X detectadas en los catálogos de *ROSAT*, junto con sus contrapartidas en el infrarrojo cercano.

La totalidad de las fuentes detectadas con *ROSAT* también lo fueron con observaciones

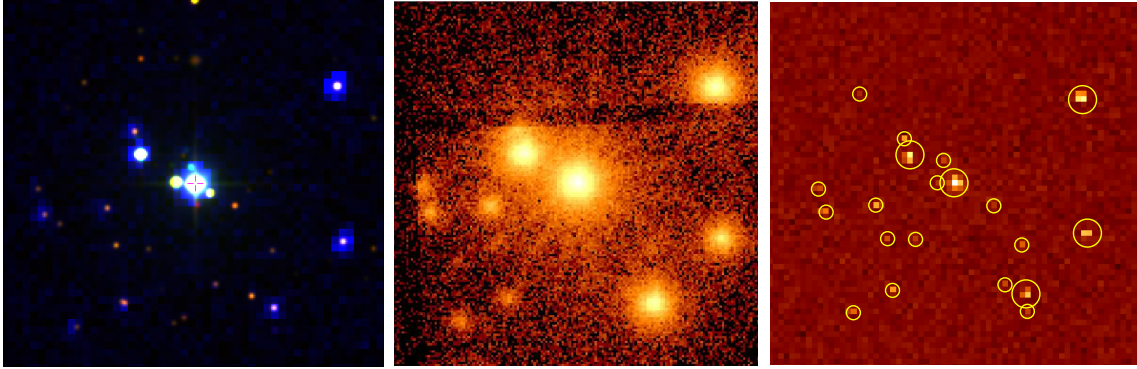


Figura 4.3: *Izquierda*: imagen en falso color, resultado de combinar las imágenes HRI/*ROSAT* (azul), *J* (verde) y *K_s* (rojo) de 2MASS. *Centro*: porción central de la imagen EPIC/*XMM-Newton* obtenida por Sanz-Forcada et al. (2004). *Derecha*: porción central de la imagen ACIS/*Chandra* obtenida por Skinner et al. (2004). Se han marcado con círculos todas las fuentes X con número de cuentas por encima de 3 veces la desviación estándar promedio del cielo. El campo de visión de las tres imágenes es similar al de la búsqueda *IJK_s* ($\sim 4 \times 4$ arcmin²).

más recientes realizadas con el instrumento European Photon Imaging Cameras², EPIC, a bordo de *XMM-Newton* (ver Sanz-Forcada et al. 2004 para encontrar detalles sobre las observaciones). Aparte de las fuentes con números de identificación ids. 6, 45 y 67, cuyas emisiones en rayos X se ven confirmadas, existen otras tres fuentes adicionales a las presentadas por Wolk (1996), con números de identificación ids. 13, 33 y 53. Las dos primeras (id. 13 e id. 33) son muy débiles. La detección de las fuentes X en los datos EPIC se ha realizado inspeccionando visualmente una imagen proporcionada amablemente por J. Sanz Forcada. La porción central de esta imagen se muestra en el centro de la Figura 4.3 (se ha utilizado un *binning* de 64 píxeles). La figura completa se puede visualizar en la Fig. 1 de la publicación por Sanz-Forcada et al. (2004).

También se han estudiado dos imágenes extraídas de los datos públicos de *Chandra* Data Archive, tomadas con el satélite *Chandra*. La imagen de la región obtenida con el instrumento Advanced CCD Imaging Spectrometer ACIS (Skinner et al. 2004), aunque poco profunda, permite: (i) resolver el sistema σ Orionis AB e IRS1; (ii) confirmar otras ocho fuentes detectadas tanto con *ROSAT* como con EPIC/*XMM-Newton*; (iii) confirmar la emisión X de una débil fuente en la imagen EPIC no detectada por *ROSAT* (la fuente id. 33); (iv) detectar una fuente débil en el óptico, con color *J*–*K_s* extremadamente rojo, cuya contrapartida en rayos X era desconocida (id. 5).

La imagen obtenida con la High Resolution Camera HRC-I (Adams et al. 2004; ver Sección 5.3.1) es más profunda y con una resolución espacial excelente. Gracias a ella, se ha podido confirmar la emisión X de todas las fuentes detectadas con *ROSAT*, EPIC/*XMM-Newton* y/o con ACIS (13 en total, incluida id. 13) e identificar cinco nuevas fuentes X con contrapartida óptica: σ Orionis D e ids. 29, 30, 47 y 82. Las dos últimas sólo poseen un número de cuentas dos veces superior a la desviación estándar promedio del fondo de cielo. Las coordenadas de las fuentes a partir de las imágenes HRC-I difieren de las de sus contrapartidas óptico-infrarrojas en menos de 2 arcsec en el peor de los casos; el

²En plural porque el instrumento EPIC posee tres cámaras sensibles a distintas longitudes de onda.

promedio de la diferencia de coordenadas es menor que 0.5 arcsec. No hay ninguna fuente de rayos X sin contrapartida infrarroja (sólo hay una fuente X con contrapartida infrarroja pero sin contrapartida óptica, por encontrarse ésta completamente embebida en el halo de σ Orionis AB; será tratada más adelante).

En resumen, con los datos obtenidos por *ROSAT*, *XMM-Newton* y *Chandra* se ha detectado emisión en rayos X proveniente de: (i) las siete fuentes X catalogadas por Wolk, todas ellas con rasgos espectroscópicos medidos de juventud extrema, como Li I en absorción o H α en emisión; (ii) σ Orionis D, de tipo espectral B2V; (iii) tres estrellas catalogadas por Wolk (1996) como de presecuencia principal; (iv) y de otras ocho fuentes *con* contrapartida óptica detectadas tanto con IAC-80 como con TCS. Todos estos objetos (excepto la fuente id. 5) han servido para marcar la secuencia del cúmulo en su región central y poder definir una envoltura inferior en los diagramas color-magnitud y color-color para seleccionar nuevos candidatos fotométricos a miembros de σ Orionis en el centro del cúmulo.

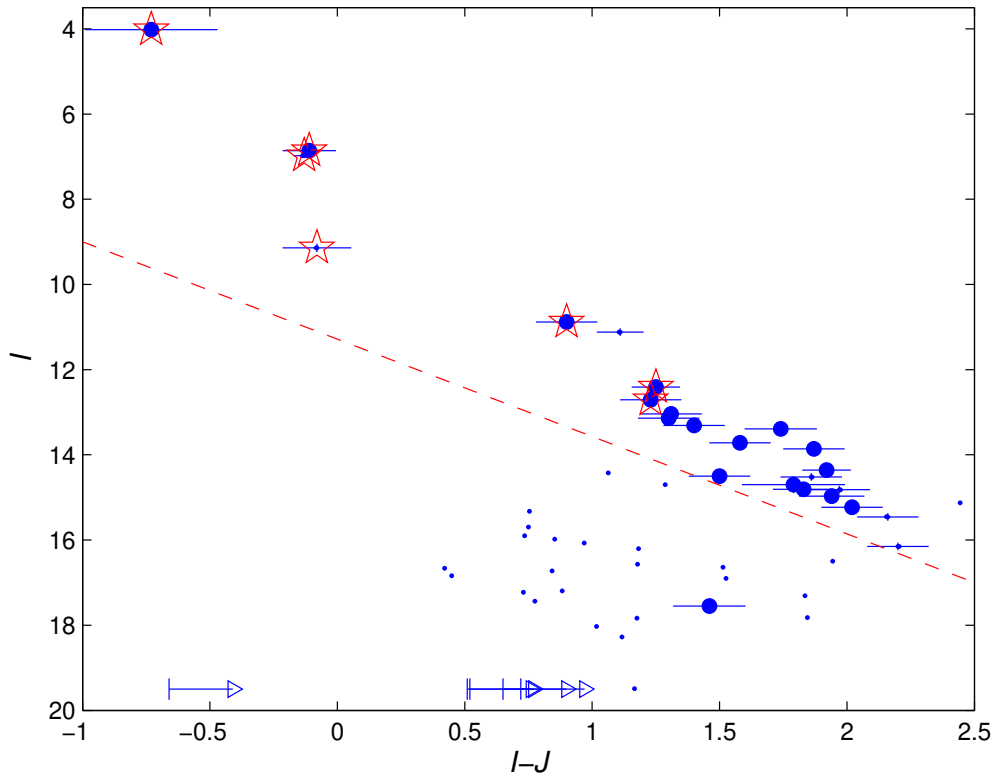


Figura 4.4: Diagrama color-magnitud I vs. $I - J$ de los objetos seleccionados en la búsqueda óptico-infrarroja. Las estrellas rojas indican miembros del cúmulo σ Orionis publicados en artículos arbitrados; los círculos rellenos, fuentes de rayos X; los puntos con barras de error, objetos seleccionados (la barra de error vertical de I es del orden del tamaño de los símbolos); y los puntos, fuentes que posiblemente no pertenecen al cúmulo. La línea discontinua indica la frontera de la región de objetos seleccionados como probables miembros. Compárese este gráfico con la Figura 2.4.

Diagramas color-magnitud y color-color

Los objetos en el diagrama color-magnitud I vs. $I - J$ mostrado en la Figura 4.4 se pueden clasificar en cuatro conjuntos: (i) objetos con magnitud I medida y que marcan la secuencia del cúmulo; (ii) fuentes sin medida I . Sus magnitudes J son más débiles que $J = 18.7$ y su magnitud I es más débil que la magnitud límite de la búsqueda óptica, 18.5. Sólo se pueden ofrecer límites inferiores a su color $I - J$ (representados así en los dos diagramas); (iii) un objeto con magnitud I medida y que “parece” no seguir la secuencia del resto de objetos seleccionados (id. 5); (iv) y fuentes no pertenecientes al cúmulo. En la figura, las estrellas denotan los objetos conocidos de la región y publicados en artículos arbitrados. Los objetos con círculos rellenos son fuentes emisoras de rayos X. Algunas de estas fuentes muestran rasgos espectroscópicos de juventud. Los objetos seleccionados como candidatos a miembros y otros objetos interesantes seleccionados en la búsqueda infrarroja se han marcado con sus barras de error. El resto de objetos, presumiblemente de fondo, se han indicado únicamente con puntos. La ventana izquierda de la Figura 4.5 muestra, con la misma leyenda, el diagrama color-magnitud J vs. $J - K_s$. En general, los objetos jóvenes conocidos y/o con emisión X se localizan en la parte superior izquierda de este diagrama. Nótese la presencia de fuentes infrarrojas con colores $J - K_s > 1.5$ y sin contrapartida óptica.

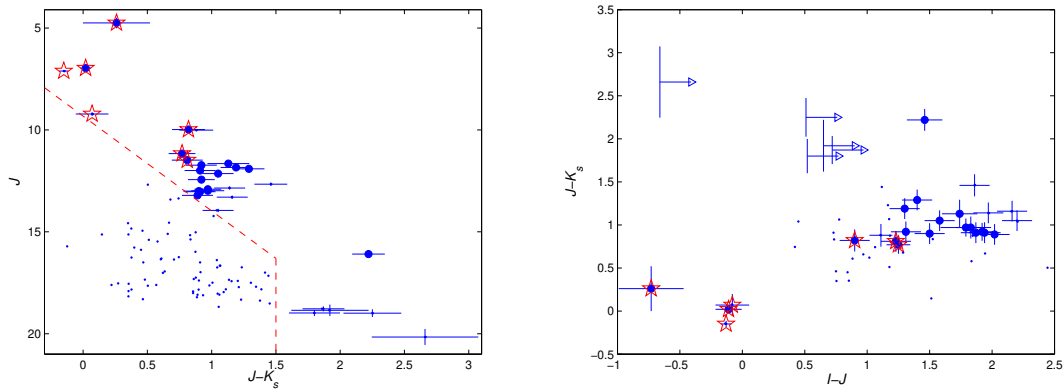


Figura 4.5: Lo mismo que la Fig. 4.4, pero mostrando el diagrama color-magnitud J vs. $J - K_s$ (izquierda) y el diagrama color-color $J - K_s$ vs. $I - J$ (derecha).

Se han representado los diagramas color-color $J - K_s$ vs. $I - J$ y $J - H$ frente a $H - K_s$ en las Figuras 4.5 (ventana derecha) y 4.6, respectivamente. En el último diagrama, las estrellas con los tipos más tempranos se localizan hacia la posición $H - K_s, J - H \sim 0, 0$ mag. Las estrellas con tipos más tardíos (o enrojecidas o con envolturas o con discos circunestelares) se desplazan hacia colores más rojos (hacia arriba y la derecha): las estrellas de tipo K espectral tardío poseen colores $H - K_s, J - H \sim 0.2, 0.7$ mag, mientras que las estrellas M los tienen hacia 0.4, 0.7 mag. En la Fig. 4 de Caballero et al. (2004; Figura 7.1 en esta memoria de Tesis) se puede encontrar un diagrama color-color $J - H$ vs. $H - K_s$ con todos los objetos del cúmulo de σ Orionis con espectroscopia hasta 2004, fotometría 2MASS precisa y tipos espectrales entre K7.0 y M6.5. En el diagrama color-color infrarrojo se han representado con barras de error discontinuas los valores correspondientes a fuentes

interesantes más débiles de $J \approx 16$ y colores $J - K_s > 1.5$ mag, sin contrapartida en el óptico.

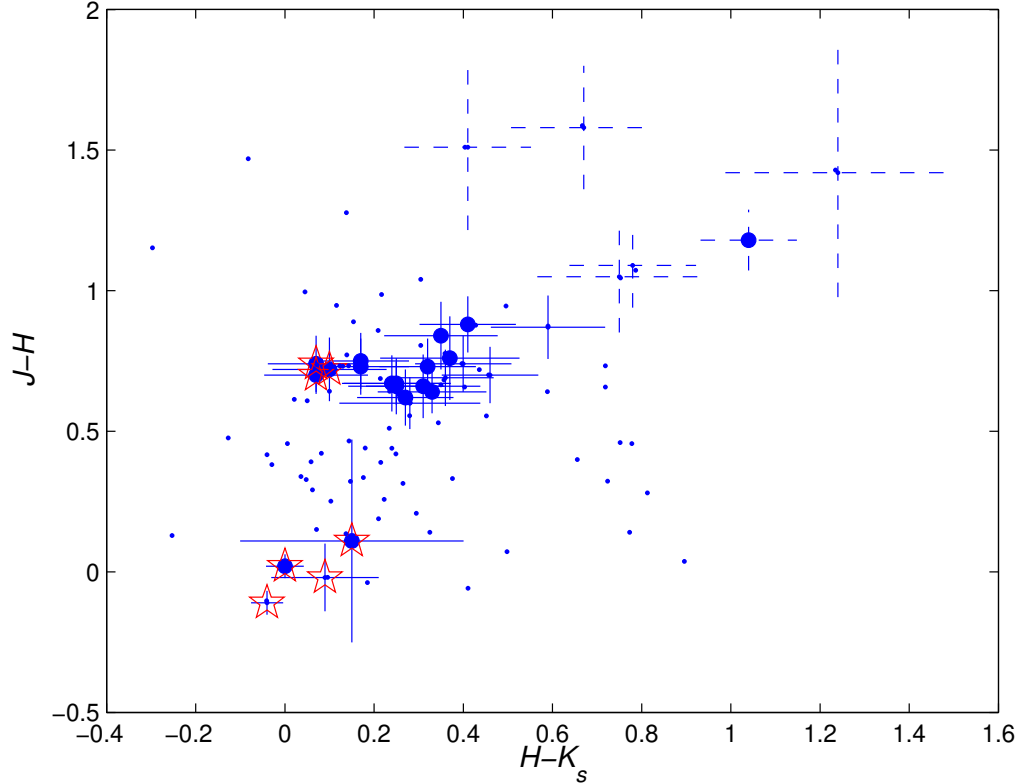


Figura 4.6: Lo mismo que la Fig. 4.4, pero mostrando el diagrama color-color $J - H$ vs. $H - K_s$. Las barras de error de los objetos interesantes seleccionados a partir de la fotometría JHK_s se representan mediante líneas discontinuas.

Objetos seleccionados de la búsqueda óptico-infrarroja

Todos los objetos seleccionados por sus magnitudes IJK_s se encuentran *simultáneamente* por encima de las envolventes inferiores representadas en las Figuras 4.4 y 4.5 (izq.) mediante líneas (quebradas) discontinuas. Hay un objeto no seleccionado en el diagrama color-magnitud J vs. $J - K_s$ y sí en el I vs. $I - J$ que no verifica el criterio de selección simultáneo óptico-infrarrojo³. Viceversa, hay un objeto emisor en rayos X con un color $J - K_s$ muy rojo pero con un color $I - J$ típico de estrellas de fondo (id. 5).

En las Tablas 4.4 y 4.5 se proporciona la lista completa de objetos seleccionados como miembros y candidatos a miembros a partir de sus magnitudes óptico-infrarrojas. En la primera Tabla se muestra para cada uno de los objetos sus coordenadas J2000 y sus

³Coordenadas y fotometría de este objeto: 05 38 50.78 -02 36 26.8 J2000; $I = 15.13 \pm 0.09$, $J = 12.68 \pm 0.08$, $H = 12.48 \pm 0.06$, $K_s = 12.18 \pm 0.09$.

Tabla 4.4: Fotometría de los objetos seleccionados a partir de sus magnitudes IJK_s .

Id.	α^{J2000}	δ^{J2000}	I	J	H	K_s
AB	05 38 44.76	-02 36 00.2	4.02 ± 0.01^a	4.75 ± 0.26^b	4.64 ± 0.25^b	4.490 ± 0.016^b
E	05 38 47.20	-02 35 40.5	$6.86 \pm 0.10^{a'}$	6.97 ± 0.03^b	6.95 ± 0.03^b	6.95 ± 0.03^b
D	05 38 45.62	-02 35 58.9	6.98 ± 0.03^a	7.12 ± 0.03^b	7.22 ± 0.03^b	7.26 ± 0.02^b
50	05 38 44.12	-02 36 06.1	$9.14 \pm 0.10^{a'}$	9.22 ± 0.09	9.24 ± 0.08	9.15 ± 0.09
80	05 38 38.55	-02 34 53.8	10.88 ± 0.09	9.98 ± 0.08	9.26 ± 0.08	9.16 ± 0.10
109	05 38 44.91	-02 33 57.4	11.12 ± 0.09	10.01 ± 0.02^b	9.41 ± 0.09	9.13 ± 0.13
37	05 38 38.21	-02 36 37.4	12.41 ± 0.09	11.16 ± 0.03^b	10.46 ± 0.06	10.39 ± 0.10
13	05 38 41.24	-02 37 22.1	12.71 ± 0.09	11.48 ± 0.08	10.74 ± 0.06	10.67 ± 0.09
14	05 38 47.86	-02 37 20.0	13.39 ± 0.09^c	11.65 ± 0.11	10.89 ± 0.10	10.52 ± 0.12
15	05 38 42.23	-02 37 14.4	13.04 ± 0.09	11.73 ± 0.08	10.98 ± 0.06	10.81 ± 0.09
67	05 38 47.48	-02 35 25.7	13.14 ± 0.09	11.84 ± 0.08	11.00 ± 0.09	10.65 ± 0.09
47	05 38 43.02	-02 36 14.3	13.31 ± 0.09	11.91 ± 0.08	11.03 ± 0.06	10.62 ± 0.09
33	05 38 48.25	-02 36 41.7	13.86 ± 0.09	11.99 ± 0.08	11.33 ± 0.06	11.08 ± 0.09
45	05 38 48.66	-02 36 17.0	13.72 ± 0.09	12.14 ± 0.08	11.41 ± 0.06	11.09 ± 0.09
44	05 38 51.43	-02 36 21.9	14.36 ± 0.09	12.44 ± 0.03^b	11.77 ± 0.07	11.52 ± 0.10
88	05 38 47.24	-02 34 37.3	14.52 ± 0.09	12.66 ± 0.08	11.79 ± 0.08	11.20 ± 0.10
18	05 38 43.82	-02 37 06.8	14.82 ± 0.09	12.85 ± 0.08	12.11 ± 0.06	11.71 ± 0.09
53	05 38 51.73	-02 36 04.7	14.7 ± 0.2	12.91 ± 0.03^b	12.27 ± 0.07	11.94 ± 0.10
82	05 38 49.74	-02 34 53.5	14.81 ± 0.09	12.98 ± 0.08	12.32 ± 0.08	12.01 ± 0.10
29	05 38 41.34	-02 36 44.0	14.50 ± 0.09	13.00 ± 0.08	12.27 ± 0.06	12.10 ± 0.09
6	05 38 49.96	-02 37 36.8	14.97 ± 0.10	13.03 ± 0.08	12.36 ± 0.06	12.12 ± 0.09
30	05 38 46.81	-02 36 43.9	15.23 ± 0.09	13.21 ± 0.08	12.59 ± 0.06	12.32 ± 0.09
10	05 38 45.21	-02 37 29.5	15.46 ± 0.09	13.30 ± 0.08	12.60 ± 0.06	12.14 ± 0.09
56	05 38 41.46	-02 35 52.3	16.15 ± 0.09	13.95 ± 0.08	13.26 ± 0.06	12.91 ± 0.09

^a: Fotometría extraída del catálogo *HIPPARCOS* (^{a'}: escalando con una imagen I de tiempo de exposición muy corto).

^b: Fotometría infrarroja extraída del catálogo 2MASS.

^c: Fotometría I afectada por la binariedad del objeto.

magnitudes IJK_s . En la segunda se muestra el nombre adoptado en la búsqueda, si es una fuente de rayos X detectada por *ROSAT*, *XMM-Newton* y/o *Chandra*, la clasificación según Wolk (1996) y el nombre *Simbad* (entre paréntesis se indican notas importantes si las hubiera).

Otros objetos interesantes seleccionados de la búsqueda infrarroja

Debido a la falta de profundidad de las imágenes I en comparación con las JHK_s , hay un gran número de fuentes infrarrojas sin contrapartida óptica. Los límites inferiores en sus colores $I - J$ no imponen en general ninguna restricción sobre su posible naturaleza. Algunas de estas fuentes son extraordinariamente rojas y merecen una atención especial. Se han seleccionado para un estudio detallado seis fuentes más débiles que $J \approx 16$ y con $J - K_s > 1.5$ mag. Sus coordenadas, magnitudes y algunas notas se muestran en la Tabla 4.6.

Se ha utilizado la imagen K_s tomada con LIRIS/WHT, con una resolución espacial mucho mejor que la obtenida con CAIN-2/TCS, para estudiar el posible ensanchamiento de las PSF de las otras cinco fuentes seleccionadas, ya que podían ser galaxias enrojecidas de fondo (la elevada contaminación por galaxias muy lejanas cobra vital importancia en las búsquedas infrarrojas profundas, como la descrita en el Cap. 6). Mediante este chequeo,

Tabla 4.5: Coordenadas, rayos X y nombres de los objetos seleccionados a partir de sus magnitudes IJK_s .

Id.	Nombre	Wolk ^a	<i>ROSAT</i> ^b	<i>XMM-Newton</i>	<i>Chandra</i>	Nombre ^c
AB	ς 053844.8–023600	X	1RXS	EPIC	HRI-C ^d , ACIS ^d	σ Orionis AB & IRS1
E	ς 053847.2–023540	X	1RXS	EPIC	HRI-C, ACIS	σ Orionis E
D	ς 053845.6–023559				HRI-C	σ Orionis D
50	ς 053844.1–023606					σ Orionis C
80	ς 053838.6–023454	X	1RXS, 1RXH	EPIC	HRI-C, ACIS	GSC 04771–01147
109	ς 053844.9–023357	PMS				
37	ς 053838.2–023637	X	1RXS, 1RXH	EPIC	HRI-C, ACIS	[W96] rJ053838–0236
13	ς 053841.2–023722	X	1RXS, 1RXH	EPIC	HRI-C, ACIS	[W96] rJ053841–0237
14	ς 053847.9–023720	X	1RXH	EPIC	HRI-C	(doble)
15	ς 053842.2–023714	PMS		ζ EPIC?	HRI-C	
67	ς 053847.5–023526		1RXH	EPIC	HRI-C, ACIS	
47	ς 053843.0–023614				HRI-C ^e	
33	ς 053848.2–023642			ζ EPIC?	HRI-C, ACIS	
45	ς 053848.7–023617		1RXH	EPIC	HRI-C, ACIS	
44	ς 053851.4–023622	X	1RXS, 1RXH	EPIC	HRI-C, ACIS	
88	ς 053847.2–023437	PMS				
18	ς 053843.8–023707	PMS				
53	ς 053851.7–023605			EPIC	HRI-C	
82	ς 053849.7–023454				HRI-C ^e	
29	ς 053841.3–023644	PMS			HRI-C	
6	ς 053850.0–023737	PMS	1RXH	EPIC	HRI-C, ACIS	
30	ς 053846.8–023644				HRI-C	
10	ς 053845.2–023730					
56	ς 053841.5–023552					

^a: Clasificación según Wolk (1996) (X: fuente X; PMS: estrella de pre-secuencia principal).

^b: 1RXS: fuente catalogada en *ROSAT* All-Sky Bright Source Catalogue, Second *ROSAT* PSPC Catalog y en The WGACAT version of *ROSAT* sources. 1RXH: fuente catalogada en *ROSAT* Source Catalog of Pointed Observations with the HRI.

^c: Objeto catalogado en SIMBAD.

^d: Se resuelve el sistema σ Orionis AB+IRS1.

^e: Fuente X detectada a 2 σ sobre el fondo.

se ha descartado como posible miembro del cúmulo la fuente id. 3, ya que posee una PSF ensanchada respecto al promedio del resto de objetos en la imagen. Además, su localización en el diagrama color-color $J - H$ vs. $H - K_s$ indica que no se trata de un miembro del cúmulo con colores típicos de enanas ultrafrías del campo (véase Fig. 1.5). Posiblemente se trate de una galaxia⁴.

Dos de las cuatro fuentes restantes (id. 39 e id. 12), con PSF puntual, colores $J - K_s > 1.5$ mag y sin contrapartida óptica en la banda I también poseen magnitudes JHK_s impropias de enanas ultrafrías, y probablemente se traten de más galaxias de fondo. En particular, una de las dos fuentes (id. 39) posee unos colores $J - H$ y $H - K_s$ muy parecidos a los de la fuente id. 3. Debido a la elevada latitud galáctica del cúmulo σ Orionis, no es esperable que ambas se traten de estrellas gigantes rojas de fondo, ya que se encontrarían a una distancia muy grande por debajo del plano galáctico.

Finalmente, restan dos objetos (id. 96 e id. 83) con colores $J - H$ vs. $H - K_s$ típicos de enanas de campo de tipo L intermedio-tardío. Sus magnitudes en la banda J , además, se corresponden con las de otros objetos de σ Orionis con tipos espectrales L2–4 medidos

⁴No se espera que con nuestra resolución espacial, con una FWHM no mejor que 0.4 arcsec (~ 140 AU a la distancia de σ Orionis), los discos sean resolubles.

en el óptico y en el infrarrojo. De pertenecer al cúmulo, se tratarían de objetos por debajo de la masa límite para la combustión de deuterio. Estos dos objetos se listan en la Tabla 4.6 como nuevos candidatos posibles a miembros de σ Orionis a partir de sus magnitudes infrarrojas.

En las imágenes de *Chandra* se alcanza a detectar una fuente X adicional a las seleccionadas (sin número de identificación), que coincide con un objeto detectado en las imágenes infrarrojas. Éste no fue considerado en la búsqueda óptico-infrarroja porque su fotometría en las bandas *IJH* estaba fuertemente contaminada por el halo de σ Orionis AB. De la imagen K_s de LIRIS, la menos afectada por el halo, se ha obtenido una magnitud $K_s = 12.98 \pm 0.10$. Está localizado a tan sólo ~ 20 arcsec al norte-noreste de σ Orionis AB ($V = 3.8$), una distancia menor que la que separa σ Orionis A de σ Orionis E, por lo que posiblemente se trate de un nuevo miembro del cúmulo. Este caso y el de IRS1 son ejemplos de fuentes relativamente brillantes no detectadas por la proximidad a estrellas extraordinariamente luminosas. Debido a la fuerte asimetría del sistema central, la sustracción de la imagen original e invertida⁵ en las imágenes CAIN-2 no conduce a la detección de nuevos candidatos a miembros. Por el contrario, en la imagen LIRIS en la banda K_s se detecta una sobreabundancia de objetos con magnitudes comprendidas entre $K_s \sim 10$ y 15 mag a separaciones de 30–40 arcsec del centro del cúmulo. Desgraciadamente, no se dispone de imágenes no contaminadas por las fuentes centrales en otras bandas, con las que se podría hacer una nueva correlación.

El objeto id. 5 es la fuente más interesante seleccionada como posible miembro del cúmulo y fotometría en las cuatro bandas *IJHK_s*. Presenta emisión en rayos X y rasgos propios de un objeto de transición entre los de Clase I y las T Tauri clásicas. Será tratado en profundidad en la Sección 4.3.1.

Tabla 4.6: Fotometría y coordenadas de otros objetos interesantes seleccionados en la búsqueda infrarroja.

Id.	α^{J2000}	δ^{J2000}	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>H</i>	K_s	Nombre ^f
– ^a	05 38 45.3	–02 35 41	–	–	–	12.98 ± 0.10	ς J053845.3–023541
5 ^b	05 38 41.16	–02 37 37.4	17.55 ± 0.11	16.09 ± 0.09	14.91 ± 0.06	13.87 ± 0.09	ς J053841.2–023737
96 ^c	05 38 41.93	–02 34 28.9	>18.5	18.78 ± 0.12	17.69 ± 0.09	16.91 ± 0.11	ς J053841.9–023429
39 ^d	05 38 48.07	–02 36 29.2	>18.5	18.85 ± 0.28	17.34 ± 0.09	16.93 ± 0.11	
83 ^c	05 38 43.51	–02 34 50.4	>18.5	18.98 ± 0.15	17.93 ± 0.13	17.18 ± 0.13	ς J053843.5–023450
3 ^{de}	05 38 40.05	–02 37 45.4	>18.5	18.99 ± 0.19	17.41 ± 0.11	16.74 ± 0.12	
12 ^d	05 38 42.90	–02 37 25.0	>18.5	20.16 ± 0.39	18.74 ± 0.21	17.50 ± 0.14	

^a: Emisor X (HRI-C, ACIS). Sólo magnitud K_s .

^b: Emisor X (HRI-C, ACIS). $J - K_s > 2.0$. Variable *JHK_s*.

^c: Magnitudes *JHK_s* parecidas a las de objetos de tipo L intermedio del cúmulo.

^d: Magnitudes *JHK_s* atípicas para enanas ultrafrías del campo.

^e: PSF extensa.

^f: Nuevos candidatos posibles a miembros del cúmulo σ Orionis.

⁵Véase más detalles sobre este método de sustracción de contaminación luminosa en las proximidades de estrellas brillantes en el Capítulo 9.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Notas sobre algunos objetos

Sistema central. Las estrellas de tipo temprano σ Orionis AB (junto con la fuente σ Orionis IRS1), D y E saturan en todas las imágenes de la búsqueda. Por el contrario, se han podido medir las magnitudes JHK_s de σ Orionis C (ς J053844.1–023606, id. 50), el miembro más débil del sistema OB central. Sus magnitudes medidas con CAIN-2 coinciden dentro de las barras de error con las tabuladas por 2MASS. Las detecciones en rayos X de estos seis objetos están indicadas en la Tabla 4.5. Se han estudiado las imágenes tomadas por Wolk et al. (2004) con *Chandra*, con un poder resolutivo mucho mayor que los de EPIC (*XMM-Newton*), HRI o PSPC (*ROSAT*). Se coincide con Sanz-Forcada et al. (2004) en que σ Orionis C y D son emisores muy débiles de rayos X (en realidad σ Orionis C no se detecta en ninguna de las imágenes X). Sin embargo, en las mismas imágenes, se resuelven σ Orionis AB e IRS1, así como σ Orionis E. σ Orionis IRS1, tratado con detenimiento en la Sección 5.3.1, ha resultado ser una intensa fuente X.

ς **J053838.6–023454 (id. 80, GSC 04771–01147).** De acuerdo con Wolk (1996), se trata de una binaria espectroscópica de tipo espectral aproximado K0, con $pEW(H\alpha) = -1.44 \text{ \AA}$ y $pEW(Li \text{ I}) = +0.31 \text{ \AA}$. Sanz-Forcada et al. (2004) la identificaron como candidato a miembro del cúmulo de tipo espectral K5 (a partir de un espectro RGS/*XMM-Newton*) con un nivel relativamente alto de variabilidad en su emisión de rayos X. Los autores apuntaron como posible fuente de la variabilidad la presencia de estructuras corales confinadas magnéticamente.

ς **J053844.9–023357 (id. 109).** Esta estrella, exactamente a 2 arcmin al norte de σ Orionis A, es, aparte de la estrella A2V σ Orionis C, la fuente más luminosa de la muestra sin contrapartida en rayos X. Wolk la clasificó como estrella de pre-secuencia principal. Sus magnitudes IJK_s son extraordinariamente parecidas a las de la K0 anterior, ς J053838.6–023454. La explicación de la ausencia de emisión X es un interesante ejercicio que necesita espectroscopia para resolverse. Puede que sea realmente de tipo espectral G, de forma que el espesor de su zona de convección sería menor que el de las estrellas K, o que posea una rotación más lenta que sus compañeras de similar masa, inhibiendo la formación de un campo magnético intenso por las debilitadas corrientes inducidas en su interior.

ς **J053841.2–023638 (id. 37, [W96] rJ053841-0236).** Según ZO02b, se trata de una estrella de tipo espectral $K8.0 \pm 0.5$ con emisión $H\alpha$ moderada, Li I en absorción y velocidad radial consistente con pertenencia al cúmulo. Barrado y Navascués et al. (2003b) la clasificaron como una estrella T Tauri de líneas débiles (WTTS, de *Weak-line T Tauri star*). Posteriormente, Oliveira, Jeffries & van Loon (2004a) no le detectaron excesos de flujo en las bandas K_s o L' .

ς **J053841.2–023637 (id. 13, [W96] rJ053841-0237).** Al igual que la K0 id. 80, este objeto sólo ha sido estudiado espectroscópicamente en el óptico por Wolk (1996). Esta fuente X presenta $H\alpha$ en emisión ($pEW = -7.76 \text{ \AA}$) y Li I en absorción ($pEW = +0.32 \text{ \AA}$).

Wolk y Sanz-Forcada et al. coinciden en determinarle el tipo espectral K3 a partir de datos ópticos y de rayos X, respectivamente. Según Pallavicini, Franciosini & Randich (2004), la estrella muestra evidencias de modulación rotacional de la emisión X, con un periodo de ~ 8.5 h y una amplitud del 25%. Tal variación puede atribuirse a la distribución heterogénea de regiones activas sobre la superficie de la estrella.

ς **J053847.9–023720 (id. 14)**. Doble visual, catalogada por Wolk como fuente X, cuyas componentes están separadas por una distancia angular de $\rho \sim 1.9$ arcsec, a partir de la imagen *I* del IAC-80 (del orden de 700 UA a la distancia del cúmulo; $\theta \approx 60$ deg). Wolk le determinó un tipo espectral K5 y le detectó H α en emisión (-9.56 Å) y Li I en absorción ($+0.26$ Å). Existe discordancia entre las magnitudes *JHK_s* catalogadas por 2MASS y por nosotros; este hecho se debe con probabilidad a la binariedad parcialmente resuelta del objeto. De nuestras imágenes *VRI* obtenidas con IAC-80, hemos medido las diferencias de magnitud entre los dos componentes: $\Delta V = 1.1 \pm 0.4$ mag, $\Delta R = 0.80 \pm 0.17$ mag y $\Delta I = 0.62 \pm 0.10$ mag. A partir de la imagen *K_s* de LIRIS, con una FWHM más estrecha, se ha podido determinar también $\Delta K_s = 0.88 \pm 0.08$ mag. Además, de imágenes $\Omega 2K$ disponibles en la región (véase Cap. 6), se ha medido $\Delta H = 0.57 \pm 0.02$ mag. Se proponen dos posibles alternativas para explicar la diferencia de magnitud entre los componentes A y B: (i) ambos no posean relación física, siendo el objeto más débil de fondo y con colores *peculiares*; (ii) ambos posean relación física, teniendo el objeto más brillante un moderado exceso infrarrojo (de aproximadamente 0.5 mag en *K_s*). Este último punto se ve apoyado por el color *J – K_s* combinado (A+B) extremadamente rojo para una estrella K5, de 1.13 ± 0.16 mag, y el perfil de su distribución espectral de energía mostrado en la Figura 4.7, en el que se han utilizado datos infrarrojos de Spitzer.

ς **J053842.2–023714 (id. 15)**. Estrella clasificada por Wolk (1996) como de presecuencia principal. Posible emisor X a partir de la imagen EPIC/*XMM-Newton*, verificado por su detección con relación señal-ruido superior a 3 en la imagen HRC-I/*Chandra*. Cerca de id. 13 ([W96] rJ053841-0237), id. 5 (objeto con colores óptico-infrarrojos peculiares) e id. 12 (objeto más débil de la muestra, posiblemente una galaxia de fondo).

ς **J053847.5–023526 (id. 67)**. Se encuentra a 15.5 arcsec (~ 5600 AU) de una estrella de magnitud visual 6.4, σ Orionis E. Esta distancia angular es casi tres veces menor que la distancia a σ Orionis A, estrella a su vez unas tres veces más masiva que σ Orionis E. Una simple estimación del potencial gravitatorio de la fuente id. 67 indica que podría tratarse en realidad de σ Orionis Eb. Asimismo, Sanz-Forcada et al. (2004) propusieron que las fulguraciones X detectadas en S Ori E podrían provenir de un compañero estelar más frío, que podría ser ς J053847.5–023526. A su vez, éste posee dos objetos débiles cercanos a apenas 6 arcsec y cuya fotometría *JHK_s* estaba contaminada por la primaria. Podrían tratarse de compañeros subestelares del sistema, a tan sólo 2000 AU de id. 67. Son necesarias imágenes de alta resolución espacial para verificar esta hipótesis.

ς **J053851.4–023622 (id. 44)**. Fuente X más débil en *J* clasificada por Wolk (1996) como tal. Posee espectroscopia: tipo espectral K5 y H α muy intensa, con $pEW(H\alpha) = -86$

Å.

ς **J053841.2–023737 (id. 5).** Este objeto, con PSF estelar, a pesar de poseer uno de los colores $J-K_s$ más elevados de la muestra, $J-K_s = 2.22 \pm 0.13$ mag, tiene un color $I-J$ relativamente azul, de tan sólo 1.46 ± 0.14 mag. Podría poseer la distribución espectral de energía de una galaxia enrojecida de fondo o que el flujo emergente del objeto estuviera deprimido en la banda J . Como se describe a continuación, existen indicaciones de que el objeto pertenece al cúmulo de σ Orionis.

La fuente óptico-infrarroja fue detectada a más de 3σ tanto en la imagen ACIS como en la HRC-I, ambas tomadas con *Chandra* (no fue detectada por EPIC/*XMM-Newton*). Este hecho podría descartar que se tratase de una galaxia débil de fondo, ya que de contrario su parámetro $\log(L_X/L_{\text{bol}})$ sería anómalamente alto. De acuerdo con el catálogo 2MASS, sus magnitudes JHK_s son 16.38 ± 0.09 , 15.25 ± 0.08 y 14.04 ± 0.06 , respectivamente. Junto con el objeto doble con número identificativo 14, fueron las únicas fuentes óptico-infrarrojas cuyas magnitudes CAIN-2/TCS eran discordantes con las ofrecidas por 2MASS en las tres bandas. Las diferencias de magnitud, $\Delta J = 0.29 \pm 0.13$ mag, $\Delta H = 0.34 \pm 0.10$ mag, $\Delta K_s = 0.17 \pm 0.11$ mag, no siguen un patrón determinado en función de la longitud de onda. Ello es de esperar para un objeto variable en el infrarrojo, ya que las imágenes de 2MASS se toman simultáneamente en las tres bandas, mientras que en este trabajo las imágenes usadas para realizar la fotometría son el resultado de combinar imágenes tomadas a lo largo de distintas noches, en las que la magnitud del objeto puede variar. De trabajos anteriores, es esperable que la amplitud de variabilidad aumente hacia longitudes de onda más cortas en un objeto joven con actividad atmosférica (en particular, en la fotosfera y/o en la cromosfera). Por tanto, el color anómalo $I-J$, en comparación con otros objetos del cúmulo con magnitud J similar, podría explicarse si el objeto fuera variable en la banda I con una amplitud algo mayor de 1 mag (y en J con una amplitud menor). Ello conduciría a que ς J053841.2–023737 fuese en realidad un análogo subestelar de un objeto de tipo T Tauri Clásico de muy baja masa. No se espera que un velado extraordinario en el óptico fuese el único responsable del azulamiento del color $I-J$. Nótese que la masa correspondiente a su magnitud J sería la de las enanas marrones de masa intermedia. Un escenario posible para explicar el exceso en la banda K_s , la discordancia entre fotometrías JHK_s de 2MASS y de CAIN-2/TCS, la anomalía en el color $I-J$ y su emisión en rayos X sería la presencia de un disco circun(sub)estelar. La monitorización en busca de variabilidad fotométrica, espectroscopia de resolución intermedia o fotometría en el infrarrojo medio son las herramientas adecuadas para conocer la naturaleza real del objeto. En la Sección 4.3.2 se da más información sobre su distribución espectral de energía.

ς **053841.9–023429 (id. 96)** y ς **053843.5–023450 (id. 83).** Las dos fuentes infrarrojas sin contrapartida óptica poseen las magnitudes JHK_s que tendrían las enanas ultrafrías del campo de tipos espectrales L5–8 a ~ 100 pc. Por otro lado, su magnitud J es la típica de miembros del cúmulo de tipo L2–4 con espectroscopia. El ajuste entre ambos rangos espectrales es razonable, dado nuestro desconocimiento de las posibles anomalías fotométricas de enanas L muy jóvenes (p.e., Martín 2004 propuso diferencias entre los colores de objetos L y T del mismo tipo espectral en σ Orionis y en el campo). A falta de confirmación mediante imagen en la banda I o datos espectroscópicos, se les ha catalogado

como *posibles* miembros de masa planetaria de σ Orionis. En particular, por comparación con modelos evolutivos del grupo de Lyon, de tener una edad de 3 Ma poseerían una masa de unas 8 M_{Jup} (en el Cap. 6 se proporcionan detalles sobre la determinación de la masa en el dominio subestelar del cúmulo). Si se encontrasen a la misma distancia que los miembros del corazón de σ Orionis, la separación física proyectada a los más cercanos sería de más de 15 000 AU.

4.3.2 Distribución espectral de energía: *Spitzer* y discos

Como ya se ha mencionado, durante la fase de arbitraje interno de esta memoria de Tesis, se han liberado datos de Spitzer Space Telescope. Se han construido las distribuciones espectrales de energía para los 28 candidatos a miembros del cúmulo (24 mostrados en las Tablas 4.4 y cuatro en 4.6), con datos en las longitudes de onda 0.90 (*I*), 1.24 (*J*), 1.66 (*H*), 2.19 (*K_s*), 3.6, 4.5, 5.8 y 8.0 μm . Algunas de ellas muestran indicaciones clarísimas de que los objetos poseen discos de acreción, en ocasiones muy desarrollados. En la Figura 4.7 se muestran cuatro ejemplos.

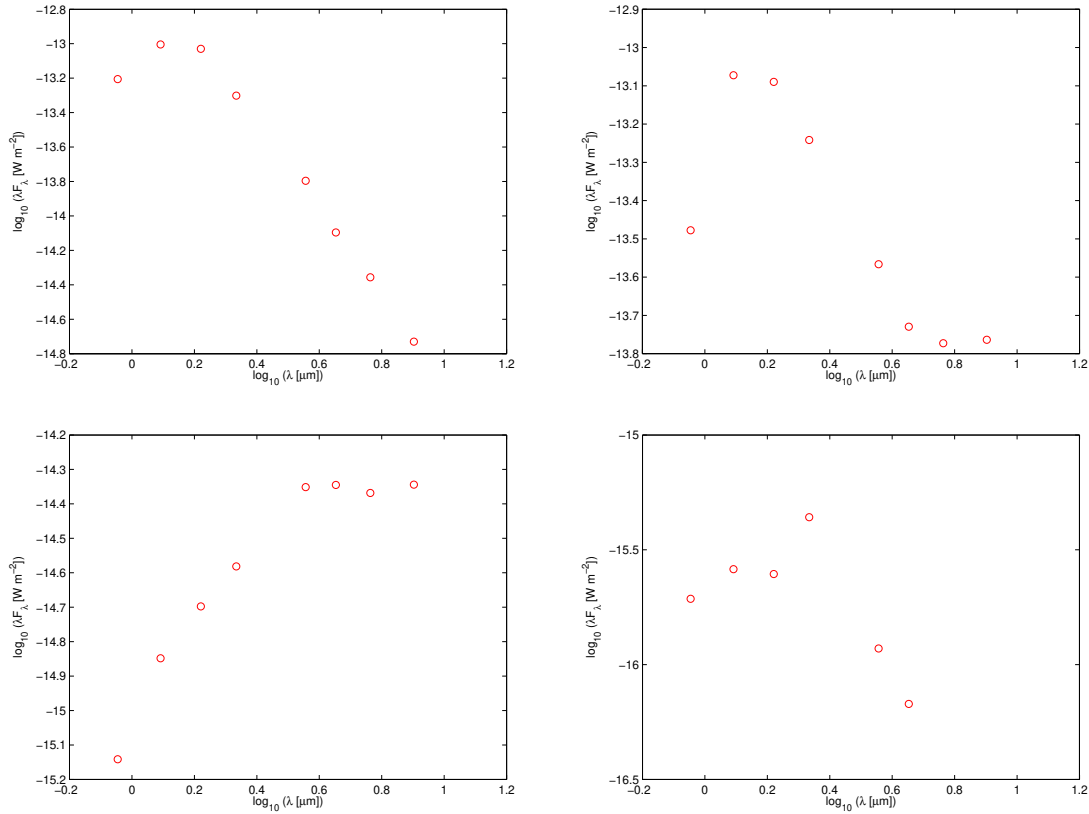


Figura 4.7: Distribuciones espectrales de energía de cuatro objetos seleccionados como miembros del cúmulo. *Arriba izquierda:* ς J053841.2–023637 (id. 13, [W96] rJ053841-0237), K3 con emisión X modulada; *arriba derecha:* ς J053847.9–023720 (id. 14), doble visual (se confirma el exceso de flujo infrarrojo); *abajo izquierda:* ς J053841.2–023737 (id. 5), presentado como un objeto de transición entre los de Clase I y las T Tauri clásicas; *abajo derecha:* ς 053843.5–023450 (id. 83), uno de los dos posibles objetos de masa planetaria.

El caso más particular, especial e importante de cara a comprender la formación de cuerpos de muy baja masa es ς J053841.2–023737 (id. 5). A partir de su fuerte exceso infrarrojo, aparente variabilidad fotométrica y apreciable emisión X, se había planteado en la sección anterior que en realidad se trata de un cuerpo estelar o subestelar con un disco. Los datos de *Spitzer* han mostrado que este disco está extraordinariamente desarrollado: ς J053841.2–023737 es 5 mag más débil en el óptico (I), pero posee la misma luminosidad que la estrella K3 ς J053841.2–023637, a muy corta separación, en $5.8 \mu\text{m}$, y es más brillante en $8.0 \mu\text{m}$. Además del exceso de flujo provocado por un disco protoplanetario de gran tamaño, éste podría estar provocando extinción (variable) en el óptico. El disco podríamos estarlo viendo de canto. La magnitud J del cuerpo central es propia de enanas marrones de σ Orionis de $\sim 0.030 M_{\odot}$. De ser la extinción en $1.2 \mu\text{m}$ menor de 1.5 mag, el objeto central seguiría tratándose de una enana marrón. Si fuese mayor de este valor, nos encontraríamos con la estrella más extinguida del cúmulo. ς J053841.2–023737 es, sin lugar a dudas, un objeto interesante de continuar estudiando.

4.3.3 Distribución espacial de estrellas y objetos subestelares

En esta búsqueda, eficiente en la detección de estrellas hasta el borde subestelar, se es sin embargo ineficaz en la confirmación de candidatos a enanas marrones y exoplanetas gigantes miembros del cúmulo. Se ha presentado un objeto que presumiblemente es una enana marrón con disco. Además, se han catalogado dos fuentes con colores $J - K_s$ extremadamente rojos sin contrapartida óptica que *podrían* ser objetos de masa planetaria de σ Orionis.

Las 24–25 estrellas del cúmulo detectadas en la búsqueda de sólo $\sim 18 \text{ arcmin}^2$ ofrecen una densidad superficial central de 1.4 arcmin^{-2} . De mantenerse en el centro del cúmulo la relación 8:3 (estrellas:objetos subestelares; Cap 6), se esperarían detectar unos nueve objetos subestelares ($\sim 0.5 \text{ arcmin}^{-2}$). Sólo se han detectado entre 1 y 3. Podría ocurrir que alguno de la veintena de objetos con $1.0 \text{ mag} < J - K_s < 1.5 \text{ mag}$ y magnitudes J entre 17 y 19 detectados en las imágenes infrarrojas, sin contrapartida detectada en la banda I , sea en realidad una enana marrón no correctamente reconocida como tal. Es necesaria imagen óptica I profunda para solucionar este dilema.

La densidad superficial de objetos subestelares esperada, $\sim 0.5 \text{ arcmin}^{-2}$, es aproximadamente el doble que la propuesta por Be04a ($0.24 \pm 0.02 \text{ arcmin}^{-2}$ utilizando los valores más precisos de Béjar et al., en prep.). Sin embargo, la detección de 24–25 estrellas en el área CAIN-2 es mucho mayor que lo planteado por Sherry et al. (2004), en hasta dos órdenes de magnitud. Estos autores propusieron una densidad volumétrica de al menos 3 estrellas por pársec cúbico. De nuestra búsqueda del Capítulo 3, la densidad central extrapolada al centro es de $\sim 0.41 \text{ arcmin}^{-2}$, un valor 3.4 veces inferior al medido en este Capítulo. El lado del campo de visión investigado en nuestra búsqueda subtiende 0.45 pc a la distancia de σ Orionis. Si todas las estrellas estuvieran contenidas en un volumen de este lado, la densidad sería de $\sim 280 \text{ pc}^{-3}$. Debido a efectos de proyección, no todas ellas se encuentran contenidas en ese cubo, pero muy probablemente la mayoría sí lo estén. En ningún caso la densidad estelar puede ser menor de 100 pc^{-3} . Además, estos valores se deberían aumentar en un factor ~ 1.8 si σ Orionis se encontrara a 440 pc , en vez de 360 pc como se ha utilizado. De ser estos valores ciertos, la distribución radial de estrellas en el cúmulo

σ Orionis se ajustaría por una caída exponencial a medias y largas distancias del centro superpuesto a una gaussiana (p.e.) muy aguda.

4.3.4 Sistemas múltiples

Varios objetos de la muestra pertenecen a sistemas múltiples. El sistema OB central ha sido resuelto gracias a las imágenes X de *Chandra* en cinco de sus seis componentes (AB, IRS1, C, D y E); ς J053838.6–023454 (GSC 04771–01147) es una binaria espectroscópica; ς J053847.9–023720 (id. 14) es una doble visual de diferentes luminosidades y exceso a $8.0 \mu\text{m}$; ς J053847.5–023526 (id. 67), a 15.5 arcsec de S Ori E, podría ser el séptimo miembro del sistema OB central; y el candidato a enana marrón con disco ς 053841.2–023737 (id. 5) forma un sistema triple visual junto con una estrella K intermedia fuertemente emisora en rayos X, en cuyo espectro se le ha detectado Li I en absorción, (ς J053841.2–023637, id. 13, [W96] rJ053841-0237) y una estrella clasificada como de pre-secuencia principal y emisora X débil (ς J053842.2–023714, id. 15). La separación física proyectada entre estos tres cuerpos es menor de 6000 AU. No se descarta tampoco que haya más miembros del sistema en sus cercanías ni que los objetos detectados a varios minutos de arco del centro del cúmulo, pero a pocos segundos de arco entre sí, formen también sistemas múltiples jerarquizados. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en un medio tan rico y denso en objetos del cúmulo los efectos de proyección son muy importantes (véase Cap. 3).

4.4 Sumario

Se han seleccionado 24 fuentes como miembros y candidatos a miembros estelares del cúmulo σ Orionis a partir de sus magnitudes IJK_s y su emisión en rayos X. Para algunas de ellas se disponía previamente de espectroscopia que demostraba su juventud. De los 24 objetos seleccionados, 15 habían sido previamente catalogados en trabajos anteriores. Tres de los 15, clasificados previamente como estrellas de pre-secuencia principal, son identificados ahora como fuentes de rayos X (usando imágenes *XMM-Newton* y *Chandra*). Entre cinco y siete de los ocho objetos restantes poseen emisión X no publicada por ahora. En total, se presentan las contrapartidas óptico-infrarrojas de 19 fuentes X posiblemente miembros del cúmulo. Se deduce que el $\sim 80\%$ de las fuentes seleccionadas con magnitudes $J < 18$ emiten rayos X.

Además, se han detectado: (i) una fuente débil en el óptico con exceso de flujo, variabilidad fotométrica en el infrarrojo y emisión en rayos X, que podría ser una enana marrón de masa intermedia con un disco muy desarrollado visto de canto; (ii) una fuente X muy cercana a σ Orionis AB con sólo fotometría fiable en la banda K_s (posiblemente de naturaleza estelar); y (iii) dos fuentes infrarrojas sin contrapartida óptica que se han clasificado como *posibles* miembros de masa planetaria del cúmulo. De pertenecer al cúmulo, poseerían una masa de $\sim 8 M_{\text{Jup}}$ y serían los exoplanetas gigantes más cercanos a una asociación OB estelar descubiertos hasta la fecha.

Se han detectado en el corazón del cúmulo unas tres veces más estrellas de las esperadas. Si la relación estrellas:objetos subestelares se mantiene aquí como en el resto del cúmulo, se esperaría haber detectado una decena de cuerpos sin combustión estable de hidrógeno. Desgraciadamente, la búsqueda de fuentes débiles en el óptico no es efectiva a distancias tan

cortas de estrellas tan brillantes como σ Orionis AB. Son necesarias nuevas metodologías observacionales.

Se han propuesto varios sistemas binarios y múltiples, en especial la doble visual ς J053847.9–023720 ($a \sim 700$ AU) y la fuente de rayos X muy cercana a la B2Vp σ Orionis E, ς J053847.5–023526 ($a \sim 5\,600$ AU).

También se han catalogado tres fuentes interesantes con colores $J - K_s$ muy rojos sin contrapartida óptica, una de las cuales tiene una PSF extensa. Probablemente se tratan de galaxias enrojecidas de fondo.