



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

**DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE NUEVAS ESTRELLAS SIMBIÓTICAS EN EL
MARCO DE LOS SONDEOS IGAPS Y SDSS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)**

PRESENTA

MARISSA KRYSTAL BOTELLO NAVA

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. LAURENCE SABIN, INSTITUTO DE ASTRONOMÍA, UNAM

CO-DIRECTOR DE TESIS:

**DR. MARCO A. GÓMEZ MUÑOZ, INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE
CANARIAS, ESPAÑA**

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

AGOSTO DEL 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

Dedico mi tesis a mis padres; Candelaria Botello Nava y Carlos Ibarra Pérez, los cuales han sido mi ejemplo a seguir los amo mucho.

Papá siento mucho que no puedas compartir conmigo este momento tan especial pero estoy segura que estarías orgulloso de mí. Y cuando sepas que sólo eres un sueño, como ahora lo sé yo, estaremos por siempre despiertos en él.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial para mis tutores, a la Dra. Laurence Sabin que fungió como mi tutora principal con mucha paciencia, sabiduría y siempre muy resiliente, a mi co-tutor el Dr. Marco A. Gómez Muñoz quien siempre con su sabiduría y amabilidad me ayudaba a comprender mis dudas. Gracias a ambos por ser mi guía durante la maestría.

Agradezco a mi comité tutor; Dr. David Hiriart, Dr. Jose Sergio Silva Cabrera y al Dr. Roberto Vazquez Meza quienes fueron mi guía para realizar mi proyecto de investigación junto con mis tutores.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por su apoyo al proporcionarme una beca con la cual me sostuve económicamente mientras realizaba mi maestría.

Este proyecto de investigación fue también apoyado por el proyecto PAPIIT IN110122.

Agradezco a mi familia que me ha apoyado y respetado en mi decisión de estudiar un posgrado.

Agradezco a los operadores de telescopios: Gustavo Melgoza y Felipe Montalvo. También al soporte observacional: Dr. Tomás Verdugo. Y a todo el staff técnico académico del OAN-SPM en turno durante mis observaciones.

Gracias a al Dr. Roberto Vazquez Meza y la MSc. Hecsari Bello por haber apoyado con la realización de las observaciones de este proyecto.

Agradezco a mis compañeros con los que atravesé toda esta aventura del posgrado.

CRÉDITOS

Esta tesis hace uso de los datos obtenidos como parte de la fusión IGAPS de los sondeos IPHAS y UVEX (www.igapsimages.org) llevada a cabo en el Telescopio Isaac Newton (INT). El INT es operado en la isla de La Palma por el Grupo Isaac Newton en el Observatorio del Roque de los Muchachos del Instituto de Astrofísica de Canarias. Todos los datos IGAPS fueron procesados por la Cambridge Astronomical Survey Unit, en el Instituto de Astronomía de Cambridge. El catálogo IGAPS, uniformemente calibrado y fusionado en bandas, fue ensamblado utilizando el cluster de computación de alto rendimiento a través del Centre for Astrophysics Research, de la Universidad de Hertfordshire.

Esta investigación ha hecho uso de la base de datos SIMBAD operada en CDS, Estrasburgo, Francia (<https://simbad.unistra.fr/simbad/>). "The SIMBAD astronomical database", Wenger et al. 2000, *A&AS*, 143, 9

Esta tesis utiliza productos de datos del Wide-field Infrared Survey Explorer, que es un proyecto conjunto de la Universidad de California, Los Ángeles, y el Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, financiado por la National Aeronautics and Space Administration. Esta tesis hace uso de productos de datos del Two Micron All Sky Survey, que es un proyecto conjunto de la Universidad de Massachusetts y el Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, financiado por la National Aeronautics and Space Administration y la National Science Foundation.

El SDSS y el SDSS-II han sido financiados por la Fundación Alfred P. Sloan, las instituciones participantes, la Fundación Nacional de la Ciencia, el Departamento de Energía de Estados Unidos, la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, el Monbukagakusho japonés, la Sociedad Max Planck y el Consejo de Financiación de la Educación Superior de Inglaterra. La página web del SDSS es <http://www.sdss.org/>. El SDSS está gestionado por el Consorcio de Investigación Astrofísica para las Instituciones Participantes. Las Instituciones Participantes son el Museo Americano de Historia Natural, el Instituto Astrofísico de Potsdam, la Universidad de Basilea, la Universidad de Cambridge, la Universidad Case Western Reserve, la Universidad de Chicago, la Universidad de Drexel, Fermilab, el Instituto de Estudios Avanzados, el Grupo de Participación de Japón, la Universidad Johns Hopkins, el Instituto Conjunto de Astrofísica Nuclear, el Instituto Kavli de Astrofísica de Partículas y Cosmología, el Grupo de Científicos Coreanos, la Academia China de Ciencias (LAMOST), el Laboratorio Nacional de Los Álamos, el Instituto

Max-Planck de Astronomía (MPIA), el Instituto Max-Planck de Astrofísica (MPA), la Universidad Estatal de Nuevo México, la Universidad Estatal de Ohio, la Universidad de Pittsburgh, la Universidad de Portsmouth, la Universidad de Princeton, el Observatorio Naval de Estados Unidos y la Universidad de Washington.

Esta publicación hace uso de VOSA, desarrollado en el marco del Spanish Virtual Observatory (<https://svo.cab.inta-csic.es>) proyecto fundado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ a través de la subvención PID2020-112949GB-I00.

Este trabajo esta basado en observaciones realizadas en el Observatorio Astronómico Nacional en la Sierra de San Pedro Mártir (OAN-SPM), Baja California, México.

RESUMEN

Las estrellas simbióticas (SySts) son sistemas binarios interactivos compuestos generalmente por una gigante roja (RG) y una compañera enana blanca (WD). Sus características principales son; largos periodos orbitales, transferencia de masa, formación de discos de acreción, formación de chorros, emisión de rayos X y son candidatas a ser progenitoras de Supernovas de tipo Ia. El estudio de estos sistemas de estrellas es muy útil debido a la complejidad de los eventos (mencionados arriba) con los cuales se les relaciona.

La población actual de estrellas simbióticas en la Galaxia comparadas con la predicción no es semejante. El número más actualizado de SySts galácticas conocidas es de 275 (Merc et al., 2019a) mientras que la predicción teórica actualizada es de 3000 a 400,000 (Kenyon, 1986). Por lo tanto, existe un problema de censo que es similar en otros tipos de objetos del medio interestelar (p.ej. nebulosas planetarias, remanentes de supernova...etc). Para superar este sesgo de observación, se realizó una búsqueda de nuevos candidatos a SySts usando los sondeos de Sloan Digital Sky Survey (SDSS) y INT Galactic Plane Survey (IGAPS) mediante la implementación de varios criterios de selección en el óptico e infrarrojo determinados por Corradi et al. (2008) .

Este proceso de minería de datos (*Data mining*) se condujo mediante la utilización de varias bases de datos y herramientas tales como TAPVizier, CasJobs y TopCat (algunos soportados con códigos en Python). En total se obtuvieron 598 nuevos candidatos a ser SySts. De éstos, se determinó que 21 tienen una probabilidad más alta de ser simbióticas debido a que se encontraron en diferentes métodos utilizados de análisis cruzados.

Una vez teniendo los mejores candidatos, se tomaron y analizaron espectros de los mismos para identificar las líneas características de este tipo de estrellas (i.e. las líneas dispersadas de Ramman, las bandas moleculares de TiO asociadas a la gigante roja, las líneas relacionadas con la enana blanca ($H\alpha$, [O III] 4363/5007 Å, He II 4686Å y OVI 6830 Å), etc.) con el fin de comprobar su naturaleza.

Como no se encontraron espectros disponibles de estos candidatos en la base de datos del sondeo SDSS, se realizaron observaciones en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir con el telescopio de 2m y el espectrógrafo Boller & Chivens. Sin embargo, debido a malas condiciones climáticas durante la temporada solo se pudieron observar 11 de los 21 candidatos propuestos. Después de la reducción de estos espectros se identificó una simbiótica “bona fide” y otra que muy probablemente pertenece a una categoría muy particular de simbióticas llamadas “ocultas”, las cuales no presentan una emisión notoria en las líneas de Balmer relacionado con la

inexistencia de una capa de quemado (*Shell burning*) alrededor de la enana blanca.

El estudio de las SEDs del resto de la muestra (que no presenta el patrón espectral característico de simbióticas) y su posicionamiento en un diagrama H-R nos indican que la mayor parte de los objetos son estrellas gigantes o post-AGB. Estos resultados concuerdan con los diagramas de diagnóstico que establecimos para identificar los objetos. Además, podemos decir que las dos estrellas simbióticas encontradas son de tipo estelar (*S-type*).

En conclusión, durante este trabajo se incrementó el número de simbióticas tomando en cuenta una muestra muy pequeña sin embargo dado el número total de candidatos encontrados la probabilidad de encontrar mas simbióticas va en aumento.

Es importante recalcar que el uso de los diagramas diagnóstico con datos en el infrarrojo deben ser combinados con datos en bandas más azules (p.ej. UV) para discriminar las estrellas gigantes. Eso implica el uso de sondeos de cielo como el Galaxy Evolution Explorer (GALEX) y el futuro (lanzamiento probable en ~ 2027) y de cobertura más amplia Ultraviolet Explorer (UVEX), por nombrar algunos.

Índice general

Índice de figuras	4
1. Introducción	9
1.1. Evolución de estrellas de masa intermedia	9
1.2. Estrellas simbióticas	11
1.3. Problemática	13
2. Metodología 1: Minería de datos	14
2.1. Minería y análisis cruzado	14
2.1.1. Criterios de clasificación	14
2.1.2. Descripción de sondeos	18
2.1.3. Descripción de las herramientas	21
2.1.4. Búsqueda de candidatos a estrellas simbióticas	23
2.2. Resultados	28
2.2.1. Candidatos detectados	28
3. Metodología 2: Espectroscopia	32
3.1. Observaciones	32
3.1.1. Telescopio 2.1 m y espectrógrafo Boller & Chivens	33
3.1.2. Líneas características en las SySts	37
3.1.3. Reducción de datos	37
3.2. Resultados	43
4. Discusión	48
4.1. Análisis de los diagramas de diagnóstico color-color	48
4.2. Análisis de los resultados espectroscópicos	49
4.2.1. IPHAS J190242.78-030037.0	49
4.2.2. IPHAS J195611.02+381554.2	49
4.2.3. Caracterización del remanente de la muestra	54

5. Conclusiones	71
6. Trabajos a futuro	74
A. Mapas de identificación de IPHAS de los 21 candidatos a SySts	77
B. Análisis de simbióticas en rayos X – Artículo 1	88
C. Análisis de simbióticas en rayos X – Artículo 2	90

Índice de figuras

1.1.	Diagrama Hertzsprung-Russell	9
1.2.	Traza evolutiva generalizada de estrellas de masa intermedia	10
1.3.	Izquierda: Imagen de una estrella simbiótica tomada por Chandra en la derecha (A) se muestra una estrella <i>RG</i> y en la izquierda (B) se muestra una estrella <i>WD</i> . Derecha: Ilustración representativa (https://chandra.harvard.edu/photo/2005/mira/).	12
2.1.	Diagrama de diagnóstico color-color de <i>H-Ks</i> vs <i>J-H</i> con áreas de los tipos S y D de SySts	16
2.2.	Diagrama de diagnóstico color-color de 2MASS con <i>J-H</i> frente a <i>H-K</i> para diferentes clases de objetos	17
2.3.	Espectros Swift/XRT de SySts con emisión de rayos X	18
2.4.	Telescopio de WISE	21
2.5.	Telescopio Isaac Newton	22
2.6.	Diagrama de síntesis de los procesos de selección de candidatos	29
2.7.	Diagrama de flujo de coincidencias encontradas en SIMBAD	30
3.1.	Telescopio 2.1m en el Observatorio Astronómico Nacional en la Sierra de San Pedro Mártir	35
3.2.	Vista dentro de la cúpula del telescopio 2.1m	36
3.3.	Ejemplo de un espectro de estrella simbiótica en el óptico.	37
3.4.	Ejemplo de eliminación de viñeteo	38
3.5.	Ejemplo de un <i>bias</i>	38
3.6.	Ejemplo de campo plano (<i>flat</i>)	39
3.7.	Arco o Atlas para calibración en longitud de onda. Recuperado del OAN-SPM.	40
3.8.	Secuencia de calibración de los espectros en IRAF	42
3.9.	Espectro del candidato No.1	43
3.10.	Espectro del candidato No.2	44
3.11.	Espectro del candidato No.3	44

3.12. Espectro del candidato No.6	45
3.13. Espectro del candidato No.9	45
3.14. Espectro del candidato No.12	45
3.15. Espectro del candidato No.13	46
3.16. Espectro del candidato No.14	46
3.17. Espectro del candidato No.18	47
3.18. Espectro del candidato No.19	47
3.19. Espectro del candidato No.21	47
4.1. Diagrama diagnóstico $J-H$ vs $H-W2$	50
4.2. Diagrama diagnóstico $H-K$ vs $J-H$	51
4.3. Diagrama diagnóstico $W1-W4$ vs $J-H$	51
4.4. Diagrama diagnóstico $K-W3$ vs $J-W1$	52
4.5. Diagrama diagnóstico $J-H$ vs $W3-W4$	52
4.6. Diagrama diagnóstico $K-W3$ vs $W3-W4$	53
4.7. Imagen del candidato No. 2	55
4.8. Diagrama diagnóstico $J-H$ vs $H-W2$ con los tipos de SySts	56
4.9. Diagrama diagnóstico $H-K$ vs $J-H$ con los tipos de SySts	57
4.10. Diagrama diagnóstico $W1-W4$ vs $J-H$ con los tipos de SySts	57
4.11. Diagrama diagnóstico $K-W3$ vs $J-W1$ con los tipos de SySts	58
4.12. Diagrama diagnóstico $J-H$ vs $W3-W4$ con los tipos de SySts	58
4.13. Diagrama diagnóstico $K-W3$ vs $W3-W4$ con los tipos de SySts	59
4.14. Modelo del candidato No.1	60
4.15. Modelo del candidato No.3	61
4.16. Modelo del candidato No.6	62
4.17. Modelo del candidato No.9	63
4.18. Modelo del candidato No.12	64
4.19. Modelo del candidato No.14	65
4.20. Modelo del candidato No.18	66
4.21. Modelo del candidato No.19	67
4.22. Modelo del candidato No.21	68
4.23. Posición de los objetos analizados en un diagrama H-R general (i.e con una meta- licidad fija) realizado con MIST. Se nota que la mayor parte de los objetos están en las ramas de las gigantes y uno está en la secuencia post-AGB (obj 12).	69
A.1. Mapas de identificación de los candidatos a SySts	78
A.2. Mapas de identificación de los candidatos a SySts	79

A.3. Mapas de identificación de los candidatos a SySts	80
A.4. Imágenes RGB de los candidatos a SySts	81
A.5. Imágenes RGB de los candidatos a SySts	82
A.6. Imágenes RGB de los candidatos a SySts	83
A.7. Imágenes RGB de los candidatos a SySts	84
A.8. Imágenes RGB de los candidatos a SySts	85
A.9. Imágenes RGB de los candidatos a SySts	86
A.10. Imágenes RGB de los candidatos a SySts	87
B.1. Artículo de clasificación de estrellas simbióticas en rayos X	89
C.1. Artículo de análisis en rayos X de la parte central de la estrella simbiótica CH Cyg.	91

Capítulo 1

Introducción

1.1. Evolución de estrellas de masa intermedia

El estudio de la evolución estelar ha sido importante a través de la historia de la Astronomía. Hoy en día, las estrellas se dividen en tres categorías, según sus masas, para describir su desarrollo. Existen las estrellas de masa baja que según Pols (2011) están en un rango de $0.8M_{\odot}$ a $2M_{\odot}$, las de masa intermedia en el rango $2M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$ y las masivas que tienen masa mayor a $8M_{\odot}$. Esta clasificación está basada en la masa que contiene las estrellas cuando comienzan a quemar Hidrógeno para transformarlo en Helio, es decir, cuando llegan a la Secuencia Principal del diagrama Hertzsprung-Russell (en adelante H-R). El diagrama H-R muestra la relación entre la luminosidad y la temperatura efectiva de las estrellas y un ejemplo del mismo puede ser observado en la Figura 1.1 donde la secuencia principal está señalada con la franja V.

El diagrama H-R nos permite seguir la evolución de las estrellas vía caminos evolutivos que dependen principalmente de la masa estelar y los podemos observar como trazas evolutivas o fran-

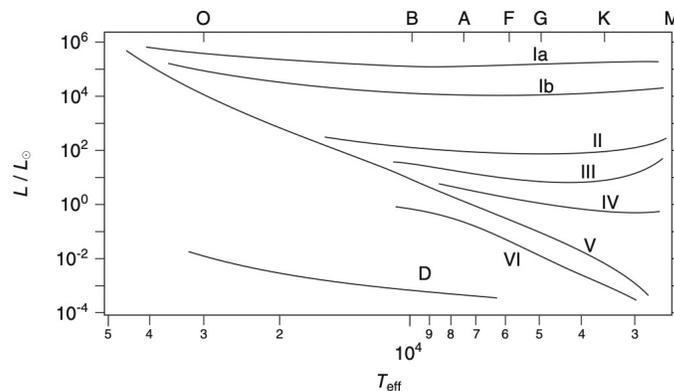


Figura 1.1: Diagrama Hertzsprung-Russell (LeBlanc, 2010).

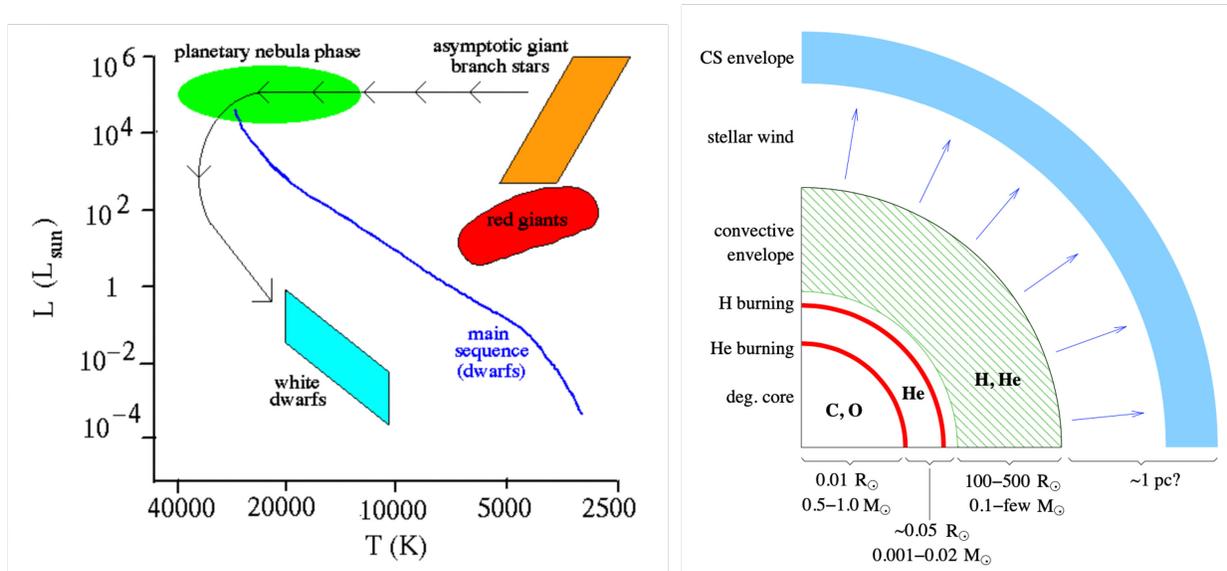


Figura 1.2: Izquierda: Traza evolutiva generalizada de estrellas de masa intermedia. Recuperado de <http://sites.oglethorpe.edu/mrulison/astronomy-web-lecture-notes/chapter-20-stellar-evolution/>. Derecha: Estructura esquemática de una estrella AGB (Pols, 2011).

jas en la Figura 1.1. Las franjas Ia y Ib son las ramas asintóticas de las estrellas súper gigantes, las franjas II y III son las ramas de las estrellas gigantes, la franja IV es la rama de las estrellas subgigantes, como ya se menciona anteriormente la franja V es conocida como la rama de la secuencia principal, la franja VI es de las estrellas subenanas y la franja D indica donde se localizan en el diagrama las enanas blancas. Estos números también ayudan a la clasificación de las estrellas según su luminosidad.

Para nuestro propósito, nos enfocaremos en las estrellas de masa intermedia. Cuando estas estrellas se encuentran en la secuencia principal del diagrama H-R pueden quemar Hidrógeno mediante el ciclo CNO (secuencia principal Figura 1.2). Cuando termina el ciclo de quemado de Hidrógeno, estas estrellas desarrollan un núcleo de Helio que permanece no degenerado mientras aumentan considerablemente su radio ya que la ley de los gases ideales indica que las capas externas deben expandirse para mantener el equilibrio hidrostático en la misma. Después de la fase de secuencia principal las estrellas de masa intermedia quedan con un núcleo agotado de Hidrógeno pero tienen una envoltura aún rica de Hidrógeno, la cual comienza a quemarse y las capas exteriores comienzan a expandirse a un ritmo acelerado. Cuando termina el quemado de la capa de Hidrógeno ocurre el primer dragado es decir, hay una caída repentina de la masa del núcleo. Después, la estrella se vuelve una gigante roja con envoltura convectiva (red giants o *RG*, siglas por su nombre en inglés) Figura 1.2. Durante la expansión de toda la envoltura la temperatura de la superficie de la estrella disminuye, motivo por el cual se vuelve más roja. Durante el quemado de

Helio en el núcleo, la estrella se expande y disminuye su temperatura. Después de la fase de combustión de Helio, se forma un núcleo central compuesto por Carbono y Oxígeno, por lo tanto, la estrella abandona la rama de las gigantes rojas e incrementa su tamaño. Se ha convertido entonces en una supergigante roja y se encuentra por tanto en la Rama Asintótica de las estrellas Gigantes, la cual podemos observar como un recuadro anaranjado en la Figura 1.2 (AGB por sus siglas en inglés *Asymptotic Giant Branch*). Las estrellas AGB sufren una (fuerte) pérdida de masa por viento estelar que eventualmente deja un núcleo degenerado de C-O (Figura derecha 1.2), el color de la estrella se vuelve mucho más azul y se mueve hacia la izquierda en el diagrama H-R con luminosidad constante. Cuando la estrella central llega alrededor de $\sim 30,000\text{K}$ ocurre un superviento de unos 1000km/s que no solamente expulsa la envoltura dejando el núcleo totalmente expuesto sino que también ioniza totalmente el material circumstelar. La estrella entra en la fase de nebulosa planetaria que durará alrededor de $\sim 10^4$ años y el material expulsado va a enriquecer el medio interestelar en gas, moléculas y polvo. Mientras tanto la estrella central se va convirtiendo en una enana blanca (*WD*, siglas por su nombre en inglés *White Dwarf*). Estas estrellas se encuentran en la parte inferior izquierda en el diagrama H-R (ver Figura 1.1) y tienen una temperatura entre $\sim 200,000\text{K}$ (para las más jóvenes) y alrededor de 8000K (para las más evolucionadas). Son objetos muy compactos comparables con el radio de la Tierra pero tienen mucha masa (comparable con la masa del Sol) por ello son muy densos. Debido a esta densidad los electrones se encuentran muy juntos y el gas de la estrella se encuentra degenerado. En otras palabras todos los niveles de energía de sus átomos están llenos de electrones. Las *WD* no sobreviven por fusión interna sino por principios de mecánica cuántica que impiden su colapso total.

1.2. Estrellas simbióticas

Las estrellas Simbióticas (SySts) son un sistema binario interactivo generalmente compuesto por una gigante roja y una compañera enana blanca (*RG-WD*). *CI Cyg* y *AX Per* fueron las primeras SySts descubiertas por Merrill y Humason en 1932, y sus características principales son las siguientes:

1. **Emisión en diferentes longitudes de onda:** En el óptico, rayos X, infrarrojo, radio y en el ultravioleta.
2. **Largos periodos orbitales:** Según Munari (2019) los periodos orbitales oscilan mayormente entre 1 y 4 años, pero Merc et al. (2019a) menciona que sus periodos pueden llegar a oscilar entre cientos de días a miles de días.
3. **Transferencia de masa:** puede ocurrir de dos formas (Munari, 2019). Por desbordamiento

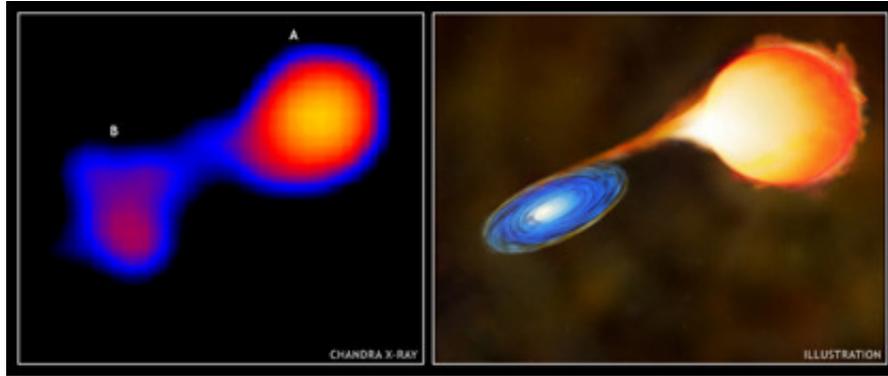


Figura 1.3: Izquierda: Imagen de una estrella simbiótica tomada por Chandra en la derecha (A) se muestra una estrella *RG* y en la izquierda (B) se muestra una estrella *WD*. Derecha: Ilustración representativa (<https://chandra.harvard.edu/photo/2005/mira/>).

del lóbulo de Roche (“*Roche Lobe overflow*”) y por la captura por parte de la *WD* de vientos estelares provenientes de la gigante.

4. **Formación de discos de acreción:** El material compartido de la estrella más fría forma una envoltura alrededor del sistema parecido a una nebulosa y también se forma un disco de acreción alrededor de la *WD*.
5. **Formación de chorros o jets:** Estos eventos están relacionados con el disco de acreción al igual que en los núcleos activos de galaxias. Leedjäv (2002) mencionan que la colimación de chorros probablemente ocupa de campos magnéticos a gran escala en los discos de acreción. Estos jets han sido observados en simbióticas de tipo estelar y polvosas (*Stellar-type: SySts* sin polvo & *Dusty-type: SySts* con polvo). La característica en común que se ha encontrado en este tipo de simbióticas es la baja luminosidad de la *WD*. En efecto, las componentes calientes del sistema con jets tienen una luminosidad de algunos cientos de L_{\odot} mientras que los sistemas sin jets tienen una luminosidad de aproximadamente $10^4 L_{\odot}$.
6. **Emisión de rayos X:** Existen diferentes tipos de emisiones de rayos X observados en las *SySts* entre los cuales se destacan: tipo α (*super-soft*) que se dan debido al quemado de Hidrógeno en la superficie de la enana blanca, tipo β (*soft*) por los vientos de colisión de la *WD* y la *RG*, y tipo δ (*hard*) que se originan en la capa límite entre el disco de acreción y la *WD* (Munari, 2019).
7. **Progenitoras de Supernovas de tipo Ia:** La gigante roja comienza a compartir material a la *WD*. La masa de la *WD* aumenta hasta que alcanza una masa crítica de $1.4M_{\odot}$ (límite de Chandrasekhar) y expulsa de manera explosiva material al medio interestelar.

El estudio de este sistema de estrellas es muy interesante debido a la complejidad de los eventos con los cuales se les relaciona, como los descritos anteriormente. Hasta ahora se han encontrado unos cientos de estos sistemas dentro o fuera de la Galaxia. La mayoría de las SySts en la Vía Láctea están localizadas en el Bulbo. El número más actualizado de SySts galácticas conocidas es de 275 (Merc et al., 2019a). Sin embargo Allen (1982) estimó teóricamente que deberían existir aproximadamente 3000 SySts en la Galaxia. Dato que confirmó Kenyon (1986) siendo la predicción teórica actualizada de 3000 a 400,000 SySts.

1.3. Problemática

Existe entonces una discrepancia entre el número actual de estrellas simbióticas observadas en la Galaxia comparado con el derivado de las predicciones teóricas. Si tomamos el número más bajo teórico de 3000 podemos decir que solo el 9% han sido detectadas, por lo que existe un problema de censo como en otros tipos de objetos del medio interestelar (p.ej. nebulosas planetarias, remanentes de supernova, etc).

Para subsanar (en cierta medida) este hecho, **el objetivo de esta investigación es aumentar el censo a través de la búsqueda de nuevos candidatos a SySts** empleando varios criterios de selección en el óptico e infrarrojo (con un enfoque al uso de minería de datos) determinados por Akras et al. (2019). Se usarán los sondeos: INT Galactic Plane Surveys (IGAPS), Two Micron All-Sky Survey (2MASS), Sloan Digital Sky Survey (SDSS) y Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE). Una vez se tengan los candidatos se pretende buscar u obtener sus espectros para poder analizar meticulosamente que sus líneas de emisión coincidan con las típicas de las SySts y de esta manera poder confirmar (o no) su naturaleza simbiótica.

El presente trabajo está desarrollado en 4 capítulos. En el Capítulo 2 se presenta el proceso de minería de datos para buscar los candidatos a SySts y los resultados obtenidos. En el Capítulo 3 presentamos el análisis espectroscópico y sus resultados. Finalmente en los capítulos 4 y 5 presentamos una discusión sobre el trabajo realizado y las conclusiones respectivamente.

Capítulo 2

Metodología 1: Minería de datos

2.1. Minería y análisis cruzado

2.1.1. Criterios de clasificación

Para detectar nuevas SySts Galácticas, se han utilizando varios criterios de selección en el óptico e infrarrojo determinados por Akras et al. (2019). Estos criterios fueron definidos utilizando tres algoritmos de aprendizaje automático:

- I) K vecinos más cercanos (K es el número de puntos cercanos al objeto a analizar); este algoritmo es utilizado para realizar clasificaciones con un aprendizaje supervisado no paramétrico. La clasificación se hace a través de predicciones sobre la agrupación de un punto de datos individual.
- II) Análisis discriminante lineal; es un método de clasificación supervisado. Está técnica es utilizada para encontrar una combinación lineal de características que separe mejor las clases de un conjunto de datos suponiendo que los datos tienen una distribución gaussiana, que las matrices de covarianza de las distintas clases son iguales y que los datos son linealmente separables.
- III) Árboles de decisión; es un algoritmo de aprendizaje supervisado. Funcional tanto para tareas de regresión (variable dependiente) como de clasificación (variable categórica). Su estructura es de árbol jerárquica por lo que consta de un nodo raíz (en él se produce la primera división en función de la variable más importante), ramas (cada rama indica un posible resultado o decisión que se deriva de la decisión inicial), nodos internos (tras la primera división encontramos estos nodos, que vuelven a dividir el conjunto de datos en función de las variables) y nodos hoja (su función es indicar la clasificación definitiva).

Para definir los criterios se utilizó una muestra de SySts Galácticas conocidas y otros objetos con similitudes en términos de color p. ej. gigantes K y M solitarias, variables cataclísmicas entre otras. Las bandas fotométricas usadas fueron, $H\alpha$, r , i , J ($1.25\mu\text{m}$), H ($1.75\mu\text{m}$), K ($2.5\mu\text{m}$), $W1$ ($3.6\mu\text{m}$), $W2$ ($4.5\mu\text{m}$) y $W3$ ($5.8\mu\text{m}$) procedentes de los sondeos 2MASS, WISE y IPHAS. Los métodos de selección derivados por los autores pretenden descartar los objetos que no cumplen con las características fotométricas de las SySts los cuales se listan a continuación:

I- $H\alpha$ IPHAS criterio:

$$(r-H\alpha) \geq 0.25 \times (r-i) + 0.65$$

II- Criterio en el Infrarrojo para S-type SySts:

$$J-H \geq 0.78 \ \& \ 0 < K-W3 < 1.18 \ \& \ W1-W2 < 0.09$$

III- Criterio de selección en el Infrarrojo SySts / K-giants / M-giants:

$$H-W2 \geq 0.206 \ \& \ K-W3 \geq 0.27$$

Existen también otros criterios fotométricos para la clasificación de SySts según sus características (Corradi et al., 2008):

IV Criterio IR para la clasificación del esquema S/S+IR/D/D'

a) Criterio para simbióticas de tipo estelar (denominado S type) sin polvo detectable.

$$* \ K-W3 < 1.93 \ \& \ W3-W4 < 1.46$$

b) Criterio para simbióticas de tipo estelar con exceso de infrarrojo (denominado S+IR type) (Akras et al., 2019).

$$* \ K-W3 < 1.93 \ \& \ W3-W4 \geq 1.46$$

$$* \ K-W3 \geq 1.93 \ \& \ H-W2 < 2.72$$

c) Criterio para simbióticas polvosas (denominado D type).

$$* \ K-W3 \geq 1.93 \ \& \ H-W2 \geq 2.72 \ \& \ W3-W4 < 1.52$$

d) Criterio para simbióticas con polvo más frío (denominado D' type).

$$* \ K-W3 \geq 1.93 \ \& \ H-W2 \geq 2.72 \ \& \ W3-W4 \geq 1.52$$

Los diagramas diagnóstico color-color (DDCC) son una buena herramienta para la caracterización de las SySts. Corradi et al. (2008) definieron áreas para los tipos de simbióticas estelares (S-type) y polvosas (D'-type). En la Figura 2.1 podemos observar dichas regiones donde los círculos negros representan a las simbióticas de tipo S y los triángulos las de tipo D. En la Figura 2.2 se muestran un DDCC más completo donde aparecen no solamente diferentes tipos de objetos pero

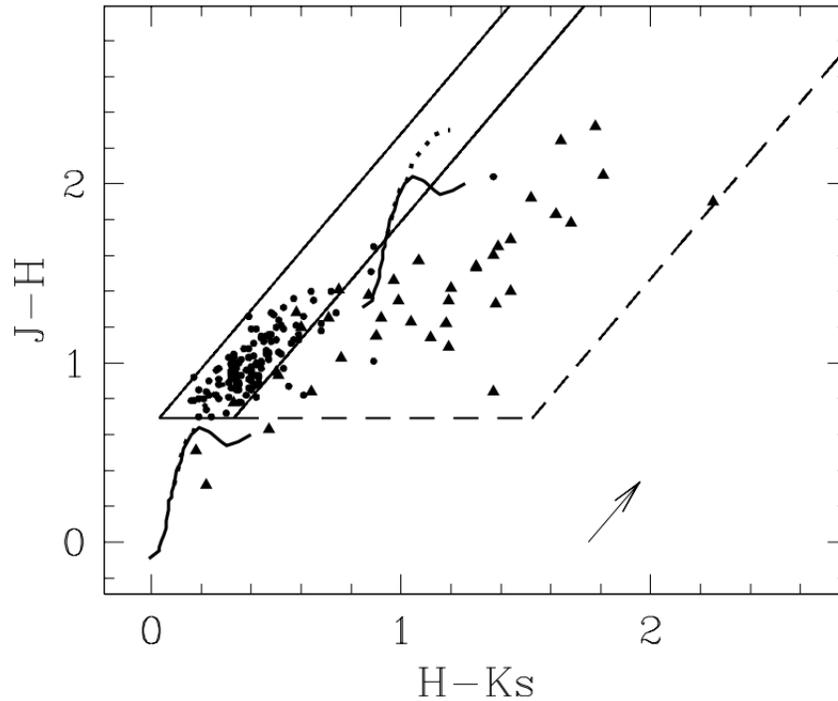


Figura 2.1: Diagrama de diagnóstico color-color de las SySts conocidas donde los círculos identifica a las de tipo estelar y los triángulos representan las de tipo polvosas. Las áreas seleccionadas corresponden a las simbióticas de tipo S (línea continua) y a las de tipo D (línea discontinua) definidas por Corradi et al. (2008) y Rodríguez-Flores et al. (2014).

también los cuatro tipos de simbióticas (Akras et al., 2019). Se puede observar una similitud con las cajas de la Figura 2.1 con la diferencia de que en la Figura 2.2 se realizó una subdivisión en el área de las de tipo polvosas (D) para las más frías (D'). Además, Akras et al. (2019) mencionan que las SySts de tipo S+IR son un tipo de transición entre el tipo S y el D.

Por completitud usamos la clasificación más actualizada de las SySts por emisión en rayos X obtenida por Luna et al. (2013). Incluye cinco diferentes tipos los cuales se describen a continuación:

- i) α Fuentes supersuaves, energías de fotones $\leq 0.4\text{keV}$.
- ii) β Fuentes supersuaves, energías de fotones inferiores a 2.4keV .
- iii) γ Fuentes con energías muy altas $\geq 2.4\text{keV}$.
- iv) δ Fuentes de rayos X duros con emisión térmica detectable por encima de 2.4keV
- v) β/δ Características de tipo β y δ presentes simultáneamente.

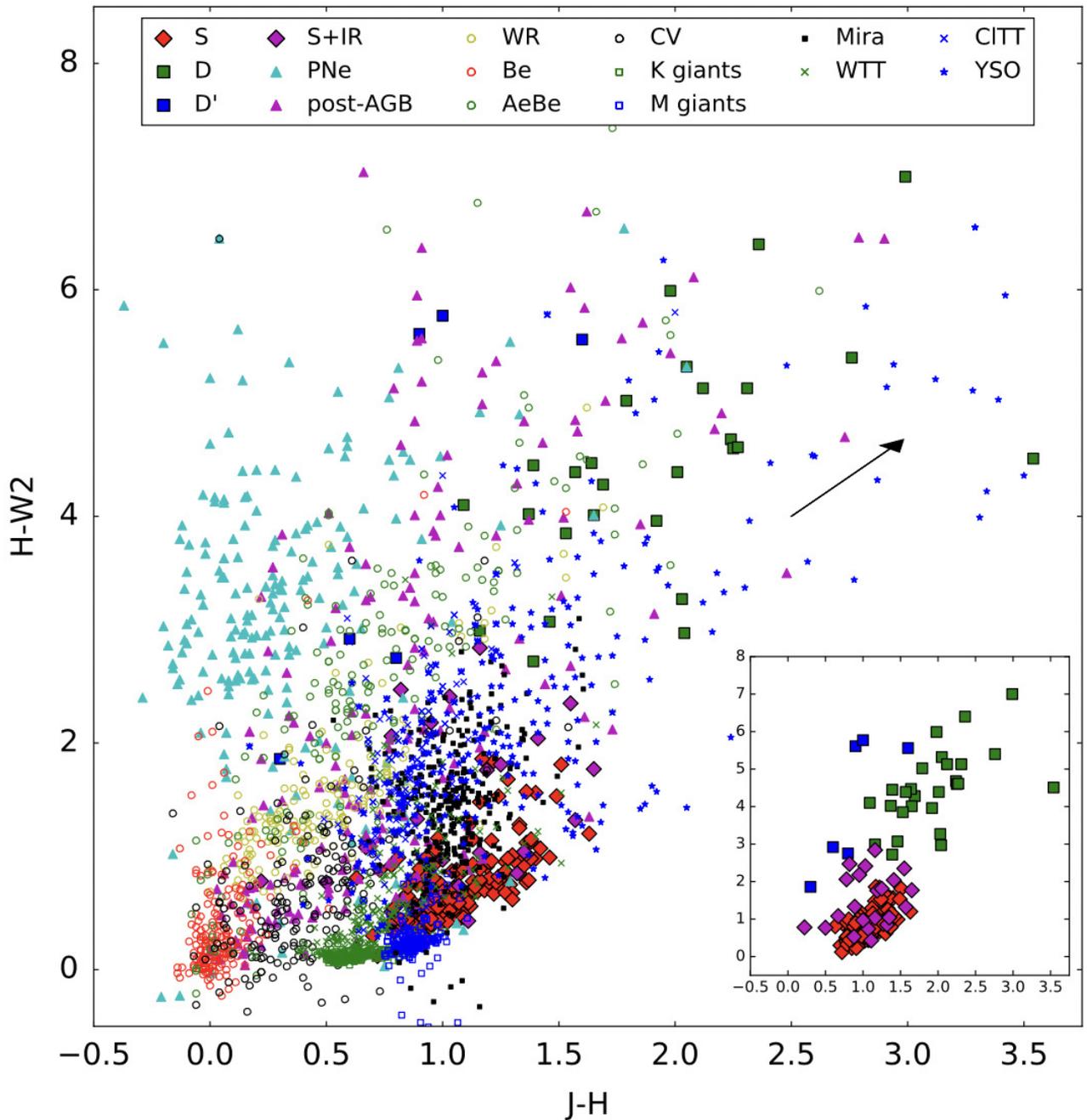


Figura 2.2: DCCD de 2MASS usando $J-H$ vs $H-K$ para diferentes clases de objetos por Akras et al. (2021). Un zoom del DCCD para los cuatro tipos de SySts se presenta en el recuadro de la derecha abajo. La flecha negra corresponde a una extinción de 4 mag en la banda V. El DDCC contiene varios tipos de objetos con un rango fotométrico similar al de las simbióticas de tipo S, D, D', y S+IR: i.e. las nebulosas planetarias (PNe), estrellas post-AGB (post-AGB), estrellas Wolf-Rayet (WR), estrellas Be (Be), estrellas AeBe (AeBe), variables cataclísmicas (CV), gigantes K/M, estrellas T Tauri débiles/clásicas (WTT/CITT), y YSO.

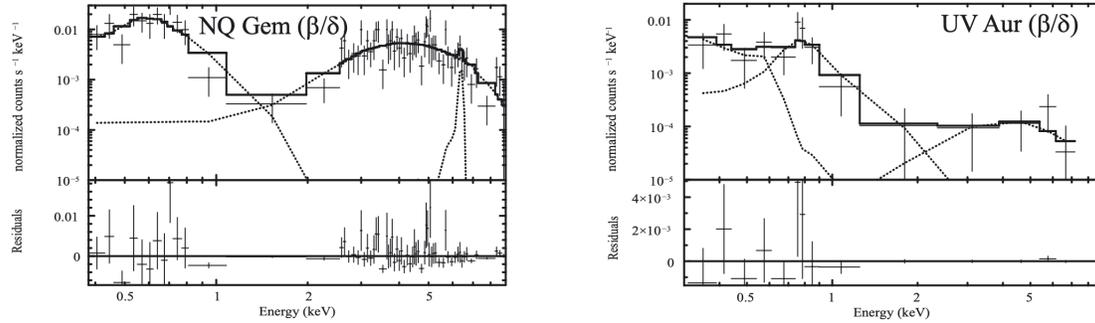


Figura 2.3: Espectros Swift/XRT de SySts con emisión de rayos X. La clasificación espectral de rayos X para cada fuente se incluye entre paréntesis en cada panel. Recuperado de Luna et al. (2013).

Un ejemplo de espectros en rayos X de SySts se muestra en la Figura 2.3 donde vemos que en ambos casos se muestran dos picos de emisión correspondientes a energías de β y γ . Las fuentes de las emisiones en las SySts son discutidas por Luna et al. (2013) y Merc et al. (2019a). Se dice que las fuentes suaves se originan en la combustión cuasiestable de la envoltura en la superficie de la *WD* o puede ser debido al plasma calentado por choque que surge en la colisión de los vientos de las componentes. Las fuentes más fuertes se originan en la capa límite entre el disco de acreción y la *WD*. Además esta emisión también es asociada a choques entre el material de acreción del objeto compacto.

Como producto colateral en el Apéndice B presentamos un trabajo sometido en la revista *The Astrophysical Journal* sobre el análisis espectroscópico de varias estrellas en rayos X. Otro artículo también como producto colateral a la tesis es presentado en el Apéndice C relacionado con el análisis de la parte central de la estrella simbiótica CH Cyg. Utilizando observaciones espectroscópicas en rayos X. Dicho artículo ha sido sometido a la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

La naturaleza de las estrellas simbióticas se puede determinar de manera precisa ya sea identificando sus líneas características en un espectro en el óptico (Ver el Capítulo 3.1.2) o revisando sus espectros en rayos X (Figura 2.3).

2.1.2. Descripción de sondeos

Para responder a la problemática del censo, se buscaron nuevos candidatos a SySts utilizando los surveys SDSS, 2MASS, WISE y IGAPS. A continuación se describen las características de cada uno y en qué se emplearon.

El proyecto de **Sloan Digital Sky Survey** (SDSS) comenzó en el año 2000. Su nombre pro-

viene de la fundación Alfred Pritchard Sloan y es un proyecto conjunto de University of Chicago, Fermilab, the Institute for Advanced Study, the Japan Participation Group, Johns Hopkins University, the Max-Planck-Institut für Astronomie, Princeton University, y the University of Washington. Su objetivo principal era proporcionar los datos necesarios para el estudio de la estructura a gran escala del universo (York et al., 2000). El Observatorio de Apache Point (APO) es la sede del sondeo localizado en Sunspot, New Mexico. Tiene un telescopio óptico altazimutal de campo amplio (3° sin distorsión) de 2.5 m y está equipado con una cámara compuesta de 30 CCDs y dos espectrógrafos (York et al., 2000) que escanean una gran parte del cielo. El SDSS obtiene imágenes con cinco filtros el u' , g' , r' , i' y z' . Sus datos son publicados en su página oficial¹. A través de los años se han publicados nuevos datos (*Data Release*). En este trabajo de investigación se utilizó el catálogo del último *Data Release* que es el número 17 (DR17). Contiene observaciones del SDSS hasta enero del 2021. El catálogo incluye fotometría en cinco bandas para 357 millones de objetos distintos y 1.6 millones de espectros en total, incluyendo: 930,000 galaxias, 120,000 cuásares y 460,000 estrellas (Abazajian et al., 2009).

El **Two Micron All Sky Survey** (2MASS) es un proyecto en conjunto de la University of Massachusetts y the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology. El proyecto fue fundado por the National Aeronautics y Space Administration and the National Science Foundation. Comenzó sus observaciones en el año de 1997 y completó sus datos en el 2001 con dos telescopios de 1.3m; uno localizado en el hemisferio norte, en el Monte Hopkins (Arizona,US); y el otro en el hemisferio sur, en el Cerro Tololo (Chile). Sus observaciones fueron en tres bandas en el cercano infrarrojo J ($1.235 \mu\text{m}$), H ($1.662 \mu\text{m}$) y K_s ($2.159 \mu\text{m}$) las cuales son usadas para poder implementar los criterios de selección en el infrarrojo #2 y #3 de Akras et al. (2021). Durante el proceso de selección se consideraron los datos más limpios de este sondeo. Para realizarlo es necesario conocer las banderas o “flags” de calidad fotométrica que se les otorga. Los flags pueden ser encontrados en una columna dentro del catálogo y recibe el nombre de “Qflag” (por Quality flag). Es una bandera con tres caracteres donde el primero es por la banda J , el segundo por H y el tercero para la banda K , y proporcionan un resumen de la calidad neta de la fotometría por defecto en cada banda. Estos caracteres se derivan de la Bandera de Lectura (Rflag), incertidumbres de medida ([jhk]cmsig), relaciones señal a ruido de escaneo ([jhk]snr), estadísticas de detección de fotogramas (Ndet) y valores chi-cuadrado reducidos de ajuste de perfil de la emisión en cada banda ([jhk]psfchi).

A continuación se describe los flags provenientes de el catálogo II/246/out de Cutri et al. (2003):

A- Detecciones en cualquier régimen de brillo en el que se realizaron mediciones válidas con [jhk]snr>10 y [jhk]cmsig<0.10857. Para este trabajo cuando se utiliza este flag en la limpieza

¹<https://www.sdss.org>

de las bandas decimos que estamos siendo estrictos, es decir, que sólo queremos extraer los datos de mejor calidad.

- B- Detecciones en cualquier régimen de brillo en el que se realizaron mediciones válidas con $[jkh]snr > 7$ y $[jkh]cmsig < 0.15510$. Está flag se considera que los datos tienen menor calidad que los de la bandera A.
- C- Detecciones en cualquier régimen de brillo en el que se realizaron mediciones válidas con $[jkh]snr > 5$ y $[jkh]cmsig < 0.21714$.
- D- Detecciones en cualquier régimen de brillo en el que se hayan realizado mediciones válidas sin requisito $[jkh]snr$ o $[jkh]cmsig$.

Para nuestro propósito sólo se usaron los mejores datos de 2MASS (ver 2.1.4) utilizando el $flag = 'A'$ o $Qflag = 'AAA'$ (para J , H y K).

El **Wide-Field Infrared Survey Explorer** (WISE) es un telescopio espacial de la NASA² que fue lanzado el 14 de diciembre del 2009 con el propósito de cartografiar todo el cielo en el infrarrojo. WISE opera en cuatro bandas: $W1$ ($3.4\mu m$), $W2$ ($4.6\mu m$), $W3$ ($12\mu m$) y $W4$ ($22\mu m$). Su primera misión fue crear imágenes (Figura 2.4) que cubren un campo de visión de $47'$ del 99 por ciento del cielo con una resolución de $6.1''$, $6.4''$, $6.5''$ y $12.0''$ en las cuatro bandas respectivamente (Wright et al., 2010). Después de que su primera misión concluyera el telescopio fue puesto en hibernación en febrero del 2011 y lo reactivaron en el 2013 pero ahora nombrándolo NEOWISE. Se le asignó una segunda misión dedicada a identificar y caracterizar la población de objetos cercanos a la Tierra; y proporcionar información sobre el tamaño, la composición de asteroides y cometas más lejanos.

En este proyecto se utilizaron los datos de WISE All-Sky Release el cual incluye 18,240 conjuntos de imágenes filtradas, calibradas y coadaptadas. WISE incluye un catálogo de fuentes que contiene información posicional y fotométrica de más de 563 millones de objetos detectados en las imágenes. Además incluye un suplemento explicativo que constituye una guía sobre el formato, el contenido, las características y las notas de precaución de los productos de la publicación dentro de la cual se habla de los flags de calidad de fotometría. Al igual que en 2MASS el flag es de varios caracteres, uno para cada banda y se representa en la columna "qph" dentro de la tabla del catálogo II/328/allwise de Cutri et al. (2021). El flag se usa para identificar la calidad de la medición de fotometría en cada banda.

A continuación se describe cada flag:

- A- La fuente se detecta en esta banda ($W[]$) con una relación señal/ruido de flujo $snr >> 0$.

²<https://www.jpl.nasa.gov/missions/wide-field-infrared-survey-explorer-wise>

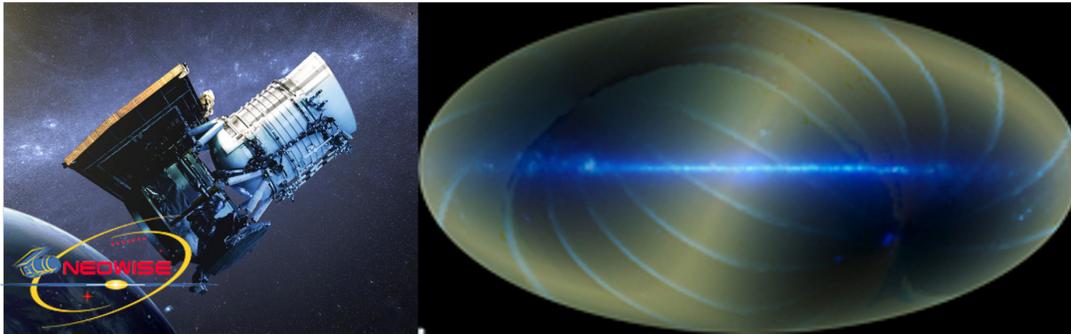


Figura 2.4: Izquierda: concepto artístico CGI (Computer Generated Imagery) del telescopio espacial infrarrojo de 40cm de diámetro en órbita terrestre (telescopio de WISE). Derecha: Mapa del cielo en proyección Aitoff ecuatorial que muestra el número medio de fotogramas de exposición individuales de 7.7 segundos ($W1$ y $W2$) y 8.8 segundos ($W3$ y $W4$) dentro de intervalos espaciales de $14' \times 14'$ (<https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/>).

B- La fuente se detecta en esta banda ($W[i]$) con una relación señal/ruido de flujo $3 < \text{snr} < 10$.

C- La fuente se detecta en esta banda ($W[i]$) con una relación señal/ruido de flujo $2 < \text{snr} < 3$.

El **INT/WFC Galactic Plane Surveys (IGAPS)** es la fusión de los sondeos fotométricos ópticos IPHAS y UVEX. Los datos fueron tomados por el Telescopio Isaac Newton (INT) de 2.5m entre 2003 y 2018 (Figura 2.5). El catálogo de fuentes puntuales de IGAPS contiene 295.4 millones de filas que proporcionan fotometría en los filtros i' , r' , $H\alpha$ de banda estrecha, g' y U .

Finalmente, la base de datos astronómicas **SIMBAD**³ proporciona datos básicos, identificaciones cruzadas, bibliografía y mediciones de más de 2.7 millones de objetos astronómicos fuera del sistema solar. SIMBAD es el acrónimo de **Set of Identifications, Measurements and Bibliography for Astronomical Data**. Los datos e información publicados proceden de catálogos y tablas seleccionados y de toda la literatura astronómica (Wenger et al., 2000). El centro de Données astronomiques de Strasbourg (CDS, Francia) define, actualiza y le da mantenimiento al servicio SIMBAD.

2.1.3. Descripción de las herramientas

TAPVizier es un servicio que está disponible desde septiembre de 2012 el cual proporciona y permite manejar tablas de datos de Vizier utilizando lenguaje ADQL (Astronomical Data Query Language) y el protocolo TAP (Table Access Protocol). Este servicio funciona con los nombres de tablas y columnas tal como los proporciona la aplicación web Vizier⁴. Un ejemplo de su uso

³<http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad>

⁴<https://vizier.unistra.fr>



Figura 2.5: El Telescopio Isaac Newton observa en el óptico, posee un espejo primario de 2.54m y está localizado en la Palma. Créditos de la imagen para el astrófono Miguel Claro (<https://www.miguelclaro.com/wp/>).

puede ser visualizado en el proceso número 3 de la subsección 2.1.4.

Catalog Archive Server Jobs (CasJobs) es un banco de trabajo de consultas asincrónicas para grandes catálogos científicos, como los mencionados arriba, que permite a los usuarios ejecutar consultas en lenguaje SQL. También permite guardar los resultados en una base de datos personal llamada MyDB y descargarlos.

TOPCAT es una aplicación para manipular (grandes) datos tabulares, típicamente catálogos de fuentes. También nos permite hacer gráficos rápidos con una interfaz para utilizar las varias herramientas y opciones disponibles.

Python es un lenguaje de programación de alto nivel orientado a objetos con una dinámica semántica integrada principalmente para desarrollo web y aplicaciones informáticas. Fue creado por el informático Guido Van Rossum. Python provee diferentes tipos de librerías como de *machine learning* para cálculos numéricos, para realizar gráficos, para interactuar entre listas, etc. Para hacer posible este trabajo se utilizaron varias librerías.

IRAF es un programa general de reducción y análisis de imágenes que ofrece al usuario una amplia gama de herramientas de tratamiento de imágenes. Es un producto del National Optical Astronomy Observatories (NOAO) y fue desarrollado para la comunidad astronómica. El sistema central proporciona al usuario una amplia selección de herramientas de procesamiento de imágenes utilizando una interfaz de línea de comandos. Los comandos se les llama tareas y se ejecutan para realizar varias funciones. Cada tarea tiene un archivo de parámetros que el usuario puede modificar para afectar a la salida de la tarea.

2.1.4. Búsqueda de candidatos a estrellas simbióticas

Para la búsqueda de los candidatos a SySts Galácticas primero se realizó en TapVizier (Ver subsección 2.1.3) una correlación entre las tablas de los sondeos IGAPS, 2MASS Y WISE considerando: (i) las 3 condiciones de selección Akras et al. (2021), (ii) los datos más limpios de las bandas de IGAPS (r' , i' y $H\alpha$) siendo estos los que tienen un flag = 0, (iii) los datos más limpios en las bandas $W1$, $W2$ y $W3$ de WISE (usando el flag 'A' en cada caso) y (iv) en la banda $W4$ se tomó en cuenta una limpieza flexible, es decir, se tomaron los flags del 'A' al 'C'. Debido a que el catálogo II/328/allwise de Vizier contiene las bandas de WISE y las de 2MASS solo se tomaron en cuenta dicho catálogo y el de V/165/igapsdr (el cual contiene las bandas de IGAPS). A continuación se muestra el *script*⁵ en SQL empleado:

```
SELECT g.*, w.* #
FROM "V/165/igapsdr1" AS g, "II/328/allwise" AS w
WHERE 1=CONTAINS(POINT('ICRS',g.RAJ2000,g.DEJ2000),
                CIRCLE('ICRS',w.RAJ2000,w.DEJ 2000,1/3600))
AND w.qph LIKE 'AAA[A-C]' --Flg WISE
AND (g.SaturatedrI = 0 AND g.SaturatedHa = 0
AND g.Saturatedi = 0) --Flg IGAPS
AND g.rImagAB - g.HmagAB >= 0.25 * (g.rImagAB - g.imagAB) + 0.65
--Condicion para IGAPS (1era condición)
AND w.Jmag-w.Hmag >= 0.78 -- 2DA CONDICIÓN
AND (w.Kmag-w.w3mag >0 AND w.Kmag-w.w3mag < 1.18)-- 2DA CONDICIÓN
AND w.w1mag-w.w2mag < 0.09 -- 2DA CONDICION
AND w.Hmag-w.w2mag >= 0.206 AND w.Kmag-w.w3mag >= 0.27 --3RA CONDICIÓN
```

Se encontraron 929,162 objetos con este método, sin embargo, se volvió a ejecutar este mismo *script* pero siendo estrictos también en la banda $W4$ de WISE. La cantidad de objetos encontrados

⁵Es un conjunto de comandos para indicar lo que debe hacer y en qué orden debe hacerlo.

disminuyó drásticamente, por lo tanto, se decidió probar otro método de manejo de datos para obtener los candidatos a SySts (ver a continuación). En particular este primer intento ayudó a notar que es mejor no ser estrictos en el criterio de limpieza en la banda $W4$ y esto puede ser justificado con el hecho de que en los criterios de selección de (Akra et al., 2021) no se utiliza los datos de esta banda. Aún cuando la banda $W4$ se emplea en los criterios fotométricos para clasificar el tipo de SySts.

Entonces, para recabar los candidatos a SySts se realizaron tres diferentes procesos de manejo de datos los cuales incluyen los sondeos descritos en la sección 2.1.2 y se pueden ver de manera gráfica en la Figura 2.6.

Primer proceso

En el primer proceso se utilizaron los sondeos SDSS DR17, WISE, 2MASS, y IGAPS. Primero, en el servidor en línea CasJobs, se realizó un correlación entre los sondeos de SDSS y WISE donde se tomaron los datos más limpios de WISE, es decir, en las cuatro bandas ($W1$, $W2$, $W3$ y $W4$) se consideró el $\text{flag}=0$ (Ver Capítulo 2.1.2). Se tomó en cuenta la condición II para la selección de candidatos generando una tabla nombrada `Condition_2_new`. El *script* empleado fue escrito en lenguaje SQL y se puede visualizar a continuación:

```
SELECT w.* into mydb.Condition_2_new from WISE_allsky AS w
WHERE w.w1flg = 0 AND w.w2flg = 0 AND w.w3flg = 0 AND w.w4flg = 0 --flags WISE
AND w.j_m_2mass-w.h_m_2mass>=0.78 AND (w.k_m_2mass-w.w3mag>0
AND w.k_m_2mass-w.w3mag<1.18) AND w.w1mag-w.w2mag<0.09 --2da condición
```

La tabla obtenida de este primer paso contiene 7037 objetos. Después se realizó una concatenación con esta tabla y el sondeo 2MASS dentro de CasJobs. Se aplicó un criterio de selección para obtener solo los mejores datos de 2MASS, es decir, se consideró la calidad en sus tres bandas como $\text{ph_qual}='AAA'$ (ver Capítulo 2.1.2) dando como resultado 6799 objetos. Hasta este punto se observó que la muestra ha reducido un poco. El script que hizo esto posible se describe a continuación:

```
SELECT c.*, t.* #renombrando las tablas
FROM mydb.Condition_2_new AS c,
      PhotoObjAll AS t WHERE c.tmass_key = t.ObjID
AND t.ph_qual = 'AAA' #condición de calidad
```

En el programa TopCat se procedió a buscar coincidencias en IGAPS realizando un *cross-match*⁶ con este sondeo con el propósito de luego aplicar el primer criterio de selección (I). Una

⁶Prueba de compatibilidad.

vez realizado este análisis cruzado, los objetos se redujeron a 1204. Después se aplicó a la muestra la condición I para selección de candidatos usando la herramienta “*Display row subsets*” de TopCat. La forma en que se escribió la primer condición de selección en TopCat fue:

```
#Primera condición de selección (con bandas de IPHAS) en TopCat
(rImag - Hamag) >= 0.25 * (rImag - iImag) + 0.65
```

Como resultado solo dos de los 1204 objetos cumplen con las primeras dos condiciones. Se procedió a aplicar a estos dos objetos la tercera condición de selección y resultó que ninguno de los dos objetos cumplían con esta condición. Finalmente se realizó un *crossmatch* a través de TopCat con los dos objetos que cumplen con las primeras dos condiciones de selección y el catálogo de SIMBAD para descartar aquellos objetos que ya tienen una identificación, es decir, que ya se conozca la naturaleza del objeto. No se encontró ninguna coincidencia, por lo tanto, hasta este punto estos dos objetos se consideraron como candidatos a SySts.

Segundo proceso

Se realizó una correlación entre las tablas de los sondeos SDSS, WISE y 2MASS en CasJobs considerando el segundo criterio de selección. Se efectuó una limpieza estricta en las bandas *W1*, *W2* y *W3* (se tomaron los flags='AAA'). No se consideró agregar un flag en *W4* debido a que no se utiliza en los criterios de selección para las SySts (Figura 2.6). El siguiente *script* fue el utilizado para realizar esta correlación.

```
SELECT w.*
FROM WISE_allsky AS w
WHERE w.w1flg = 0 AND w.w2flg = 0 AND w.w3flg = 0 --flags WISE
AND w.j_m_2mass-w.h_m_2mass>=0.78 AND (w.k_m_2mass-w.w3mag>0 AND
w.k_m_2mass-w.w3mag<1.18) AND w.w1mag-w.w2mag<0.09 --2da condición
```

La tabla resultado de la correlación fue nombrada “Condition_2_noflg4” con 1 783 474 objetos. Después se seleccionaron los datos más limpios de las bandas de 2MASS a través de CasJobs y la muestra se redujo a 1,710,322 objetos:

```
SELECT c.*, t.*
FROM mydb.Condition_2_noflg4 AS c,
PhotoObjAll AS t WHERE c.tmass_key = t.ObjID
AND t.ph_qual = 'AAA'
```

Para aplicar la condición I de selección se hizo una correlación entre la muestra y los datos de IGAPS a través de TopCat. Se encontraron 403,768 objetos y después con este mismo software mediante la herramienta “Row subsets” se aplicó la primera condición de selección. Se encontró que solo 386 objetos cumplen con la primera condición (I). Después se aplicó la tercera condición de selección y resultó de este proceso de selección 61 objetos cumplen con las tres condiciones (ver Figura 2.6). Al igual que en el proceso anterior fueron considerados todos los objetos que cumplen con las condiciones I y II para buscar si tienen alguna identificación esto a través de una correlación con SIMBAD. En la Figura 2.7 se observa que en SIMBAD fueron detectados 37 objetos de los 386 de la muestra de los cuales 6 ya están identificados como SySts. Una vez descartando los objetos conocidos, la muestra quedó con 349 candidatos que cumplen con las condiciones I y II.

Tercer proceso

El tercer proceso fue más complejo. Se buscaron los candidatos en los sondeos de IGAPS, WISE y 2MASS y en este caso se descartó el catálogo del SDSS (Figura 2.6). Se realizó una correlación entre los catálogos en TapVizieR donde el catálogo de IGAPS es el V/165/igapsdr1. Las consideraciones iniciales fueron aplicar la condición I de selección y tomar los datos más limpios en las bandas de IGAPS (r' , i' , $H\alpha$). El *script* utilizado se muestra a continuación.

```
SELECT g.*, w.*
FROM "V/165/igapsdr1" AS g, "II/328/allwise" AS w
WHERE 1=CONTAINS(POINT('ICRS',g.RAJ2000,g.DEJ2000),
CIRCLE('ICRS',w.RAJ2000,w.DEJ 2000,1/3600))
AND g.Class != 0 -- flg igasp
AND (g.SaturatedrI = 0 AND g.SaturatedHa = 0 AND g.Saturatedi = 0)
--flg igasp
AND g.rImag - g.Hamag >= 0.25 * (g.rImag - g.imag) + 0.65
--Condicion para IPHAS
```

La tabla resultante de la correlación contiene 105,251 objetos. Esta tabla se cargó en TopCat y se aplicó la segunda condición de selección, y con esto se redujo la muestra a 3348. Para este punto se debía considerar o determinar, cuales datos de WISE se tenían que seleccionar en la banda $W4$ ya que en las bandas $W1$, $W2$ y $W3$ se considerarían los más limpios. Como ya se sabe que la banda $W4$ no se usa en los criterios de selección, entonces se puede ser más flexible, por lo tanto se consideró hacer 3 tablas; (i) en la primera usando un flag='A' en la banda $W4$, (ii) la segunda usando un flag='B', y (iii) usando flag='C' (ver Figura 2.7). Para el primer caso se obtuvieron 54 objetos, en

el segundo 149 y en el tercero 90. A continuación se describen a detalle los procedimientos de las tres listas para obtener los candidatos a SySts.

A- Esta tabla se hizo a través de un Row subset en Topcat con los datos más limpios de *W4* usando un flag='A' (qph=='AAAA'). La muestra quedó con 54 objetos. Esta lista se cargó en CasJobs para limpiar los datos en las bandas de 2MASS tomando solo los mejores, es decir, en las 3 bandas considerar un flag='A' (ph_qual='AAA'), a continuación se muestra el *script* utilizado.

```
SELECT f.*, t.*
FROM mydb.FLAG_WISE_AAAA_ID AS f,
PhotoObjAll AS t WHERE f."2Mkey" = t.ObjID
AND t.ph_qual = 'AAA'
```

Resultó que todos los objetos tenían los mejores datos en las bandas de 2MASS (Figura 2.7), por lo tanto, la muestra quedó con los mismos 54 objetos.

B- Esta tabla se realizó en TopCat utilizando en *W4* un flag='B' y en *W1*, *W2* y *W3* de WISE un flag='A' (qph=='AAAB') quedando la tabla con 160 objetos. Posteriormente la tabla se cargó en CasJobs y se aplicó una limpieza estricta en las bandas de 2MASS. A continuación puede apreciarse el *script* realizado.

```
SELECT f.*, t.*
FROM mydb.Flag_wise_AAAB_ID AS f,
PhotoObjAll AS t WHERE f."2Mkey" = t.ObjID
AND t.ph_qual = 'AAA'
```

Este caso resultó similar al anterior, es decir, la muestra quedó con la misma cantidad de objetos después de tomar los datos más limpios de 2MASS.

C- En la tercera tabla realizada se utilizaron los datos más limpios en las bandas *W1*, *W2* y *W3* de WISE. A través de TopCat se tomaron los datos sin tanta calidad de *W4* donde qph=='AAAC' obteniendo una tabla con 93 objetos. Se prosiguió a subir esta tabla en CasJobs para limpiar los datos de las bandas de 2MASS considerando únicamente los mejores. Como resultado la muestra disminuyó a 93 objetos, el *script* con el que se realizó esto se muestra a continuación.

```
SELECT f.*, t.*
FROM mydb.Flag_wise_AAAC_ID AS f,
```

```
PhotoObjAll AS t WHERE f."2Mkey" = t.ObjID
AND t.ph_qual = 'AAA'
```

Se buscaron coincidencias en SIMBAD al igual que en los procesos anteriores para verificar que no tengan identificación y descartar aquellos que la tengan. En el caso de la tabla con flag='A' se encontraron 10 coincidencias de las cuales 4 están identificadas como SySts. En la segunda tabla (flag='B') se encontraron 13 coincidencias y 7 de estas son SySts. En la tercera tabla (flag='C') se encontraron 2 coincidencias ninguna de estas es SySts.

2.2. Resultados

2.2.1. Candidatos detectados

En total se detectaron 681 objetos astronómicos que cumplen con la primera y segunda condición de selección de Akras et al. (2021) y 139 que cumplen con las tres condiciones de selección (Figura 2.6) provenientes de los diferentes procesos de selección. Los resultados se pueden ver en la Figura 2.6. Se realizó una correlación a través de TopCat con el catálogo de SIMBAD para descartar aquellos objetos que ya tienen una identificación. Para efectuarlo se consideraron las listas de cada proceso de selección donde los objetos solo cumplían con la condición de selección I y II. Se encontraron 62 coincidencias en total, de las cuales 17 son SySts conocidas (véase Figura 2.7). Una vez descartando los objetos ya identificados la muestra quedó con 619 objetos.

A parte de SIMBAD usamos el “El New Online Database of symbiotics variables” de Merc et al. (2019a)⁷ que contiene tablas de datos de estrellas simbióticas confirmadas, posibles, probables, sospechosas y mal clasificadas. Se puede descargar las tablas con datos extragalácticos o Galácticos. En nuestro proyecto de investigación se trabajó con datos Galácticos y se descargaron la tres tablas con la muestra relacionada. Se realizó una concatenación a través de TopCAT con cada una de ellas. No se encontró ninguna coincidencia de los 619 candidatos con las listas de la base de datos.

Se realizó una concatenación entre las diferentes listas de los candidatos obtenidos (sumando 619 objetos) para identificar objetos similares, esto a través de Python. El resultado fue que 21 objetos coinciden en alguna otra lista i.e. fueron encontrados en al menos 2 procesos de búsqueda diferentes. En la muestra completa se eliminaron los candidatos duplicados. **El número total de nuevos candidatos únicos a SySts es de 598 objetos.** Podemos considerar que los 21 objetos

⁷<http://astronomy.science.upjs.sk/symbiotics/>

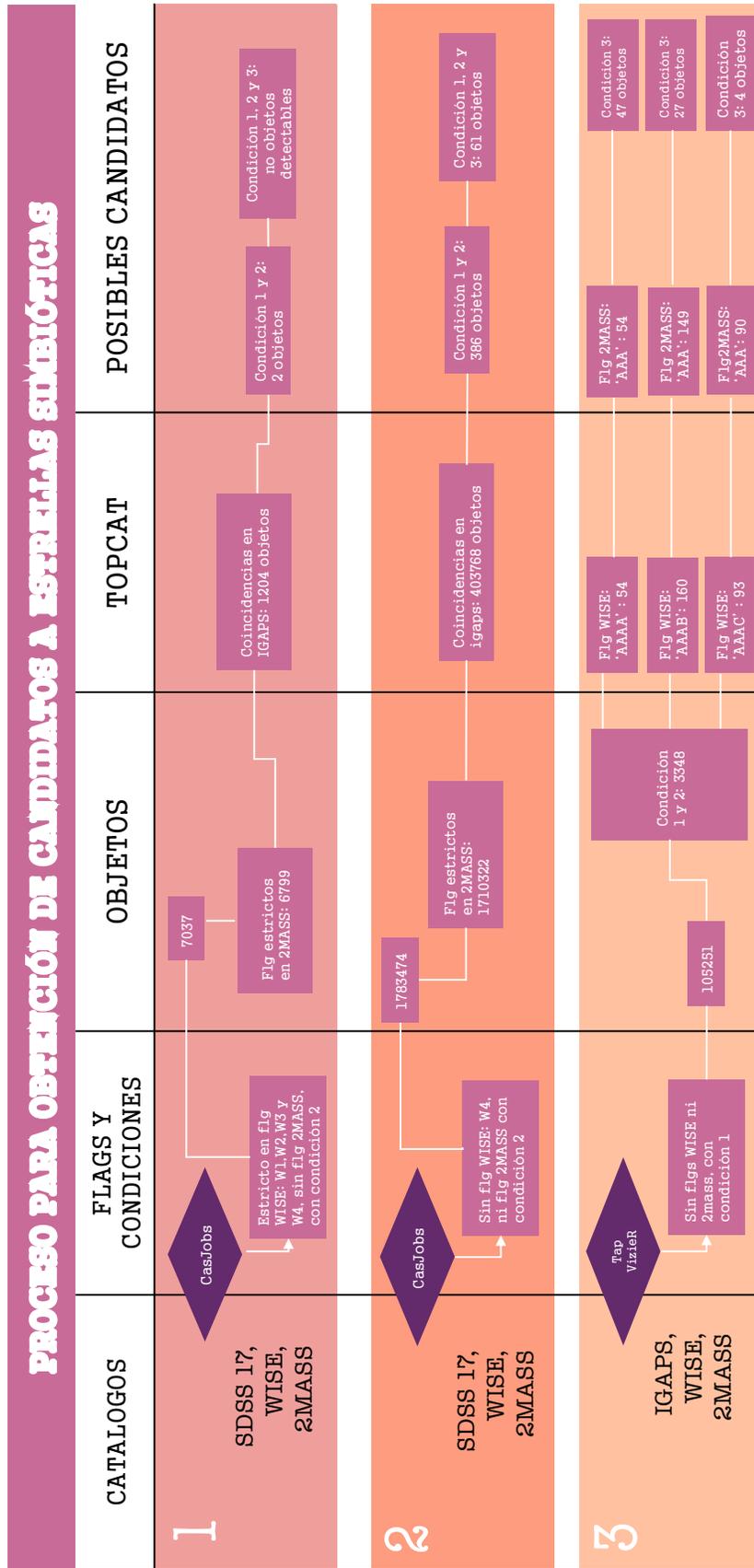


Figura 2.6: Diagrama que muestra los pasos que se siguieron para la obtención de los posibles candidatos a SySts.

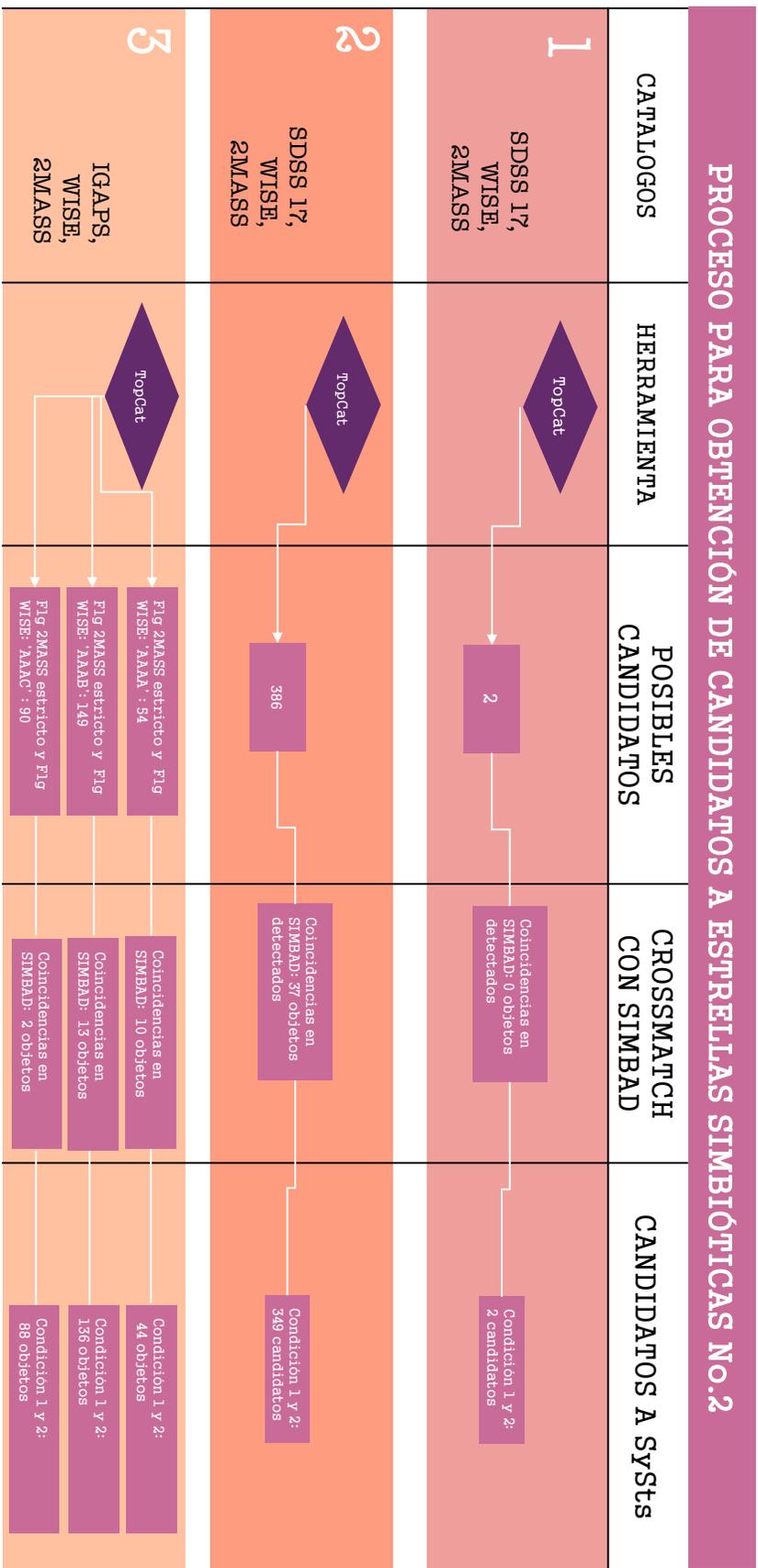


Figura 2.7: Coincidencias encontradas en SIMBAD para cada proceso de selección para la búsqueda de candidatos a SysTs.

Tabla 2.1: Lista de candidatos a estrellas simbióticas.

Candidato	Objeto ID (IPHAS)	RA	DEC	r' mag
No. 1	J200402.22+300108.1	20:04:02.21	+30:01:08.33	19.03
No. 2	J195611.02+381554.2	19:56:11.03	+38:15:53.85	18.82
No. 3	J191133.59+192246.0	19:11:33.59	+19:22:45.85	14.59
No. 4	J202430.58+395217.8	20:24:30.57	+39:52:17.79	20.51
No. 5	J202734.02+402855.5	20:27:34.04	+40:28:55.97	20.49
No. 6	J184239.70+060243.1	18:42:39.73	+06:02:43.17	15.23
No. 7	J185628.06+061701.2	18:56:28.06	+06:17:01.37	20.29
No. 8	J190252.42+022140.6	19:02:52.40	+02:21:41.04	21.87
No. 9	J063438.15+052304.4	06:34:38.16	+05:23:04.45	12.17
No. 10	J205925.31+460306.3	20:59:25.32	+46:03:06.18	22.15
No. 11	J191430.95+130013.0	19:14:30.94	+13:00:13.04	21.5
No. 12	J194257.16+244802.8	19:42:57.20	+24:48:02.93	18.23
No. 13	J190242.78-030037.0	19:02:42.73	-03:00:37.51	15.5
No. 14	J221911.85+585321.6	22:19:11.93	+58:53:21.69	16.03
No. 15	J192726.01+191740.8	19:27:26.01	+19:17:40.74	21.77
No. 16	J192806.01+190221.1	19:28:06.01	+19:02:21.17	21.74
No. 17	J194100.01+205624.4	19:41:00.00	+20:56:24.42	20.93
No. 18	J191032.25+140004.7	19:10:32.25	+14:00:04.74	17.11
No. 19	J060305.49+271433.1	06:03:05.50	+27:14:33.08	12.48
No. 20	J195258.26+252346.5	19:52:58.27	+25:23:46.60	20.96
No. 21	J194624.35+314518.9	19:46:24.35	+31:45:19.72	17.75

mencionados arriba son los candidatos más probables. **Por lo tanto, el número final de candidatos a estrellas simbióticas más probables es de 21 objetos y se muestran en orden en la Tabla 2.1.**

Para poder confirmar la naturaleza simbiótica de los candidatos es necesario identificar sus líneas de emisión características vía un análisis espectroscópico. Desarrollamos este tema a continuación (§3).

Capítulo 3

Metodología 2: Observaciones espectroscópicas y análisis

3.1. Observaciones

Para empezar, se buscó si los 21 candidatos encontrados tenían espectros en el catálogo de SDSS DR17. La operación, realizada con CasJobs, se dividió según los proceso de búsqueda descritos en la Figura 2.6. Primero empezamos con averiguar la existencia de coincidencias con los candidatos del primer proceso de búsqueda (#1). A continuación se muestra el *script* utilizado:

```
SELECT w.cntr, ws.sdss_objid, s.*
FROM mydb.Condition_1y2_wise_ID AS w
LEFT JOIN WISE_xmatch AS ws ON w.cntr = ws.wise_cntr
LEFT JOIN PhotoObjAll AS s ON ws.sdss_objid = s.objid
```

No se encontraron coincidencias para ninguno de los 2 candidatos. También se buscaron espectros con los candidatos obtenidos con el segundo proceso (#2) pero no se encontraron espectros para ninguno de los 349:

```
SELECT w.cntr, ws.*, s.objID,s.obj, s.type, s.mode, s.clean,
s.specObjID, s.u, s.g, s.r, s.i, s.z, s.err_u, s.err_g,
s.err_r, s.err_i, s.err_z, s.run, s.rerun, s.camcol, s.field
FROM mydb.Condition_1y2_sinflg4_wise_ID AS w
LEFT JOIN WISE_xmatch AS ws
ON w.cntr = ws.wise_cntr
INNER JOIN PhotoObjAll AS s
ON ws.sdss_objid = s.objid
```

El siguiente *script* se usó para buscar espectros para los candidatos obtenidos con el tercer proceso (#3):

```
SELECT t."2Mkey", tm.ptskey, s.objID,s.obj,
s.type, s.mode, s.clean, s.specObjID,
s.u, s.g, s.r, s.i, s.z,
s.err_u, s.err_g, s.err_r,
s.err_i, s.err_z, s.run, s.rerun, s.camcol, s.field
FROM mydb.Flg_2MASS_AAAA_2MKEY AS t
LEFT JOIN TwoMass AS tm ON t."2Mkey" =
tm.ptskey INNER JOIN PhotoObjAll AS s ON tm.objID = s.objid
```

Desafortunadamente ahí tampoco se encontró ningún espectro para ninguno de los candidatos. Para subsanar la falta de datos espectroscópicas en los archivos del SDSS se planearon y realizaron observaciones espectroscópicas en el Observatorio Astronómico Nacional (OAN) de la Sierra de San Pedro Mártir (SPM) con el instrumento Boller & Chivens montado en el telescopio de 2.1m.

3.1.1. Telescopio 2.1 m y espectrógrafo Boller & Chivens

Se solicitó tiempo de telescopio en el OAN-SPM (Figura 3.1) para observar los 21 candidatos más probables los cuales son listados en la Tabla 2.1 (Responsable de la propuesta de tiempo: M. Botello Nava). Después de concursar, se logró obtener tiempo de observación.

Las observaciones se realizaron en dos temporadas: una en julio del 2022 y la segunda en octubre del mismo año con la configuración mencionada en la Tabla 3.1. Los mapas de identificación utilizados en ambas temporadas se pueden revisar en el Apéndice A. De los 21 candidatos programados solo se pudieron observar 10 debido a que en la primera temporada existieron malas condiciones climáticas. Así, se “perdió” una noche dado la humedad muy alta y entonces no se pudo abrir el telescopio, y las demás noches no se pudieron aprovechar completamente debido a las nubes. El grupo final de los candidatos observados está puesto en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1: Configuración del instrumento durante las observaciones de los candidatos a SySts.

Configuración	
Rejilla	400 l/mm
CCD	E2V-4240
Ancho de rendija	150 μ m ($\sim 2''$)
Ángulo de posición	90°
Rango espectral	3687 – 7181 Å

Tabla 3.2: Lista de candidatos observados con información de la observación.

Nombre	RA	DEC	Tiempo de exp.	Fecha de observación
J200402.22+300108.1	20:04:02.21	+30:01:08.33	600s	30/07/2022
J195611.02+381554.2	19:56:11.03	+38:15:53.85	600s	31/07/2022
J191133.59+192246.0	19:11:33.59	+19:22:45.85	600s	30/07/2022
J184239.70+060243.1	18:42:39.73	+06:02:43.17	600s	30/07/2022
J190242.78-030037.0	19:02:42.73	-03:00:37.51	600s	31/07/2022
J221911.85+585321.6	22:19:11.93	+58:53:21.69	600s	31/07/2022
J191032.25+140004.	19:10:32.25	+14:00:04.74	600s	31/07/2022
J063438.15+052304.4	06:34:38.16	+05:23:04.45	900s	20/10/2022
J060305.49+271433.1	06:03:05.50	+27:14:33.08	900s	18/10/2022
J194624.35+314518.9	19:46:24.35	+31:45:19.72	900s	20/10/2022
J194257.16+244802.8	19:42:57.20	+24:48:02.93	1200s	31/07/2022

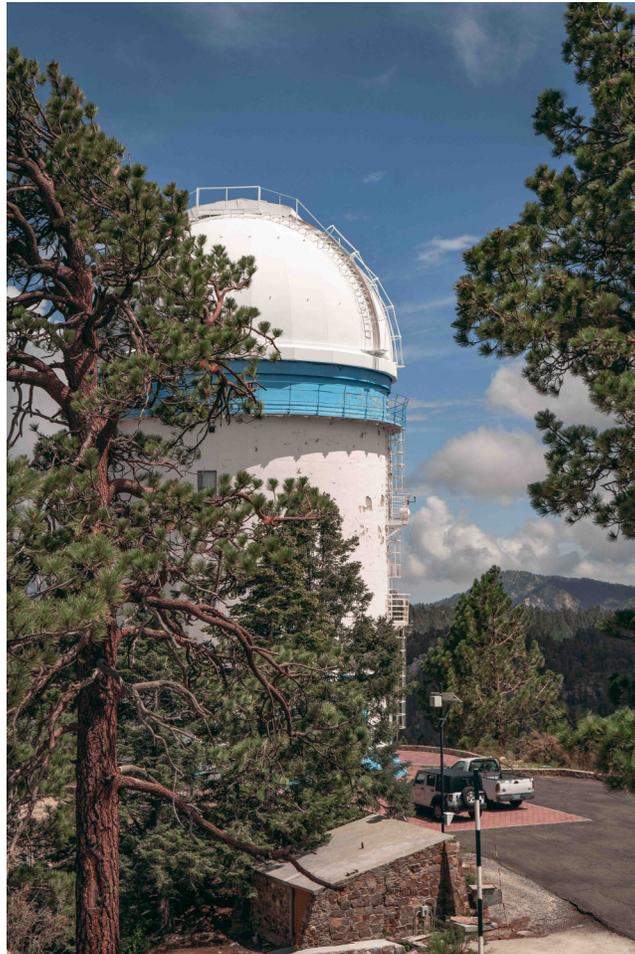


Figura 3.1: Telescopio 2.1m en el Observatorio Astronómico Nacional en la Sierra de San Pedro Mártir (OAN-SPM).



Figura 3.2: Vista dentro de la cúpula del telescopio 2.1m, lugar donde se realizaron las observaciones astronómicas.

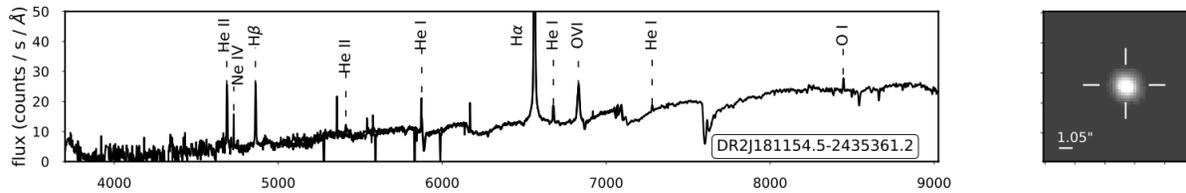


Figura 3.3: Ejemplo de un espectro de estrella simbiótica donde se pueden ver las líneas de emisión comunes en este tipo de sistema. Recuperado de Akras et al. (2021).

3.1.2. Líneas características en las SySts

Para identificar las simbióticas se necesita detectar algunas líneas de emisión típicas que se listan a continuación:

1. El efecto Raman trata de la dispersión inelástica de los fotones por la materia. En este caso tenemos un intercambio de energía y se produce un cambio en la dirección del paso de los fotones. Las SySts son la única clase conocida de objetos astronómicos que muestran las líneas dispersadas de Raman de OVI a 6830 y 7088 Å. Otras líneas dispersadas de Raman que pueden aparecer en SySts son las de HeII 940, 972 y 1025 Å y NeVII 973 Å. Pero están en el UV i.e. fuera de nuestro rango de estudio.
2. Las bandas moleculares de TiO están asociadas a la presencia de una gigante roja y pueden ser encontradas en las longitudes de onda 7053 Å, 7589 Å, 8206 Å, y 8432 Å (Ver figura 3.3).
3. Las líneas que se originan en la envoltura circunestelar altamente ionizada iluminada por el fuerte campo UV de la enana blanca son H α , [O III] 4363/5007 Å, He II 4686 Å y OVI 6830 Å.
4. Otras líneas que han sido detectadas en las SySts son H β , OI 8446 Å, HeI 5875, 6678, 7065, y 7281 Å, [NII] 6583, 7065, y 7281 Å, [Ne III] 3869 Å, [FeVII] 5720 Å y [CaV] 6086 Å.

3.1.3. Reducción de datos

Los espectros tomados durante una observación están contaminados por ruido de electrónica e iluminación entre otros factores atmosféricos. Es necesario realizar una calibración de los espectros para tener datos útiles y de calidad que puedan ser estudiados científicamente. Los pasos que se realizaron para los diferentes tipos de calibración, usando IRAF, son enlistados a continuación:

1. RECORTE ESPECTROS.- Se recortaron los espectros para deshacernos de áreas inútiles. En la imagen lo podemos ver como unas bandas negras alrededor que se pueden dar en el eje “x”

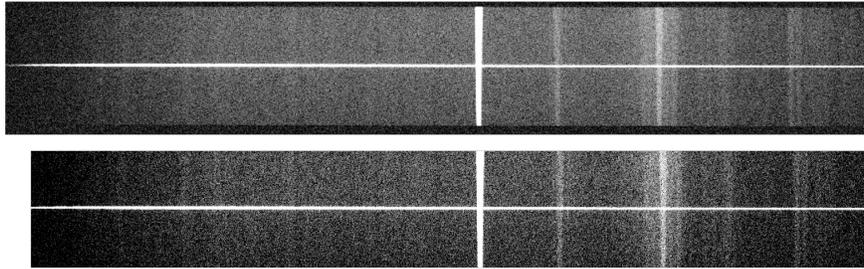


Figura 3.4: En la imagen superior vemos unas franjas negras alrededor (viñetas), la imagen inferior es la misma que la superior pero ya se eliminaron las partes negras.

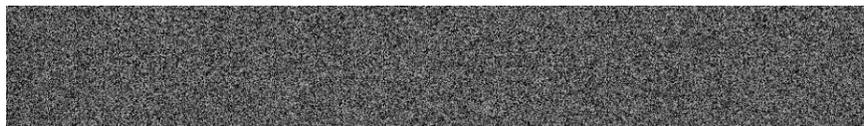


Figura 3.5: Ejemplo de un *bias*.

o en “y”. Está área puede ser considerada como inútil debido a que no contiene información relevante de la observación, sin embargo, el overscan puede servir para monitorizar el estado de la electrónica de lectura del CCD. Comúnmente si se recorta la imagen se debe de recortar también los BIAS, FLATS y demás datos tomados para la calibración, por lo que todas las tomas se recortaron de manera que quedaran del mismo tamaño. En la Figura 3.4 se puede observar un ejemplo de corte de viñetas. Para llevar esto a cabo se hizo uso de la tarea *imcopy* con la cual podemos copiar una porción de la imagen y guardarla como una imagen nueva (ver Figura 3.4).

2. CORRECCIÓN BIAS.- El bias está relacionado con el ruido electrónico. Durante la observación se toman una serie de BIAS (Figura 3.5) con tiempo de exposición 0 (cero) con el obturador cerrado. Se debe obtener suficientes tomas para que el ruido introducido sea despreciable al sustraer el bias combinado final de los espectros. La combinación se realizó en IRAF con la tarea *zerocombine* que para ejecutarla es necesario abrir los siguientes paquetes; *noao* – > *imred* – > *ccdred* – > *epar zerocombine*. Con ayuda de la tarea *imarith* se restó el MASTERBIAS (ver Figura 3.8).
3. CORRECCIÓN DE CAMPO PLANO (FLAT FIELD).- Se corrige la diferente respuesta de cada píxel de un CCD para que se obtenga una respuesta uniforme. Existen diferentes tipos de campo planos: los de Domo que se toman con lámparas internas o la cúpula iluminada (Figura 3.6) usando una pantalla dentro del domo; y los de cielo (Figura 3.6) que se toman en el cielo del crepúsculo y/o amanecer, y contiene impreso el espectro del Sol. Durante las observaciones se tomaron flats de domo y para calibrar está parte primero se combinaron



Figura 3.6: Arriba un ejemplo de un campo plano (*flat*) de domo y abajo un ejemplo de flat de cielo.

los flats con la tarea *flatcombine* de IRAF. Para ejecutarla fue necesario abrir los siguientes paquetes; *noao* -> *imred* -> *ccdred* -> *epar flatcombine*. Después se normalizó la combinación de los flats (MASTERFLAT o flat final) abriendo la siguiente línea de paquetes; *noao* -> *twodspec* -> *longslit* -> *epar response*. Finalmente se corrigieron los espectros dividiendolos por el flat final normalizado con la tarea *imarith* (Ver Figura 3.8).

4. RAYOS CÓSMICOS.- En general se toman varias imágenes para limpiar posibles impactos de rayos cósmicos por ende durante las observaciones se tomaron tres exposiciones de cada candidato y a través de IRAF se combinaron los espectros con las tareas *images* -> *immatch* -> *epar imcombine*. De esta manera se eliminó la presencia de los rayos cósmicos con el método de la mediana.
5. CALIBRACIÓN EN LONGITUD DE ONDA.- En esta etapa se convierten las unidades del eje de dispersión de píxel a longitud de onda. Para hacerlo es necesario que durante la observación se tomen arcos espectrales de calibración después de cada objeto observado. Se tiene que identificar una serie de líneas en un espectro unidimensional a partir de la imagen del arco. Para este proyecto durante las dos temporadas de observación se tomaron arcos con una lámpara de CuAr. La calibración en longitud de onda primero se hizo con la tarea *identify* la cual nos permite abrir el espectro del arco e identificar las líneas ya conocidas de esta lámpara (Figura 3.8). Para llegar a esta tarea es necesario abrir la línea de paqueterías descritos en la Figura 3.8 en el punto 4. Después con la tarea *reidentify* se calibraron los arcos correspondientes a cada objeto observado (Ver Figura 3.8) y se enderezaron los espectros con la tarea *fitcoords*. La calibración en longitud de onda o la solución se aplicó con la tarea *transform*.
6. CALIBRACIÓN EN FLUJO.- Se toma el espectro de una estrella estándar. Son fuentes cuyos flujos son conocidos empíricamente. Lo que se requiere hacer en este paso es estimar la cantidad de cuentas por longitud de onda. Esta calibración además requiere la curva de

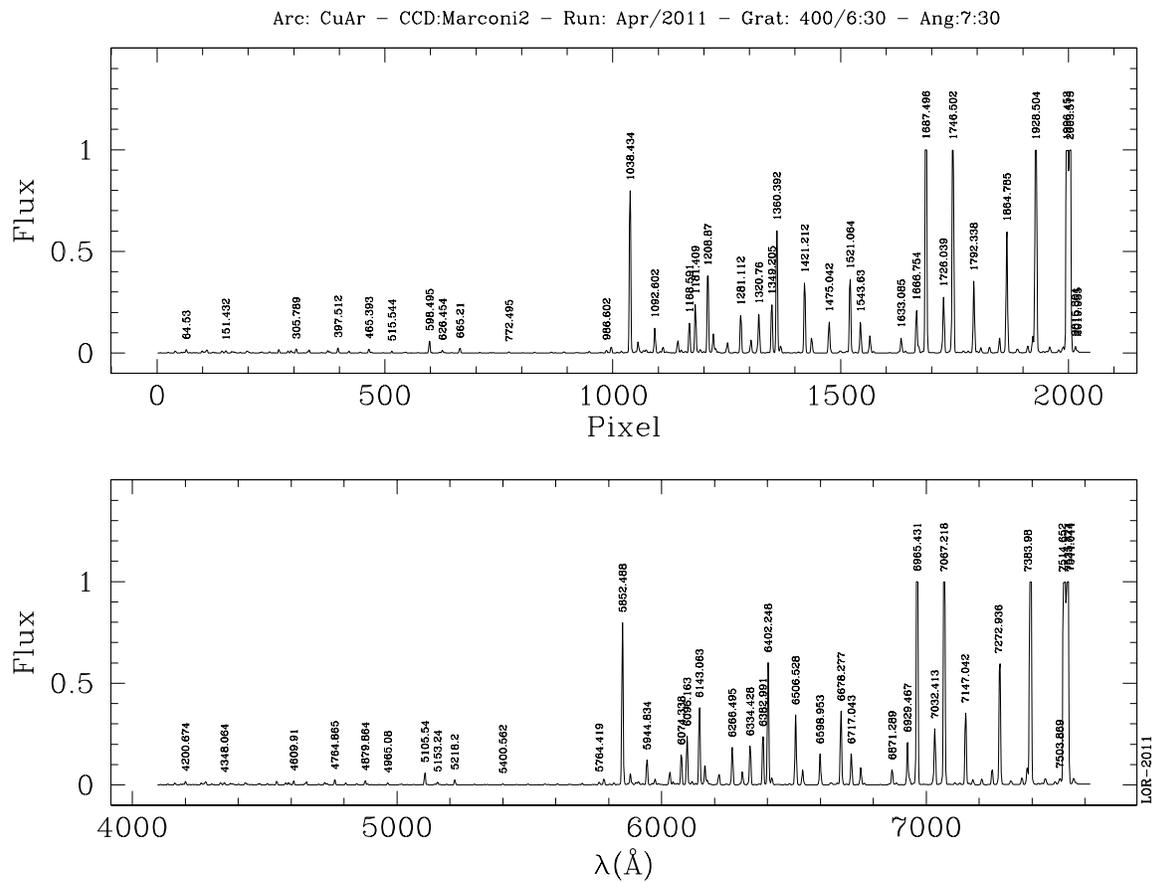


Figura 3.7: Arco o Atlas para calibración en longitud de onda. Recuperado del OAN-SPM.

extinción atmosférica la cual se puede descargar de la página del Observatorio Astronómico Nacional de SPM¹. Durante las observaciones se tomó en cada noche el espectro de una estrella estándar. En IRAF existen catálogos que contienen estrellas estándar los cuales son útiles para la calibración y para buscarlos es necesario ejecutar la siguiente línea; `onedstds$README`. Una vez encontrada la estrella estándar en un catálogo se procede a calibrarla en flujo abriendo los paquetes `noao` -> `imred` -> `epar standard`. Después se realiza una función de sensibilidad que es la solución que se aplicará a los demás espectros y para hacerla se utiliza el archivo obtenido de la calibración en flujo de la estándar y esto se realiza dentro de la paquetería `ctioslit` con la tarea `epar sensfunc`. Una vez obtenida la función `sensfunc` es posible calibrar en flujo los espectros y se realiza desde la paquetería `ctioslit` con la tarea `epar calibrate`.

Una vez completa la calibración, se extrajeron los espectros para obtener datos en una dimensión en vez de dos. Para la extracción se hizo uso de la tarea `apall` que se encuentra en el paquete de IRAF `apextrac`. Esto genera un archivo fits que contiene el header y una sola columna que representa el flujo por cada píxel pero si lo graficamos de esta manera solo tendríamos flujo vs píxel. Se generó una nueva columna en Python 2.1.3 con ayuda de los datos del header para transformar el píxel a longitud de onda. Los datos necesarios para realizar la transformación fueron:

1. `CRVAL` es el valor de lambda inicial es decir el píxel 0.
2. `CDELTA` es el diferencial de lambda, es decir, delta lambda.
3. `NAXIS1` es el número de elemento en el único eje dado.

La transformación en Python para obtener la longitud de onda en cada píxel se realizó de la siguiente manera utilizando la paquetería `numpy` (ver Capítulo 2.1.3):

```
longitud_de_onda = np.arange(start =
hdr["CRVAL1"] , stop = hdr["CRVAL1"]+hdr["NAXIS1"]*hdr["CDELTA1"] ,
step =hdr_1["CDELTA1"])
```

Los espectros finales de los candidatos pueden ser observados en la siguiente sección.

¹<https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/astronomos/herramientasobs>

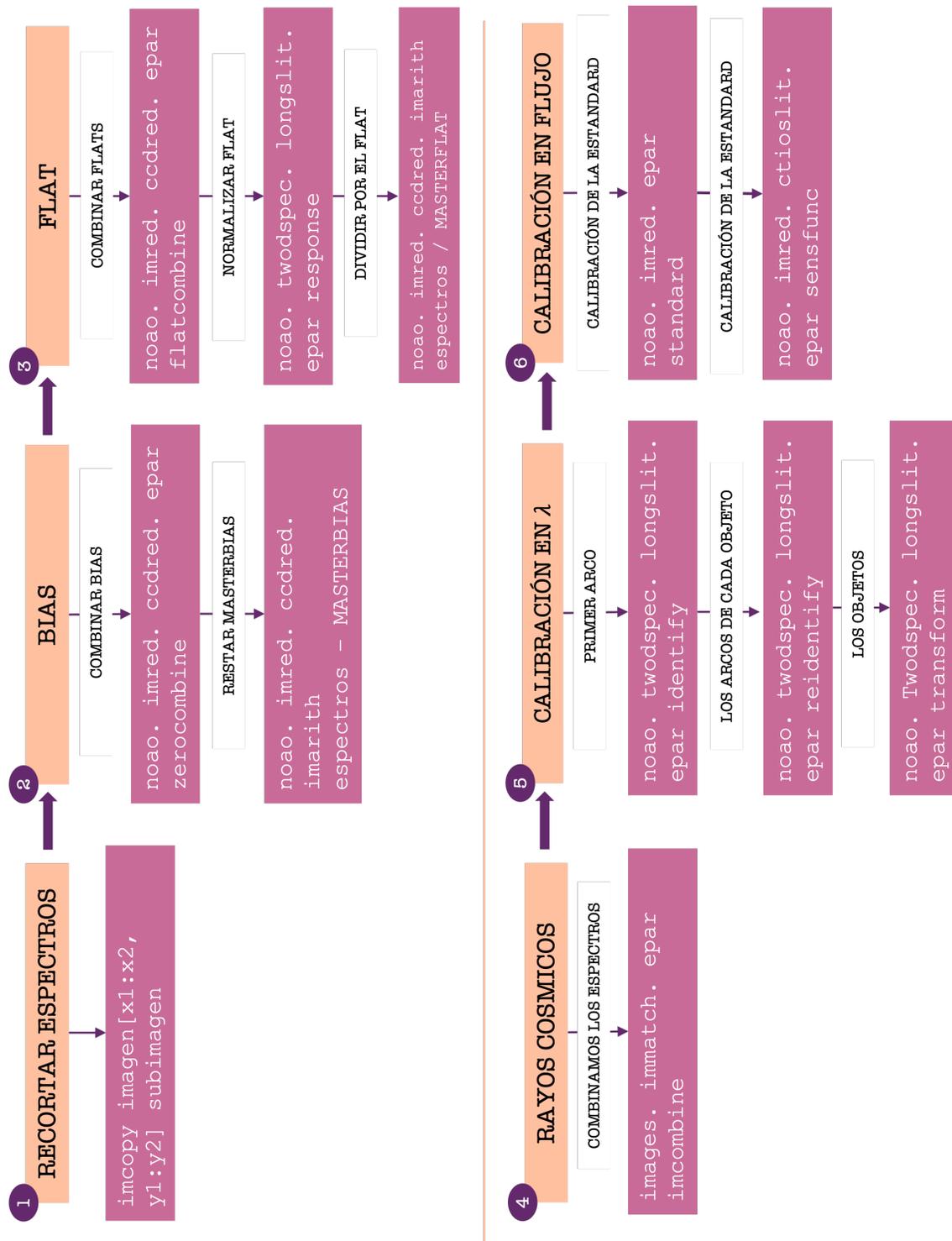


Figura 3.8: Secuencia de calibración de los espectros en IRAF con sus paqueterías y tareas correspondientes.

3.2. Resultados de la espectroscopia

Los espectros de los objetos observados se extrajeron con IRAF y se graficaron en Python. Las Figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 muestran dichos espectros.

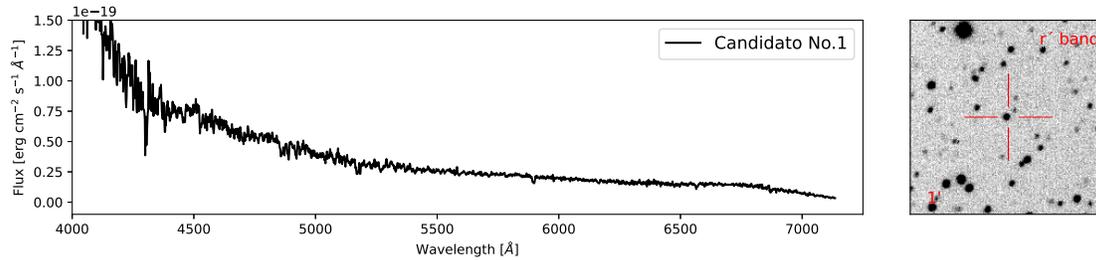


Figura 3.9: Candidato No.1 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 7.23 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de 1' de tamaño.

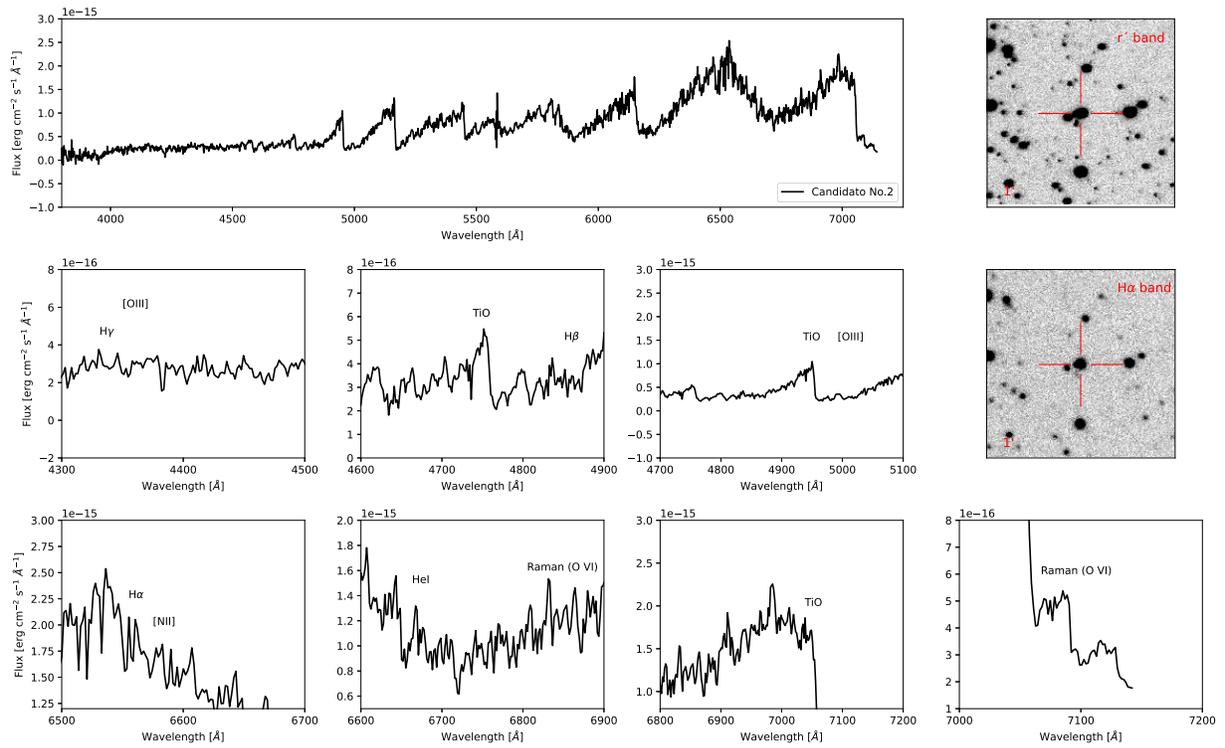


Figura 3.10: Candidato No.2 (Tabla 2.1). Superior izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 10.26 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Superior derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño. Medio derecha: imagen de la estrella en la banda $H\alpha$ de IPHAS de $1'$ de tamaño. Medio inferior: líneas características de SySts encontradas en el espectro.

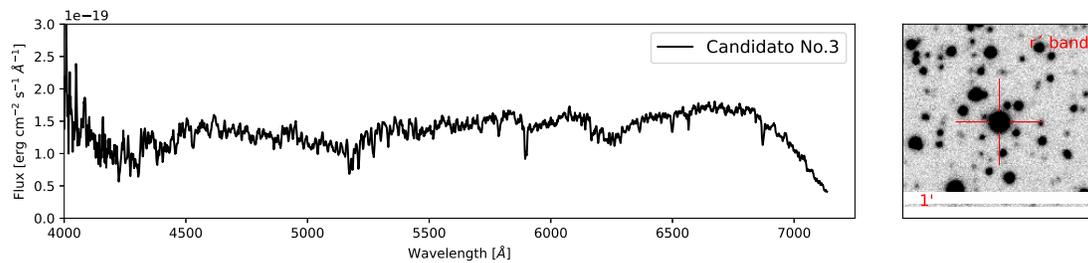


Figura 3.11: Candidato No.3 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 4.31 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño.

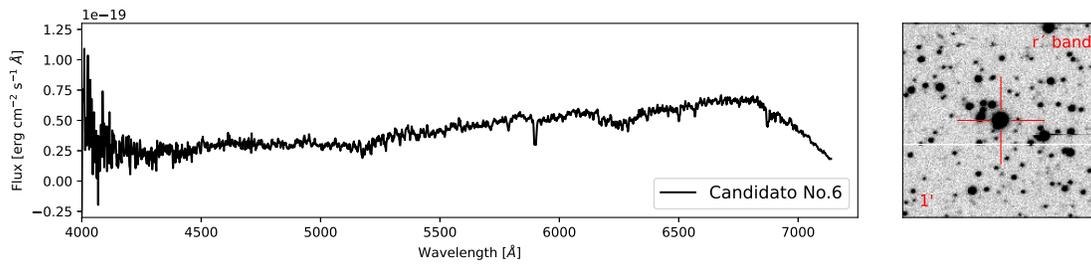


Figura 3.12: Candidato No.6 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 5.72 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño.

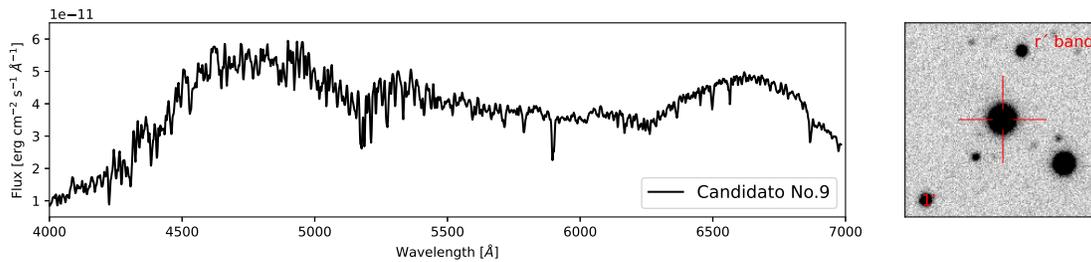


Figura 3.13: Candidato No.9 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 1.87 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño.

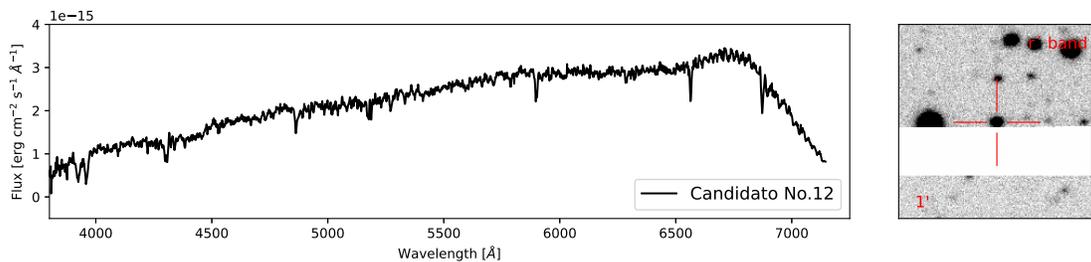


Figura 3.14: Candidato No.12 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 6.53 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño.

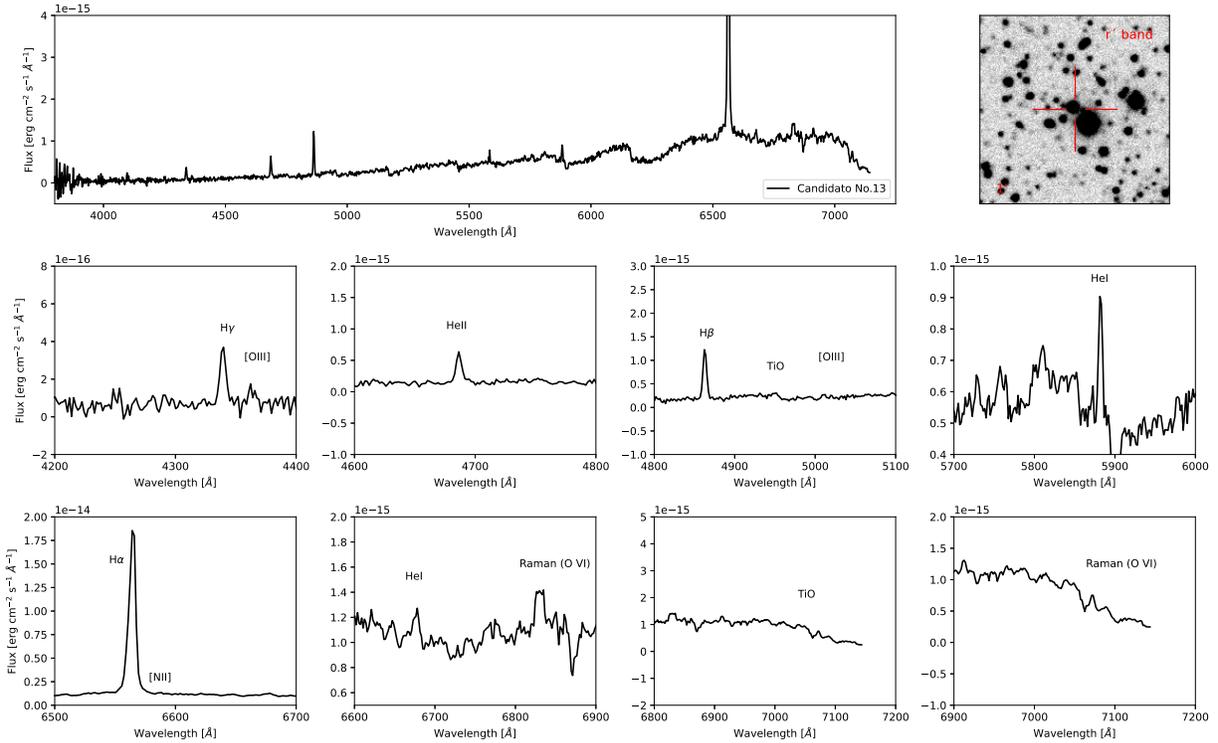


Figura 3.15: Candidato No.13 (Tabla 2.1). Superior izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 8.8 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Superior derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño. Media y final: líneas características de las SySts encontradas en el espectro.

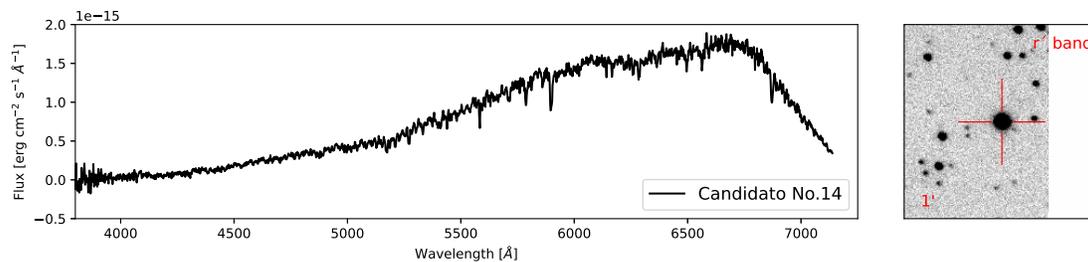


Figura 3.16: Candidato No.14 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 3.96 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño.

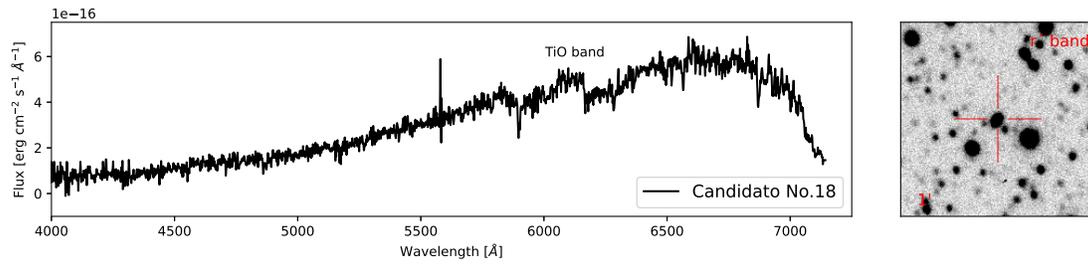


Figura 3.17: Candidato No.18 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia fotogeométrica de 11.14 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño.

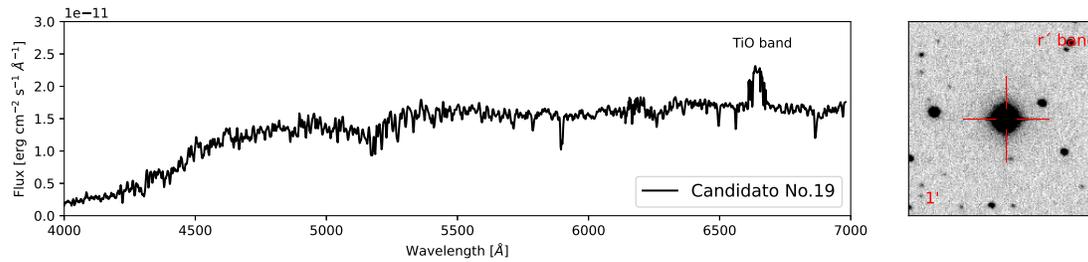


Figura 3.18: Candidato No.19 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia de 4.7 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Se puede apreciar la banda de TiO a 6650\AA . Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño.

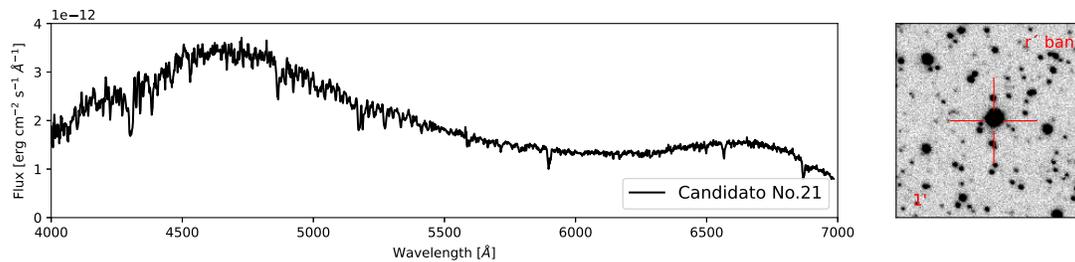


Figura 3.19: Candidato No.21 (Tabla 2.1). Izquierda: espectro del objeto que se encuentra a una distancia geométrica de 2.95 kpc (Bailer-Jones et al., 2021). Derecha: imagen de la estrella en la banda r' de IPHAS de $1'$ de tamaño.

Capítulo 4

Discusión

Para definir la naturaleza de los candidatos y a qué grado respondemos a la problemática de esta investigación, usamos varios métodos que se discuten a continuación: diagramas diagnóstico (§4.1), estudios espectroscópicos (§4.2) y análisis de distribución espectral de energía (§4.2.3).

4.1. Análisis de los diagramas de diagnóstico color-color

En esta sección se presentan diagramas diagnóstico color-color similares a los de Akras et al. (2019). Los elementos utilizados para poblar los diagramas se encuentran en la Tabla 4.1 y los diagramas resultantes se presentan en las Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6.

Tabla 4.1: Lista de referencias de las muestras de los objetos para los DDCC.

Clase de objeto	Muestra	Referencias
PNe	307	(Parker et al., 2016)
pAGB/pPNe	53	(Parker et al., 2016)
HII region	28	(Parker et al., 2016)
SySts	268	(Merc et al., 2019b)
CVs	4	(Parker et al., 2016)

En el diagrama $J-H$ vs $H-W2$ (4.1) se observa que los candidatos, aún perteneciendo al grupo de las simbióticas, caen sistemáticamente en la parte baja de la distribución general de las SySts conocidas i.e se ven más “rojos” que las SySts conocidas si consideramos la diferencia $H-W2$. Respecto a $J-H$ los candidatos muestran una distribución casi lineal en el rango de 0.8 a 2.1 mag. El encontrar los candidatos más al “rojo” indica que estamos viendo una componente más fría probablemente debido a que estamos dominados por el flujo de la estrella gigante o solo vemos a una

gigante. En el diagrama $H-K$ vs $J-H$ (4.2) la distribución de los candidatos indica que también pueden ser clasificados como SySts. Se observa en la distribución $J-H$ que nuestros candidatos son más “azules” que las simbióticas conocidas y delimitan su borde exterior.

En los diagramas 4.3 y 4.5 no se observa una distribución peculiar de los candidatos, sino que pertenecen al grupo de simbióticas estando más agrupados en el “locus”¹ del diagrama 4.4.

Finalmente en los dos diagramas que muestran la distribución en diferencias de colores $W3-W4$ ($12\mu\text{m}-22\mu\text{m}$) (Figuras 4.5 y 4.6) se observa una distribución dispersa de los candidatos, sin embargo se pudieran considerar como simbióticas (dado la dispersión grande de la población de SySts conocidas) aunque algunos se confunden en las zonas de Nebulosas Planetarias, Post AGB/pPNe y variables cataclísmicas.

- En conclusión, los diagramas generalmente indican que nuestros objetos podrían ser clasificados como SySts. **Es de notar que muy pocos de ellos caen en el locus de las SySts en la mayoría de dichos diagramas. Este se discute más adelante en las secciones 4.2.1 y 4.2.2.**

4.2. Análisis de los resultados espectroscópicos

4.2.1. IPHAS J190242.78-030037.0

El espectro de este objeto es típico de una estrella simbiótica. En efecto, se observan algunas líneas en emisión de Balmer, es decir, $H\alpha$, $H\beta$ y $H\gamma$, donde la razón $H\alpha/H\beta$ es alrededor de 21. Se encontraron la firma de las líneas producidas por la gigante roja y por la estrella caliente. Por lo tanto, se observa el continuo rojo con las líneas características de TiO en absorción relacionadas con la gigante roja. También se encuentran líneas altamente ionizadas [OIII] $\lambda 4363\text{\AA}/5007\text{\AA}$ y HeII $\lambda 4686\text{\AA}$; y las menos ionizadas como [NII] $\lambda 6584\text{\AA}$, HeI $\lambda 5875/6678\text{\AA}$. De manera más contundente, se detectaron las líneas dispersas de O VI Raman (o Raman-scattered en inglés) a 6830\AA y 7088\AA , que son características de las estrellas simbióticas. Esta nueva estrella simbiótica se encuentra a una distancia fotogeométrica de $8.8_{-1.1}^{+1.3}\text{kpc}$ según Bailer-Jones et al. (2021) y es de tipo estelar (S-type) según los diagramas diagnóstico 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13.

4.2.2. IPHAS J195611.02+381554.2

El espectro (Figura 3.10) muestra un continuo rojo muy notorio y característico de una componente fría con la presencia de bandas de TiO. También se aprecian líneas de emisión de alta ([OIII] $\lambda 4363/5007\text{\AA}$) y baja ([NII] $\lambda 6584\text{\AA}$ HeI $\lambda 6678\text{\AA}$) excitación. Similarmente a IPHAS

¹Es el área donde se concentran la mayoría de las simbióticas dentro de la distribución

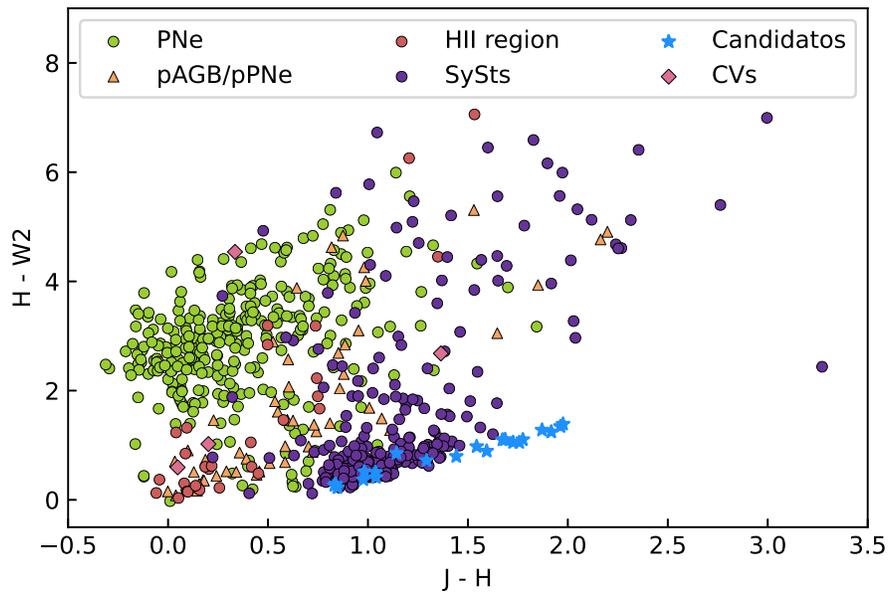


Figura 4.1: Diagrama diagnóstico $J-H$ vs $H-W2$ con bandas de 2MASS y WISE de diferentes objetos; el círculo color verde representa a la Nebulosas Planetarias, el triángulo amarillo representa a las post Rama Asintótica de las estrellas Gigantes y a las post-Nebulosas Planetarias, el círculo anaranjado representa las regiones HII, los rombos rosas representan a las variables cataclísmicas, las estrellas simbióticas están representadas con círculos morado y los candidatos a SySts están representados con estrellas celestes.

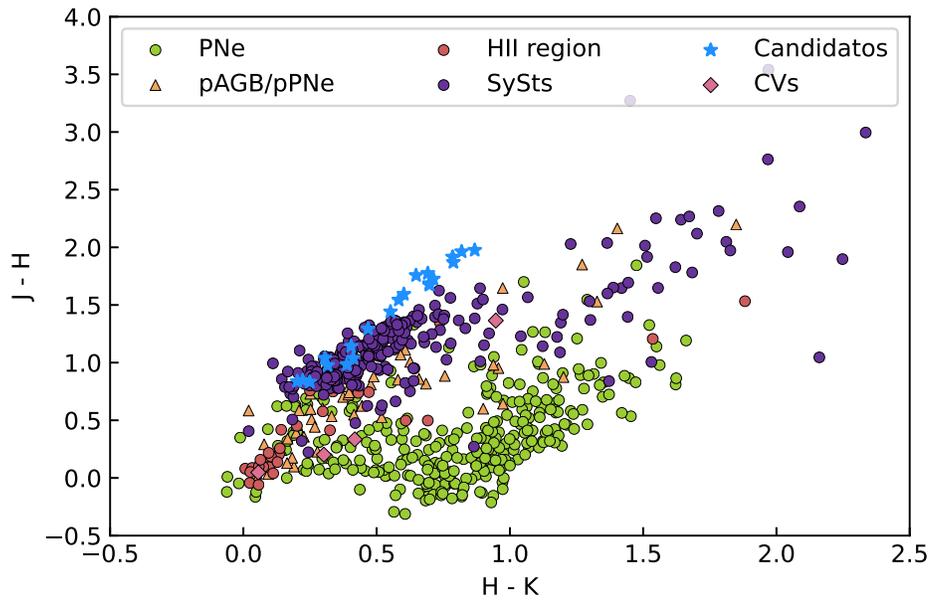


Figura 4.2: Diagrama diagnóstico $H-K$ vs $J-H$ con bandas de 2MASS de diferentes objetos incluidos los candidatos a SySts.

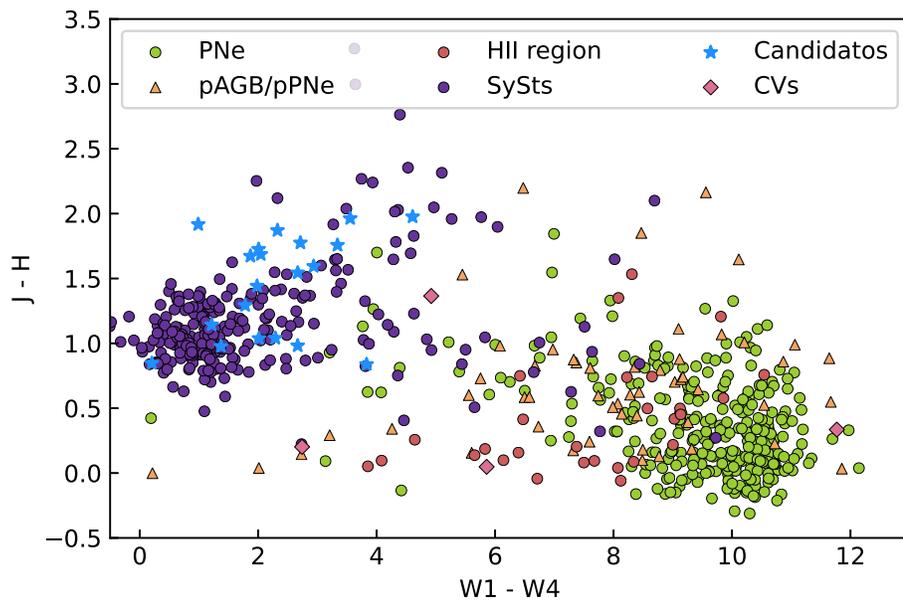


Figura 4.3: Diagrama diagnóstico $W1-W4$ vs $J-H$ con bandas de 2MASS y WISE de diferentes objetos incluidos los candidatos a SySts.

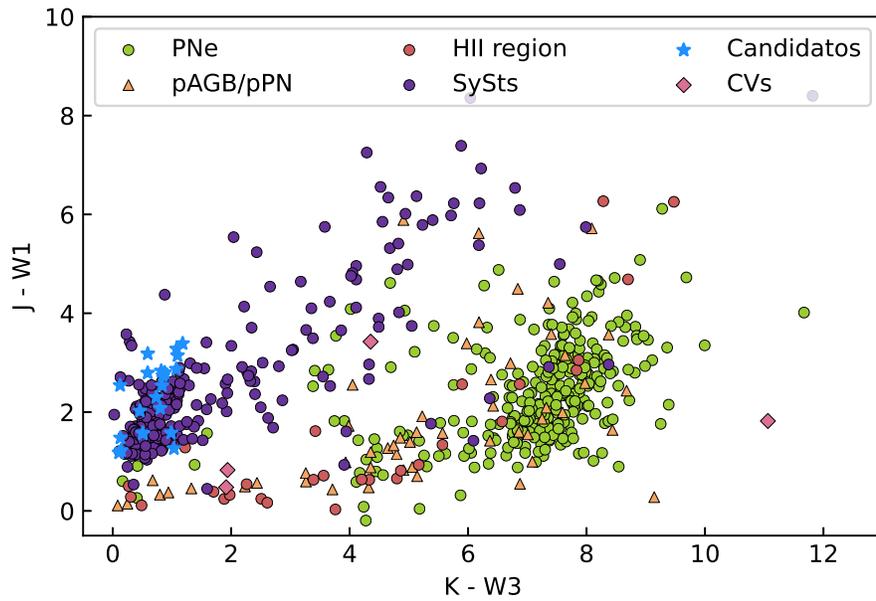


Figura 4.4: Diagrama diagnóstico $K-W3$ vs $J-W1$ con bandas de 2MASS y WISE de diferentes objetos incluidos los candidatos a SySts.

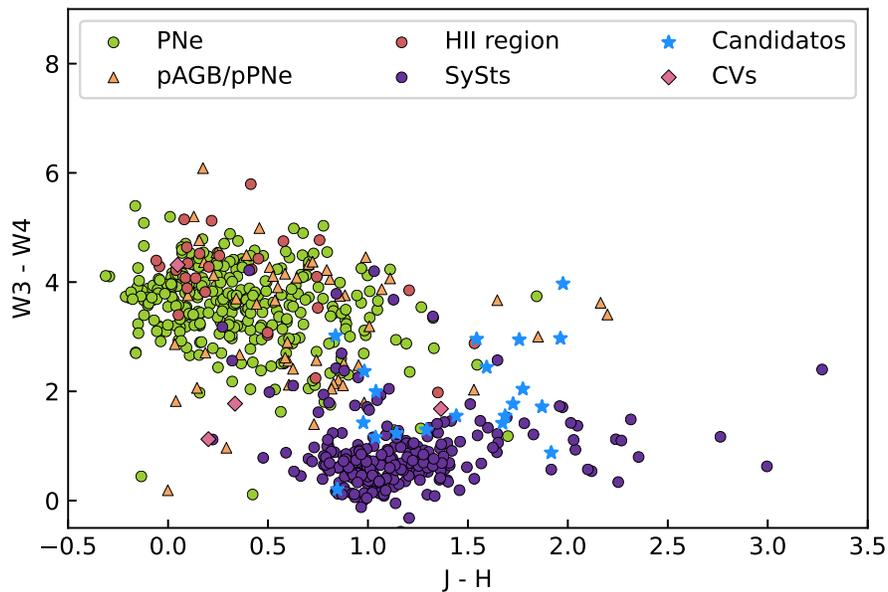


Figura 4.5: Diagrama diagnóstico $J-H$ vs $W3-W4$ con bandas de 2MASS y WISE de diferentes objetos incluidos los candidatos a SySts.

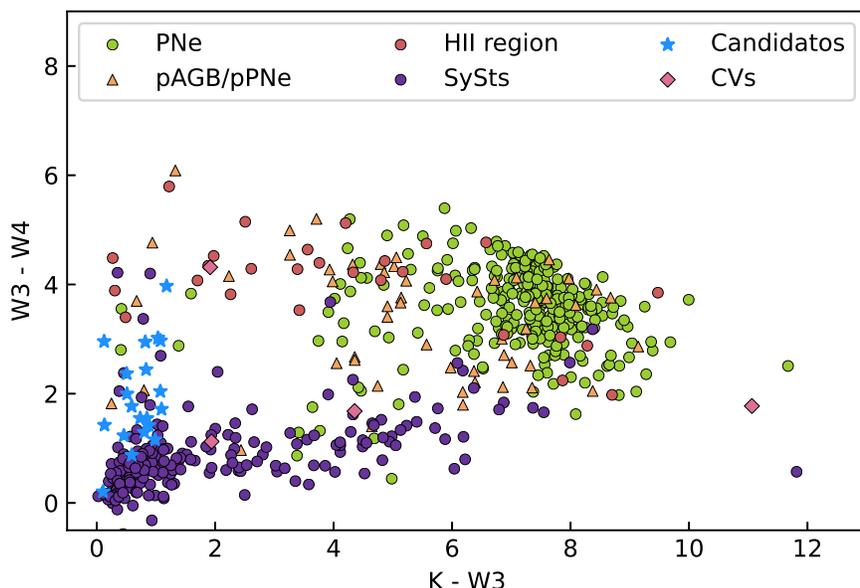


Figura 4.6: Diagrama diagnóstico $K-W3$ vs $W3-W4$ con bandas de 2MASS y WISE de diferentes objetos incluidos los candidatos a SySts.

J190242.78-030037.0 detectamos las líneas de Raman de O VI, apoyando la naturaleza de simbiótica de IPHAS J195611.02+381554.2. Un aspecto interesante de este objeto son las líneas de Balmer. En efecto, el flujo de las líneas de Balmer es mucho más bajo que lo que se encuentra en las estrellas simbióticas en general. La razón para tal comportamiento puede ser relacionada con:

- La presencia de una nebulosa externa emitiendo más fuertemente en esas líneas de Balmer, que fueron restadas durante el proceso de eliminación del “cielo”(ver Fig.4.7). Sin embargo, no se espera que se quitaran tanto la firma de las líneas de Balmer intrínsecas del objeto y por lo tanto, por naturaleza, IPHAS J195611.02+381554.2 debe tener una emisión baja en las líneas de Hidrógeno. Este esquema de emisión débil también se aprecia con las otras líneas de emisión “típicas” de las simbióticas.
- El mismo fenómeno físico ocurriendo en el objeto SU Lyn (Mukai et al., 2016). En efecto, la ausencia de quema del cascarón (*Shell-burning*) de la enana blanca en esta simbiótica peculiar, sería responsable de la poca emisión de las líneas en el óptico (como lo observamos en nuestro espectro óptico). La mayor fuente de poder vendría de la acreción en la WD. Según Mukai et al. (2016) este tipo de objeto representaría una población de estrellas simbióticas de “tipo oculta”. Recientemente Munari et al. (2021) encontraron 33 candidatos de este tipo

por lo tanto con nuestra investigación añadimos un objeto más a esta población particular.

Esta otra estrella simbiótica se encuentra a una distancia fotogeométrica de $10.3^{+1.8}_{-1.7}$ kpc según Bailer-Jones et al. (2021) y es de tipo estelar/estelar con exceso de infrarrojo (*S-type/S+IR-type*) según los diagramas diagnóstico 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13.

4.2.3. Caracterización del remanente de la muestra

Los otros objetos no muestran ni la forma espectral ni las líneas características de las SySts. Para investigar la naturaleza de esos objetos usaremos la herramienta VOSA (*Virtual Observatory SED Analyzer*²) para analizar su distribución espectral de energía (o SED en inglés). Para todos los objetos usamos los datos de los mapas de extinción de Schlegel et al. (1998) y las distancias procedentes de Bailer-Jones et al. (2021). Para localizar los objetos en el diagrama H-R (Figura 4.23) usamos modelos evolutivos teóricos a diferentes masas de “*MESA Isochrones & Stellar Tracks*” Choi et al. (2016).

1. IPHAS J200402.22+300108.1:

La SED de este objeto fue realizada con varios datos fotométricos y se muestra en la figura 4.14-arriba. El ajuste (4.14-abajo) hecho con los modelos de Castelli & Kurucz (2003) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}= 3500$ K, $\log g= 0$ y $\log (L_{\text{bol}})= 2.92L_{\odot}$. Usaremos los modelos de Castelli & Kurucz (2003) en todos los ajustes salvo mención contraria. El objeto, con una extinción visual $A_v= 7.49$ mag, está localizado a una distancia fotogeométrica de $7.5^{+1.6}_{-2.0}$ kpc.

2. IPHASJ 191133.59+192246.0:

La SED de este objeto se presenta en la figura 4.15-arriba. El ajuste (4.15-abajo) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}= 4250$ K, $\log g= 3$ y $\log (L_{\text{bol}})= 2.59L_{\odot}$. El objeto, con una extinción visual $A_v= 2.59$ mag, está localizado a una distancia fotogeométrica de $4.3^{+0.3}_{-0.3}$ kpc.

3. IPHAS J184239.70+060243.1:

La SED de este objeto se presenta en la figura 4.16-arriba. El ajuste (4.16-abajo) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}= 3750$ K, $\log g= 3$ y $\log (L_{\text{bol}})= 2.6L_{\odot}$. El objeto, con una extinción visual $A_v= 2.5$ mag, está localizado a una distancia fotogeométrica de $5.7^{+0.9}_{-0.7}$ kpc.

4. IPHAS J063438.15+052304.4:

La SED se muestra en la figura 4.17-arriba. El ajuste (4.17-abajo) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}= 4000$ K, $\log g= 3.5$ y $\log (L_{\text{bol}})= 2.28L_{\odot}$. El objeto, con una extinción visual $A_v= 1.13$ mag, está localizado a una distancia fotogeométrica de $1.87^{+0.05}_{-0.07}$ kpc.

²<http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/vosa/>

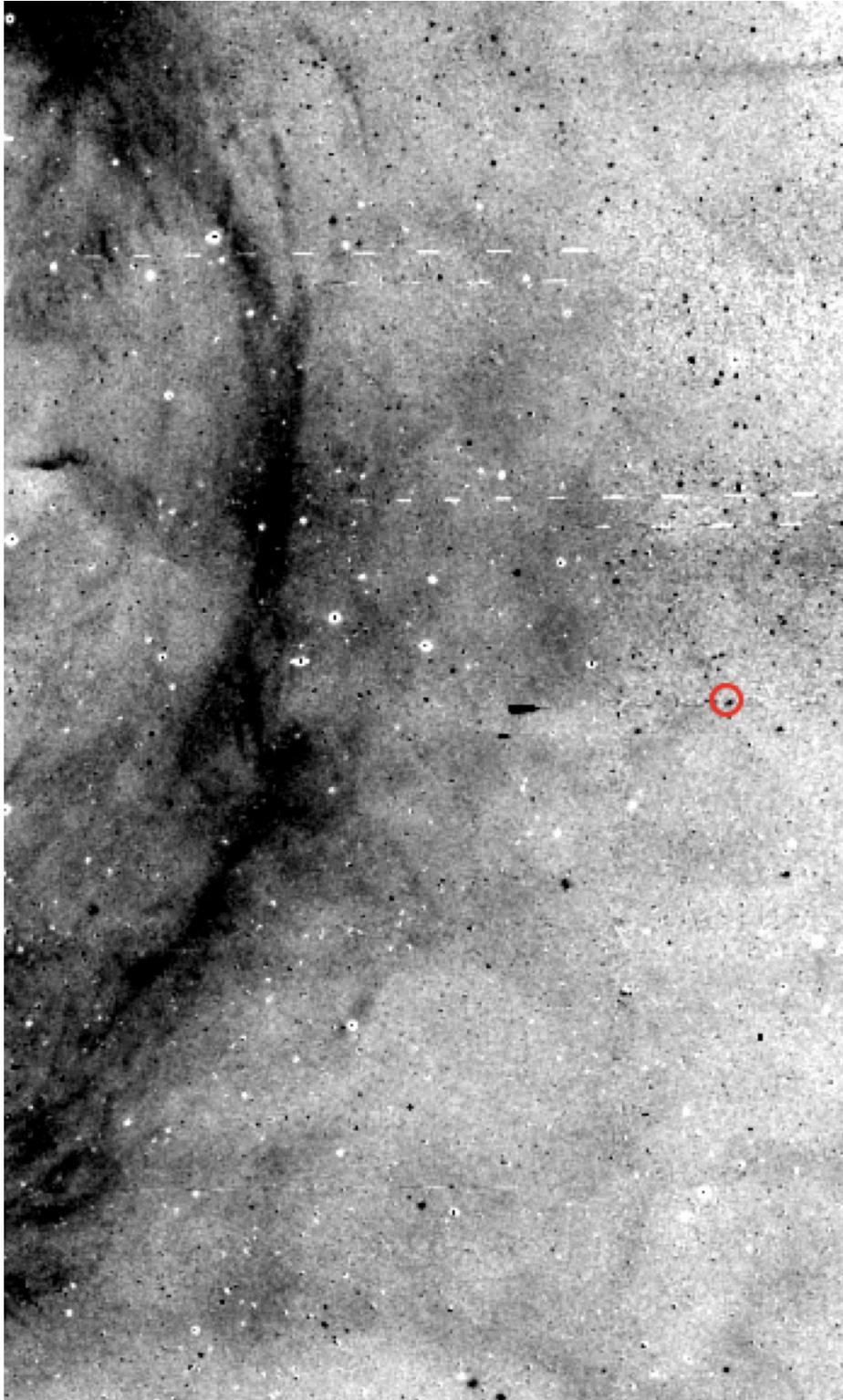


Figura 4.7: Imagen del candidato No. 2 (Tabla 2.1) el cual está representado por un círculo rojo. Con bandas de IPHAS; $H\alpha/r'$, el norte se encuentra hacia arriba y el este a la izquierda, tiene un tamaño de $17.2' \times 30'$.

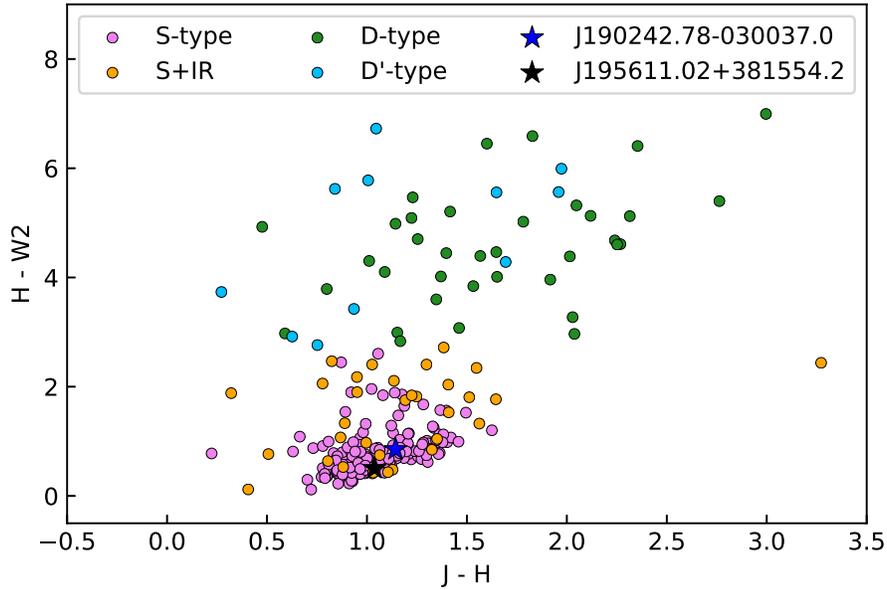


Figura 4.8: Diagrama diagnóstico $J-H$ vs $H-W2$ que muestra los tipos de SySts. La muestra de simbióticas conocidas utilizada se muestra en la Tabla 4.1. La estrella color azul corresponde al candidato 13 de la Lista 2.1 y la estrella negra corresponde al candidato 2.

5. IPHAS J194257.16+244802.8:

La SED de IPHAS J194257.16+244802.8 se muestra en la figura 4.18-arriba. El ajuste (4.18-abajo) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}= 9000$ K, $\log g= 1.5$ y $\log (L_{\text{bol}})= 4.31 L_{\odot}$. El objeto, con una extinción visual $A_v= 10.3$ mag, está localizado a una distancia fotogeométrica de $6.5_{-0.9}^{+1.5}$ kpc.

6. IPHAS J221911.85+585321.6:

La SED se muestra en la figura 4.19-arriba. El ajuste (4.19-abajo) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}= 5000$ K, $\log g= 4$ y $\log (L_{\text{bol}})= 2.6 L_{\odot}$. El objeto, con una extinción visual $A_v= 4.23$ mag, está localizado a una distancia fotogeométrica de $3.9_{-0.2}^{+0.03}$ kpc.

7. IPHAS J191032.25+140004.7:

La SED de este objeto se presenta en la figura 4.20-arriba. El ajuste (4.20-abajo) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}= 3500$ K, $\log g= 0.5$ y $\log (L_{\text{bol}})= 3.22 L_{\odot}$. El objeto, con una extinción visual $A_v= 4.04$ mag, está localizado a una distancia fotogeométrica de $11.1_{-2.7}^{+2.8}$ kpc.

8. IPHAS J060305.49+271433.1:

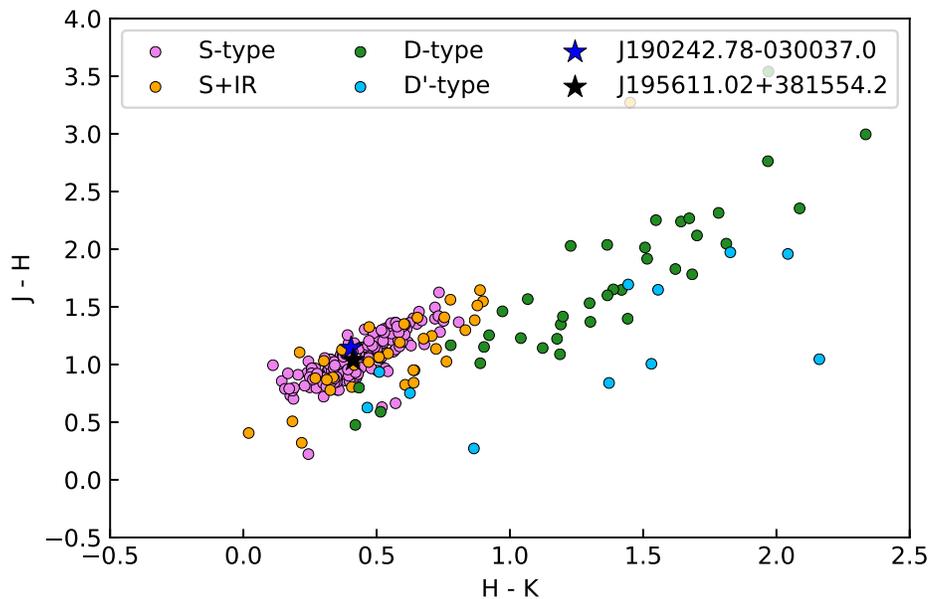


Figura 4.9: Diagrama diagnóstico $H-K$ vs $J-H$ que muestra los tipos de SySts. La muestra de simbióticas conocidas utilizada se muestra en la Tabla 4.1. La estrella color azul corresponde al candidato 13 de la Lista 2.1 y la estrella negra corresponde al candidato 2.

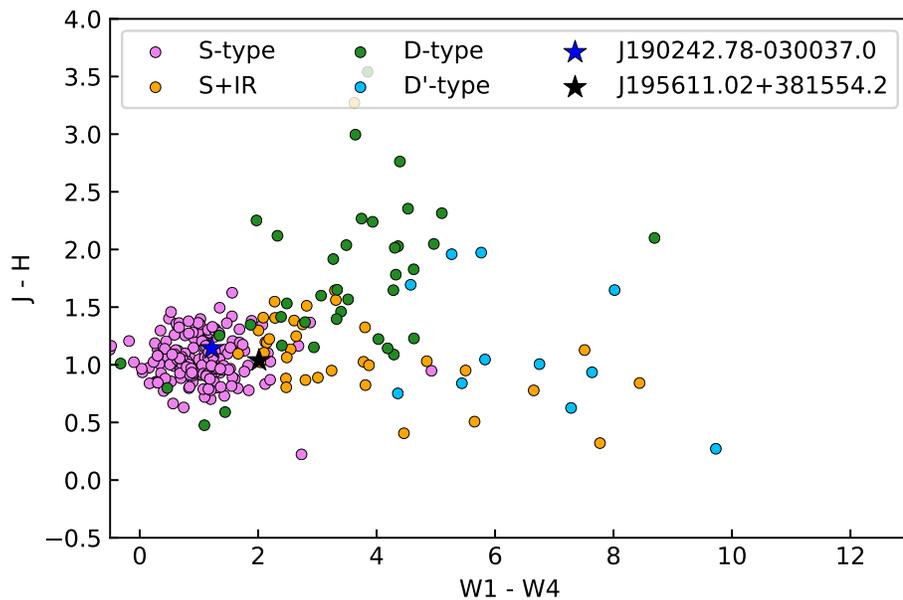


Figura 4.10: Diagrama diagnóstico $W1-W4$ vs $J-H$ que muestra los tipos de SySts. La muestra de simbióticas conocidas utilizada se muestra en la Tabla 4.1. La estrella color azul corresponde al candidato 13 de la Lista 2.1 y la estrella negra corresponde al candidato 2.

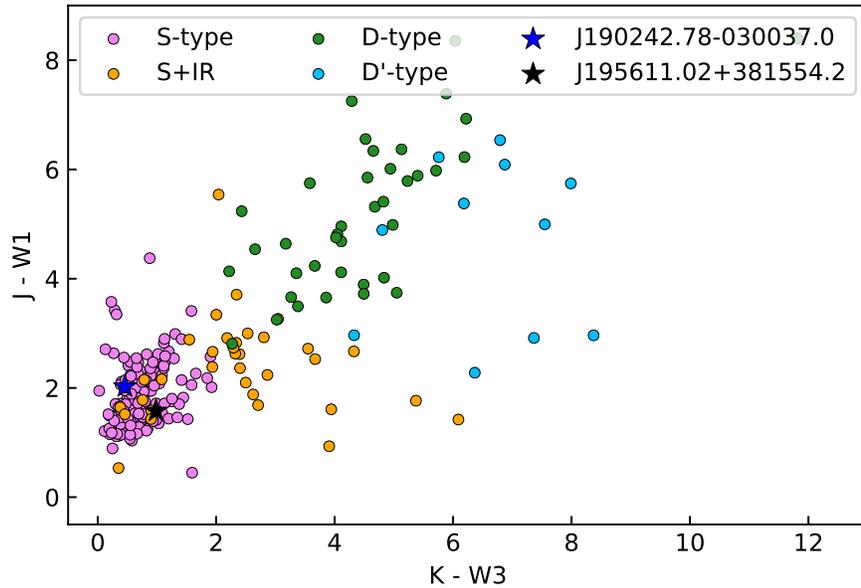


Figura 4.11: Diagrama diagnóstico $K-W3$ vs $J-W1$ que muestra los tipos de SySts. La muestra de simbióticas conocidas utilizada se muestra en la Tabla 4.1. La estrella color azul corresponde al candidato 13 de la Lista 2.1 y la estrella negra corresponde al candidato 2.

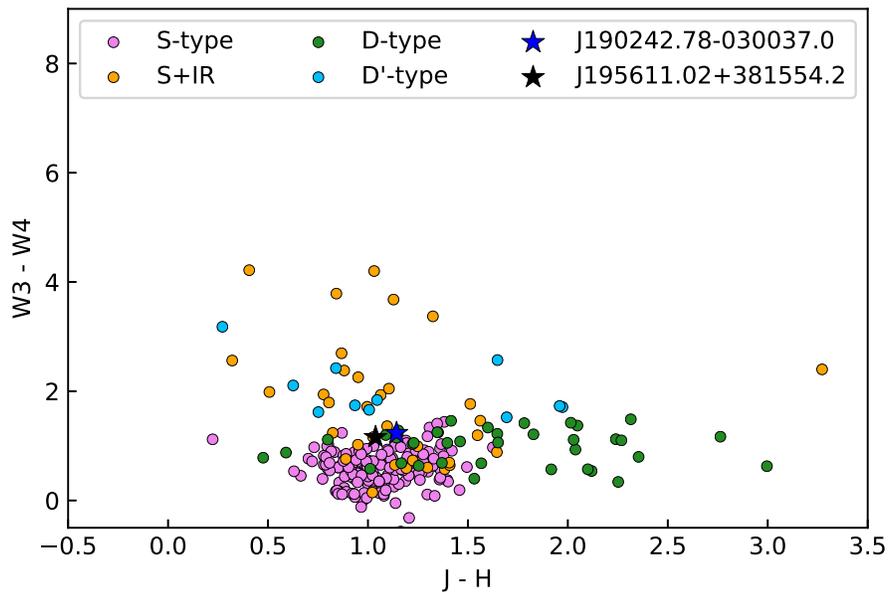


Figura 4.12: Diagrama diagnóstico $J-H$ vs $W3-W4$ que muestra los tipos de SySts. La muestra de simbióticas conocidas utilizada se muestra en la Tabla 4.1. La estrella color azul corresponde al candidato 13 de la Lista 2.1 y la estrella negra corresponde al candidato 2.

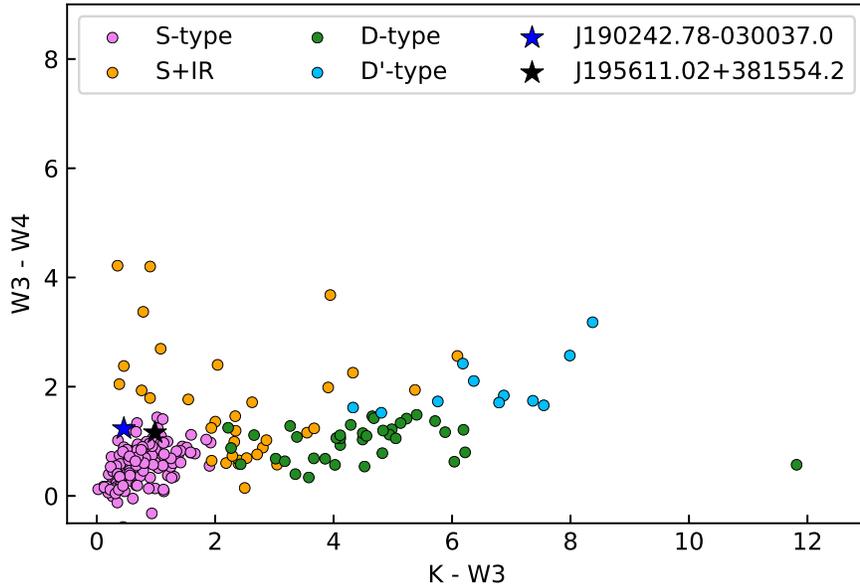


Figura 4.13: Diagrama diagnóstico $K-W3$ vs $W3-W4$ que muestra los tipos de SySts. La muestra de simbióticas conocidas utilizada se muestra en la Tabla 4.1. La estrella color azul corresponde al candidato 13 de la Lista 2.1 y la estrella negra corresponde al candidato 2.

La SED de IPHAS J060305.49+271433.1 está indicada en la figura 4.21-arriba. El ajuste (4.21-abajo) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}=4250$ K, $\log g=2$ y $\log(L_{\text{bol}})=2.66L_{\odot}$. El objeto, con una extinción visual $A_v=1.30$ mag, está localizado a una distancia fotogeométrica de $2.9^{+0.16}_{-0.16}$ kpc.

9. IPHAS J194624.35+314518.9:

Finalmente, la SED de este objeto se presenta en la figura 4.20-arriba. Este objeto presenta una clara componente secundaria o joroba (visible a partir de $10\mu\text{m}$) indicando la presencia de polvo circundante. Siguiendo el mismo proceso derivamos las siguientes características. El ajuste (4.20-abajo) indica una temperatura efectiva $T_{\text{eff}}=8500$ K, $\log g=2.5$, $\log(L_{\text{bol}})=2.48L_{\odot}$. La extinción visual es de $A_v=2.6$ mag, y el objeto está localizado a una distancia geométrica de $8.1^{+3.5}_{-1.9}$ kpc.

Los resultados conjuntos relativos a la posición de los objetos en el diagrama H-R se muestran en la Figura 4.23.

- Después del análisis de sus SEDs, observamos que la mayor parte de los objetos cuyos espectros no tienen las características espectrales de una simbiótica son fríos y asociados a Gigantes

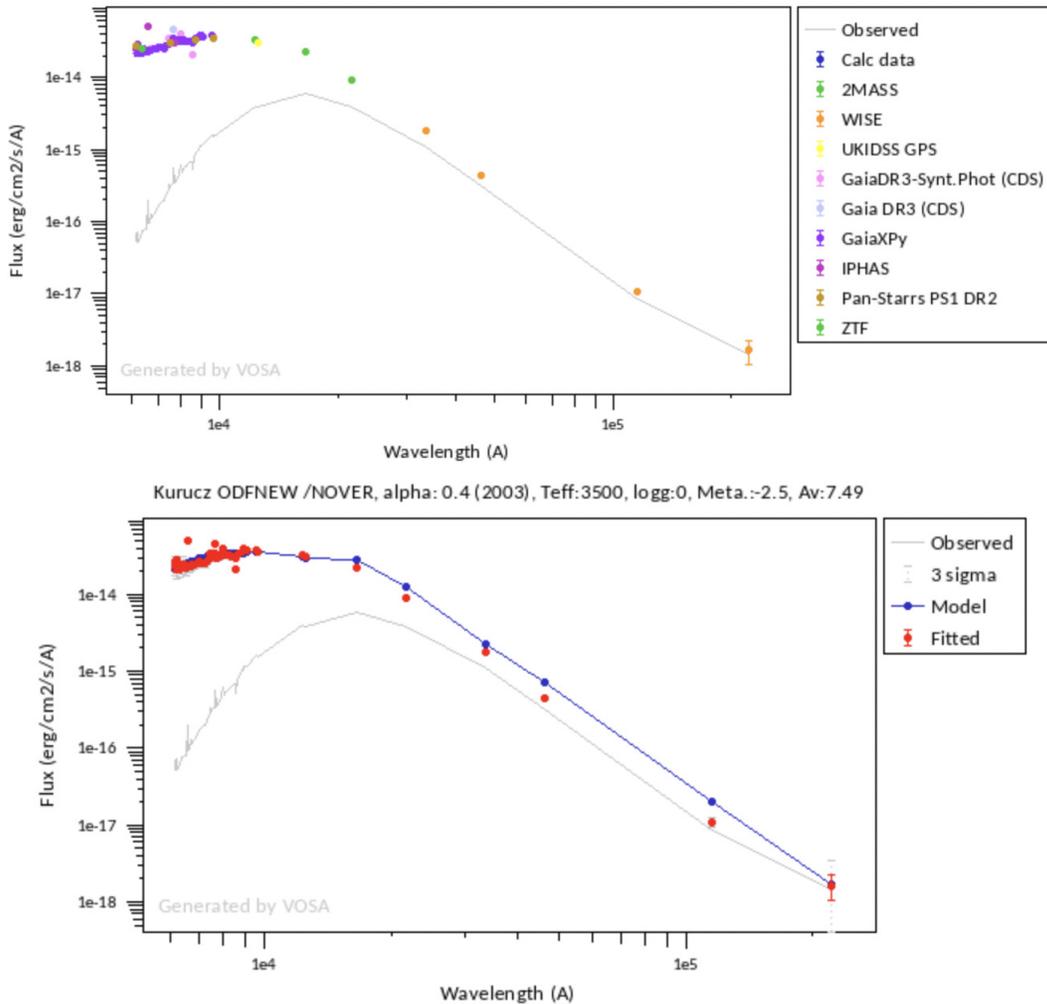


Figura 4.14: Modelo del candidato No.1 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

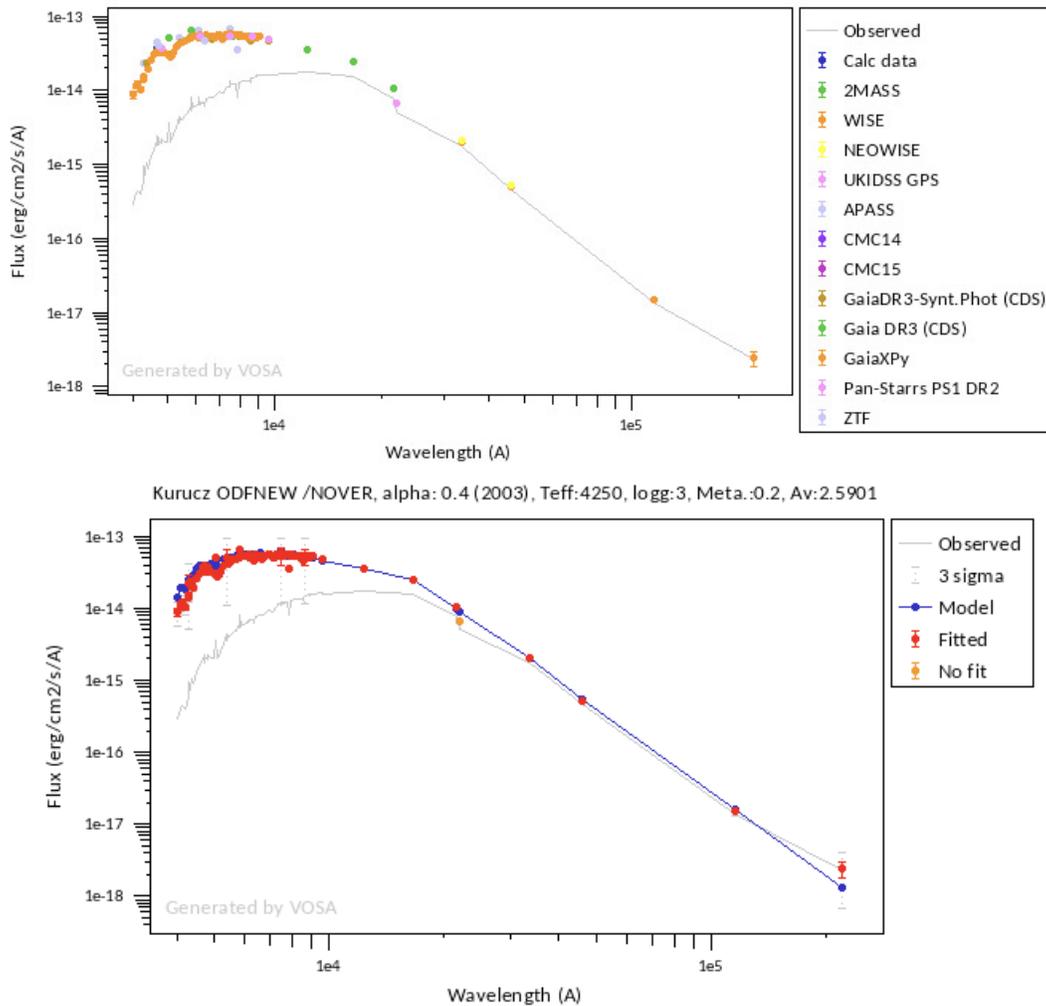


Figura 4.15: Modelo del candidato No.3 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

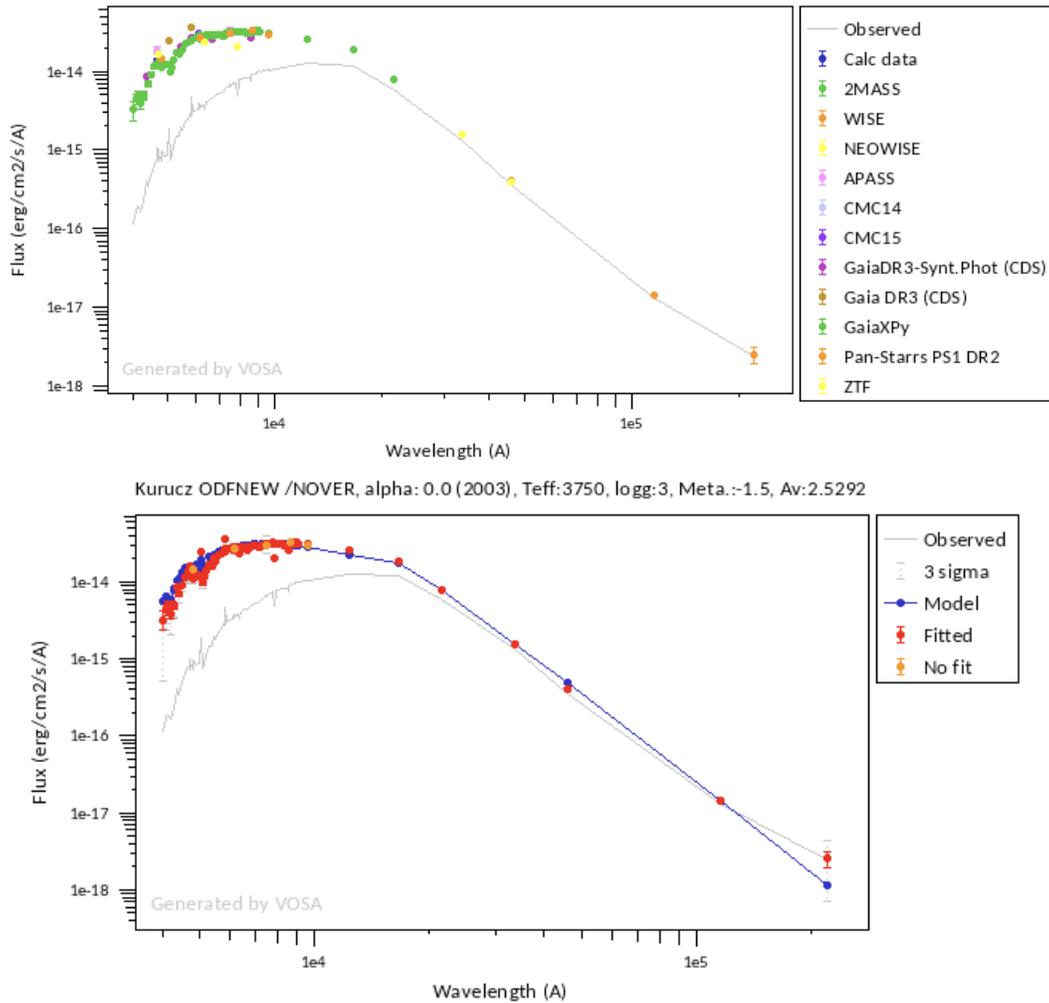


Figura 4.16: Modelo del candidato No.6 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

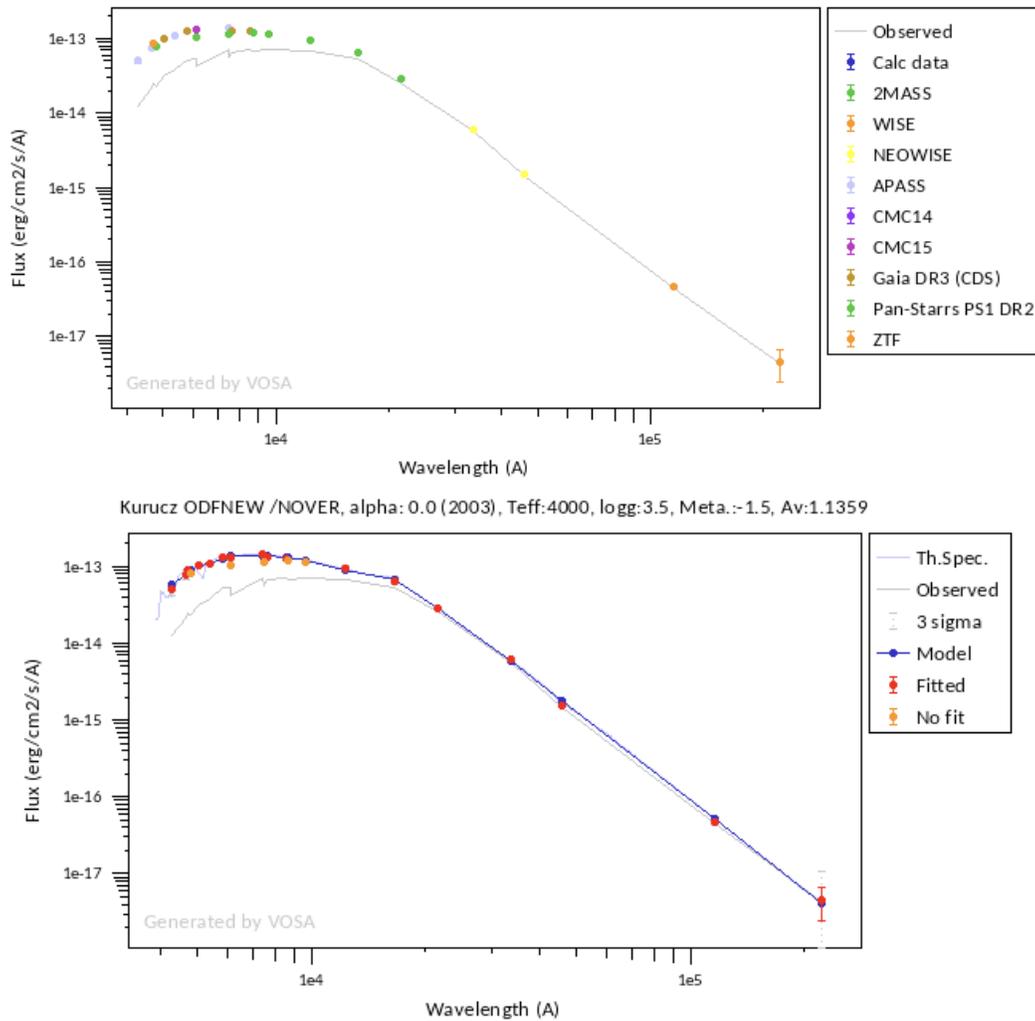


Figura 4.17: Modelo del candidato No.9 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

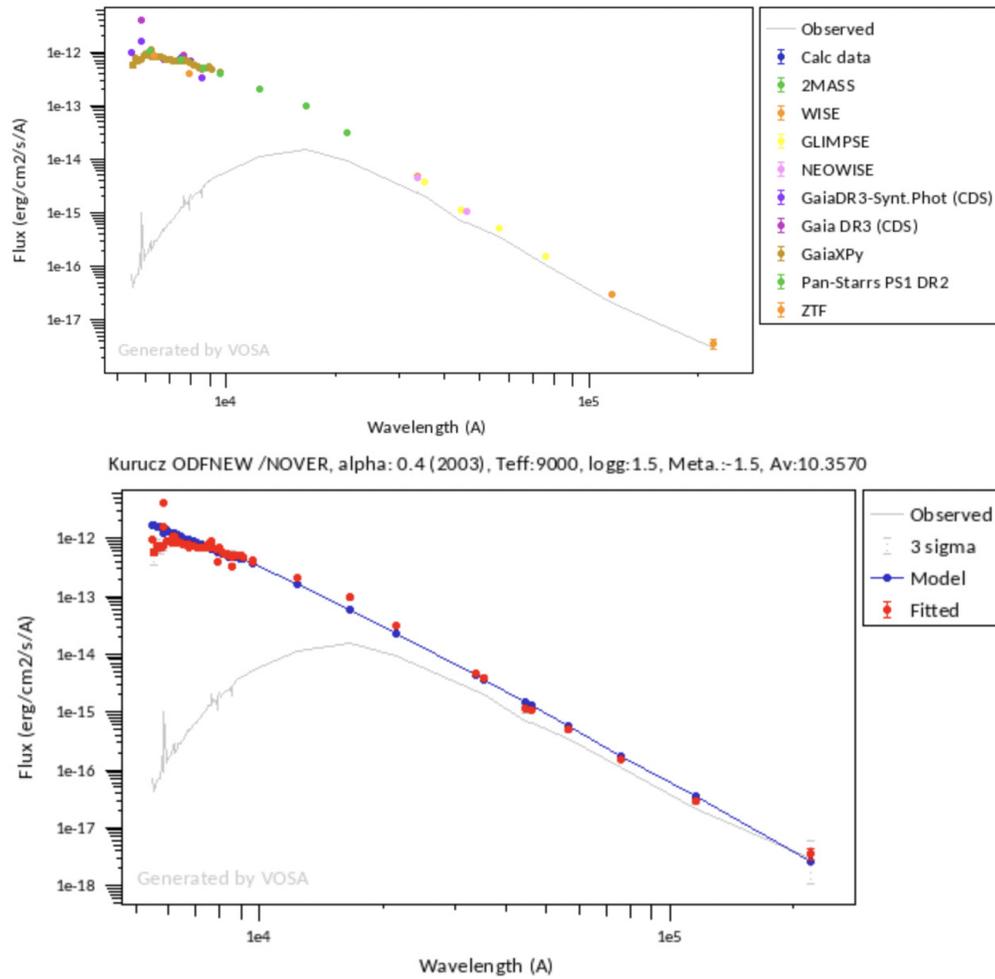


Figura 4.18: Modelo del candidato No.12 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

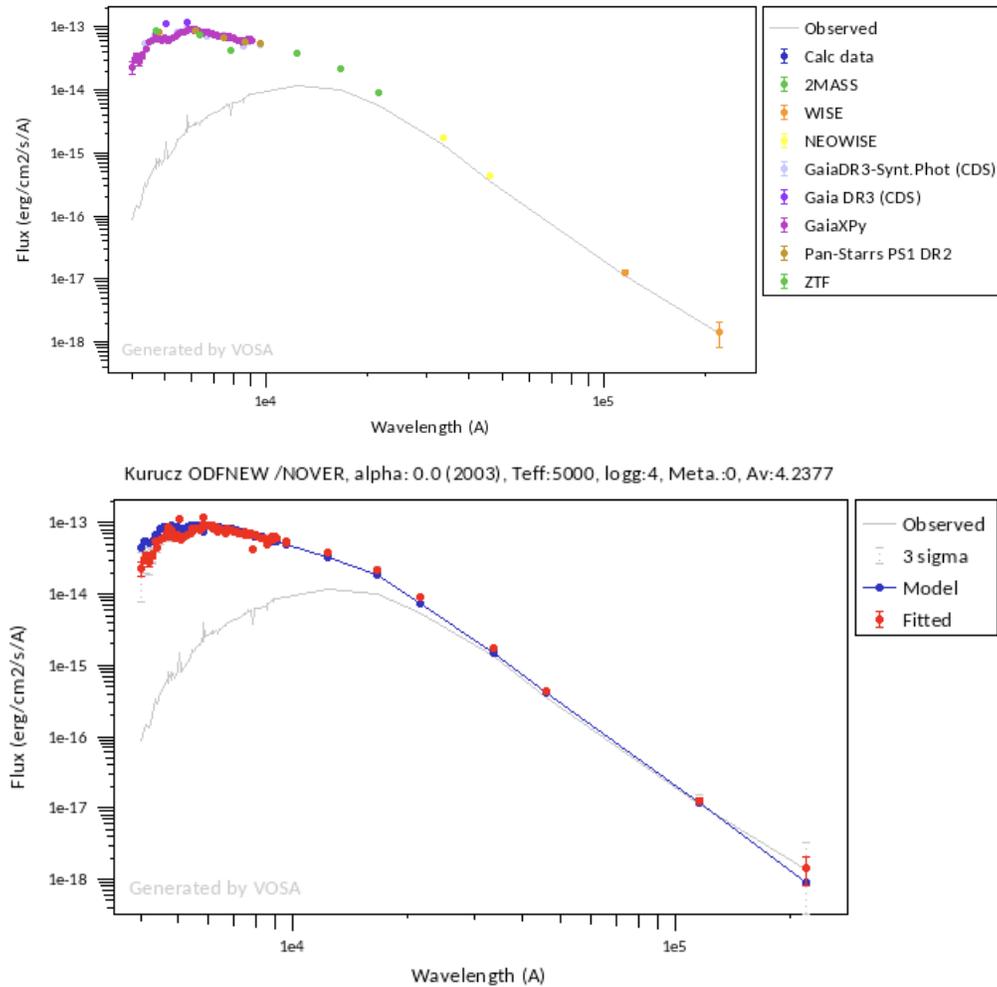


Figura 4.19: Modelo del candidato No.14 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

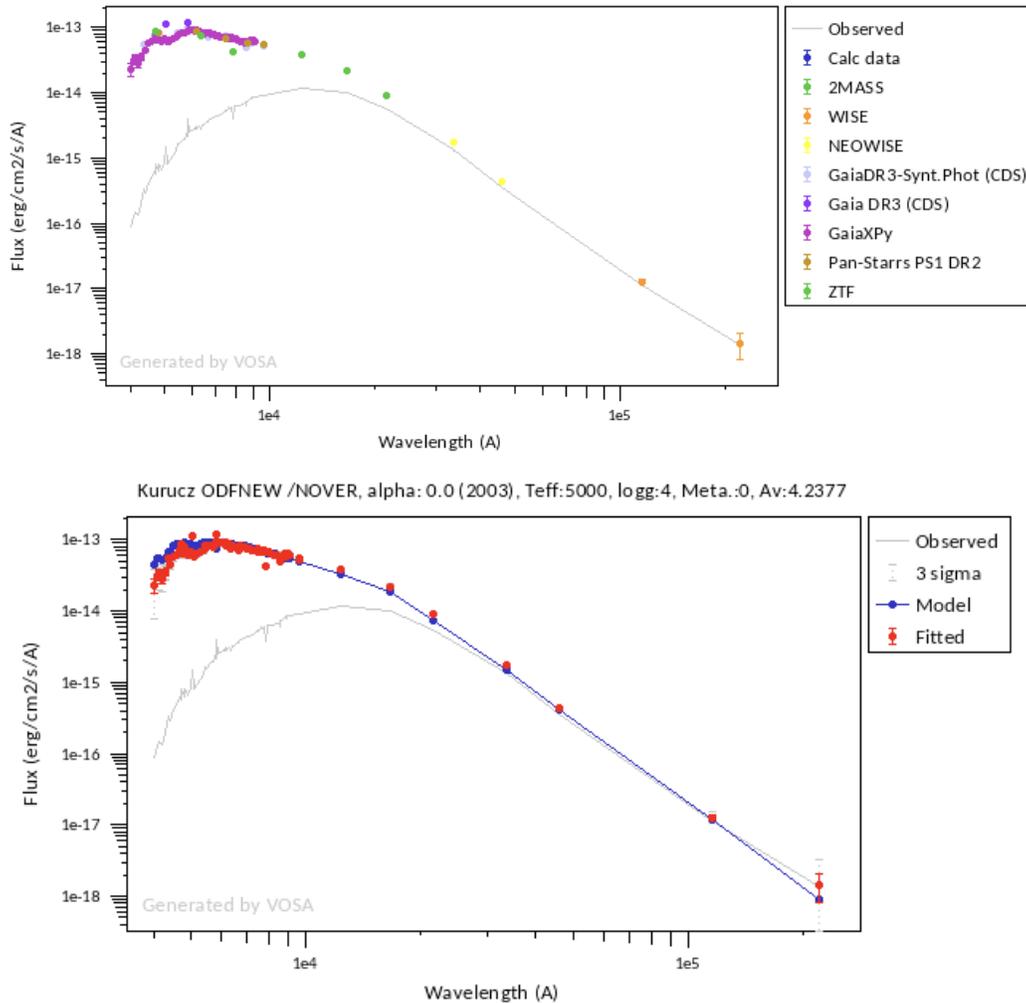


Figura 4.20: Modelo del candidato No.18 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

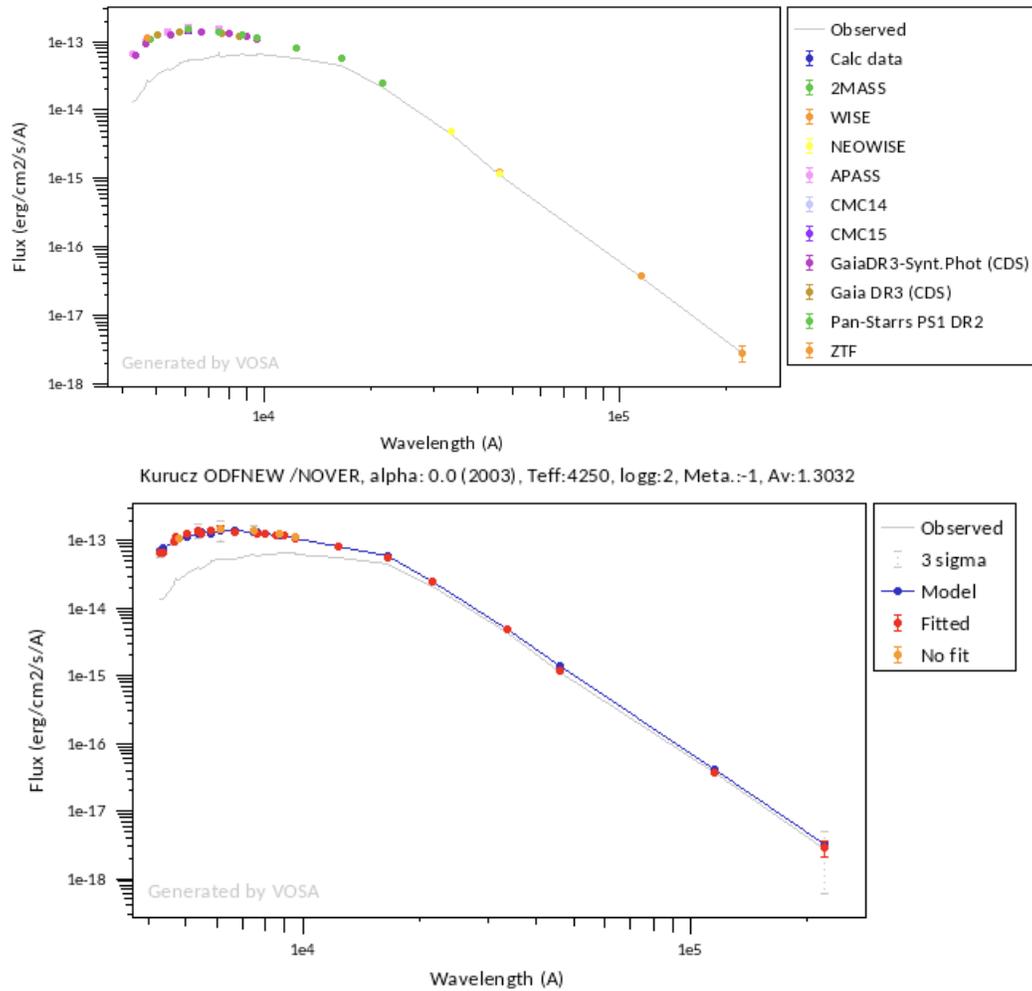


Figura 4.21: Modelo del candidato No.19 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

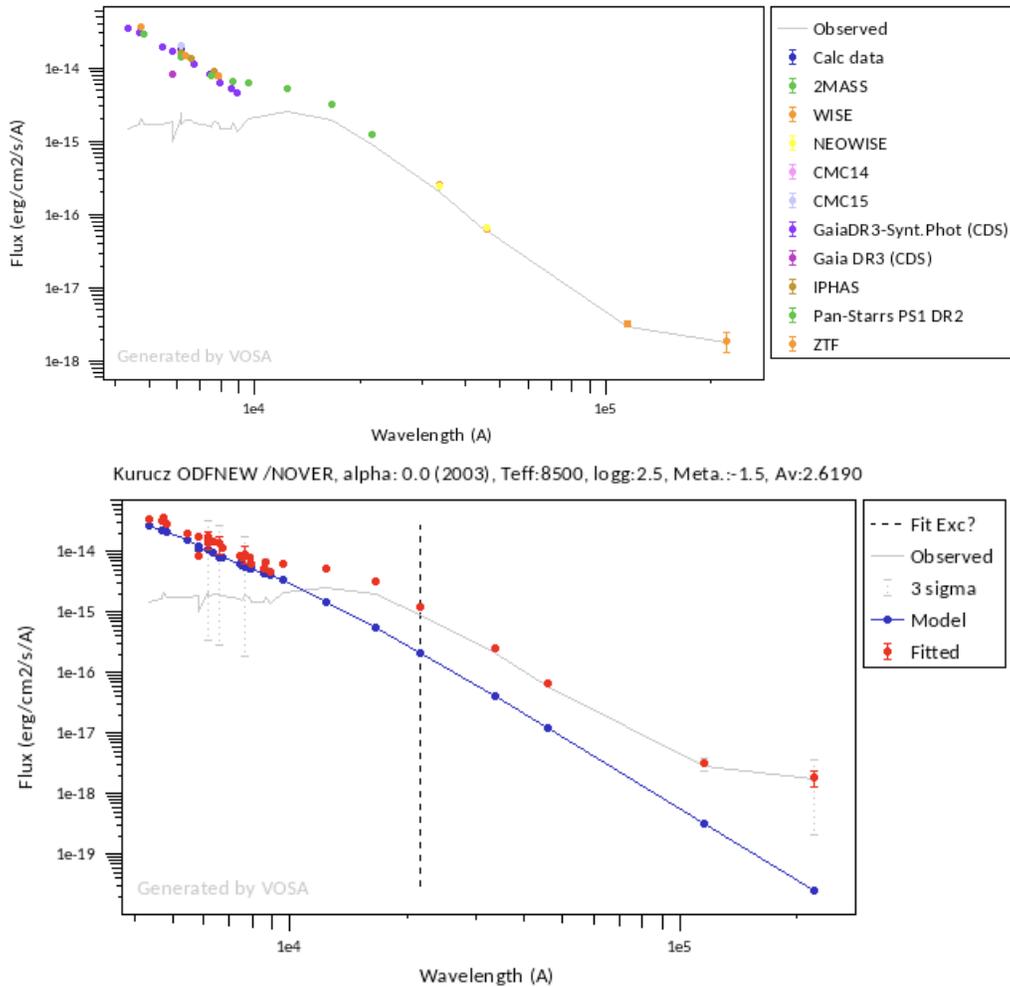


Figura 4.22: Modelo del candidato No.21 (Tabla 2.1) realizado en VOSA (Bayo et al., 2008). Arriba: SED construido a partir de datos fotométricos de los catálogos de VOSA. Abajo: modelo del mejor ajuste con el flujo total observado.

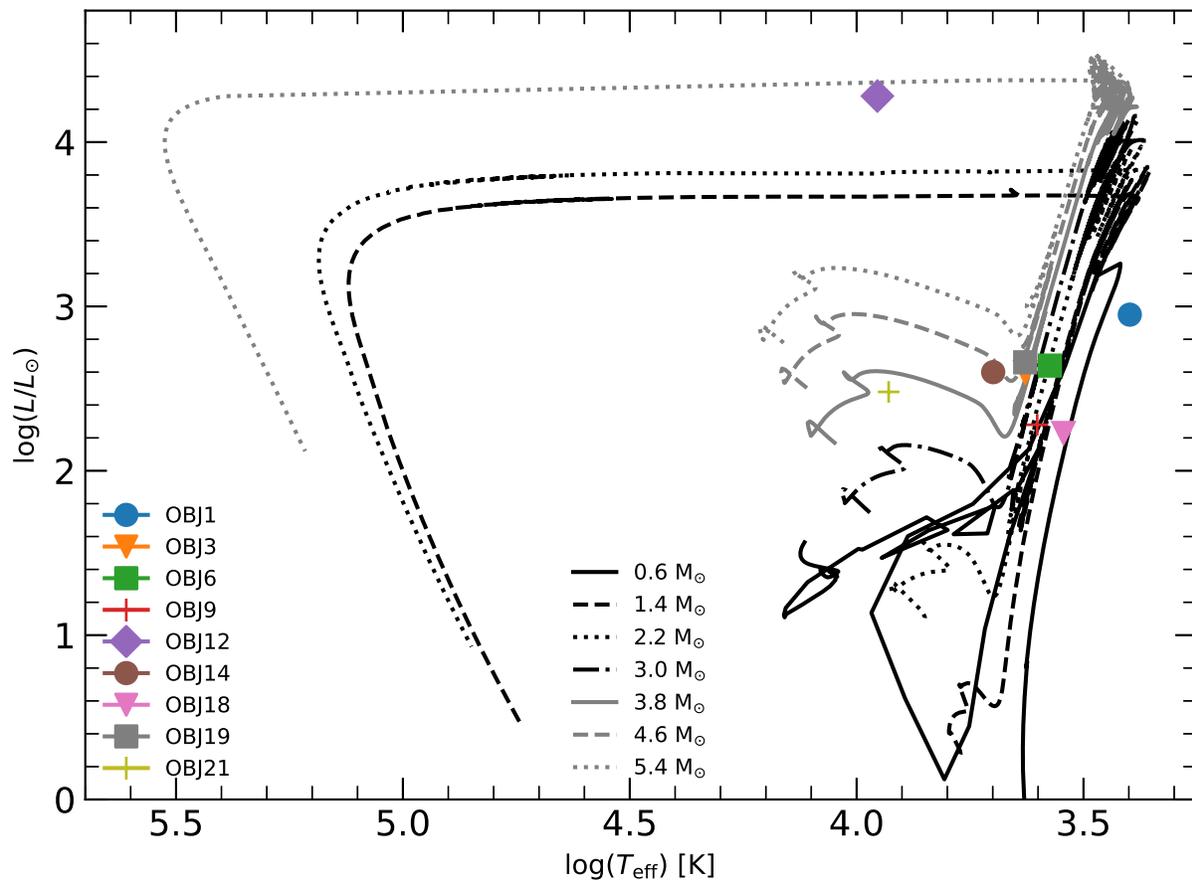


Figura 4.23: Posición de los objetos analizados en un diagrama H-R general (i.e con una metalicidad fija) realizado con MIST. Se nota que la mayor parte de los objetos están en las ramas de las gigantes y uno está en la secuencia post-AGB (obj 12).

Rojas. Estos resultados concuerdan con los espectros de los objetos 18 y 19 donde se puede apreciar las bandas de TiO a $\simeq 6200 \text{ \AA}$ y 6650 \AA . En un caso tenemos un estado evolucionado un poco más avanzados i.e. una post-AGB. La presencia de esas Gigantes en nuestra muestra no es inaudita y concuerda con el diagrama de Akras et al. (2021) presentado en la figura 2.2. En efecto, las gigantes de tipo K, M, las Miras y post-AGBs ocupan en gran parte la misma área que las estrellas simbióticas sin estar en el locus.

Capítulo 5

Conclusiones

Las estrellas simbióticas son un sistema de dos componentes: una gigante roja fría y su compañera enana blanca caliente que interactúan a través de intercambio de masa. Sus características principales son largos períodos orbitales, transferencia de masa, formación de discos de acreción, formación de chorros, emisión de rayos X y son buenas candidatas a ser progenitoras de Supernovas de tipo Ia. En la actualidad se han encontrado 275 SySts Galácticas, sin embargo, los modelos de evolución estelar predicen de 3000 a 400,000 (Kenyon, 1986) SySts en la Galaxia, lo cual nos indica que existe un problema de censo.

Para solucionar este problema se buscaron nuevos candidatos a SySts a través de los censos IGAPS y SDSS usando criterios fotométricos característicos de este tipo de estrellas. Se utilizaron diferentes métodos de minería de datos (data mining) vía diferentes herramientas para identificar esos candidatos también haciendo uso de censos en el infrarrojo (WISE y 2MASS). Después de este proceso de selección se encontraron 598 candidatos nuevos únicos de los cuales clasificamos 21 como más probables debido a que aparecen como candidatos en tres diferentes procesos de selección.

Para confirmar la naturaleza de los candidatos se procedió a realizar observaciones espectroscópicas en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (B.C., México) con el instrumento Boller & Chivens. Se realizaron las observaciones de 11 candidatos (las condiciones meteorológicas impidieron completar la muestra de 21). Después de la reducción de datos se procedió a realizar el análisis de cada espectro buscando las líneas características de las SySts: las líneas dispersadas de Raman de OVI a 6830 y 7088 Å, las bandas moleculares de TiO están asociadas a la presencia de una gigante roja (rango de 7053, 7589, 8206, y 8432 Å), las líneas asociadas a la presencia de la enana blanca ($H\alpha$, [O III] 4363/5007 Å, He II 4686 Å y OVI 6830 Å). Y otras líneas como $H\beta$, OI 8446 Å, HeI 5875, 6678, 7065, y 7281 Å, [NII] 6583, 7065, y 7281 Å, [Ne III] 3869 Å, [FeVII] 5720 Å y [CaV] 6086 Å.

Al final se logró identificar dos nuevas estrellas simbióticas: IPHAS J190242.78-030037.0 cu-

yas características espectrales son muy claras y permiten una clasificación sin ambigüedad como simbiótica. IPHAS J195611.02+381554.2 tiene algunas líneas características como las líneas de Raman pero es deficiente en Hidrógeno (líneas de Balmer presentan un flujo débil). Este comportamiento podría estar asociado con la presencia de una nebulosa externa teniendo una emisión (y una contribución) más importante en estas líneas que se habría restado durante el proceso de reducción de datos. La otra hipótesis, que adoptamos, es que **este objeto pertenece a una población de simbióticas “ocultas” donde la falta de Hidrógeno (y la debilidad del resto de las líneas) está relacionado con la ausencia de quemado (*Shell burning*) en el cascarón de la enana blanca.** Es interesante notar que el método de búsqueda de la presente investigación llevo a la detección de tal objeto.

Un punto interesante es la posición en los diagramas diagnóstico color-color de esos dos objetos. En efecto caen exactamente en el locus de la distribución de simbióticas de tipo estelar (S-type), que es el tipo asociado a los dos objetos.

El resto de los objetos de la muestra analizados espectroscópicamente no presentan ni el patrón de continuo o las líneas asociado a SySts. Para determinar su naturaleza usamos VOSA para analizar sus SEDs y posicionarlos en un diagrama H-R. Identificamos que la mayor parte de los objetos detectados son fríos con temperaturas efectivas hasta 9000 K y combinado con sus luminosidades indican en general gigantes rojas o estrella post-AGB. Está clasificación concuerda con el diagrama diagnóstico de Akras et al. (2021) donde esos objetos (Gigantes de tipo K, M, Miras, post-AGB) tienen una distribución más dispersa solapando la población de simbióticas.

Esto nos lleva entonces a la conclusión que los diagramas diagnóstico usando datos en el infrarrojo (aún permitiendo la detección de SySts *bona fide*) deben ser combinados con datos en bandas más azules (i.e. UV) para discriminar las gigantes. Sondeos de cielo como el Galaxy Evolution Explorer (GALEX)¹; y el futuro (lanzamiento ~ 2027) Ultraviolet Explorer (UVEX)², con una cobertura más amplia, serán de mucha utilidad. A demás se podría usar un método espectroscópico con diagramas de diagnóstico BPT (llamados así por los autores "Baldwin, Philips y Terlevich"; Baldwin et al. (1981)) en lugar de DDCC los cuales involucran cocientes de intensidades de líneas de emisión. Las diferentes regiones dentro de los diagramas BPT permiten diferenciar entre grupos de objetos. Otro método útil puede ser el de imagen enfocada. Estas se realizan con filtros estrechos y para este caso se podrían utilizar las bandas de Raman de J-PLUS³ (Javalambre Photometric Local Universe Survey) debido a que en particular las SySts son la única clase conocida de objetos astronómicos que muestran las líneas dispersadas de Raman.

¹<https://archive.stsci.edu/missions-and-data/galex>

²<https://uvex2023.caltech.edu/>

³<https://www.j-plus.es/proyecto/proyecto>

La búsqueda de nuevas SySts, vía la explotación de bases de datos grandes (“*Big Data*”) procedentes de Sondeos de cielo a múltiples longitudes de onda, tiene entonces mucho futuro.

Capítulo 6

Trabajos a futuro

Como resultado de haber hallado varias posibles estrellas simbióticas, se ha proyectado llevar a cabo diversos proyectos (a corto y largo plazo) con el fin de seguir investigando el tema.

1. Continuación de la identificación espectroscópica utilizando el OAN/B&Ch y el GTC/OSIRIS (temporada 23B).
 - * Se envió una propuesta al OAN para observar con el telescopio de 2.1 m con el espectrógrafo Boller & Chivens en la temporada 23B con las mismas configuraciones utilizadas para las observaciones que se presentan en este trabajo (ver Tabla 3.1). Se pretende observar candidatos encontrados en este proyecto los cuales cumplen con las tres condiciones de selección de Akras et al. (2021) y su magnitud es menor a 16mag en el filtro r' del survey IGAPS
 - * Una propuesta a sido enviada para la temporada 2023B en el 10.4m Gran Telescopio CANARIAS (GTC, La Palma) con el espectrógrafo OSIRIS. Se propuso observar candidatos a SySts con magnitudes mayores a 16mag en el filtro r' del survey IGAPS.
2. Detección de emisión en rayos X de los candidatos utilizando los datos de eROSITA¹ (extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array) que serán públicos en Mayo del 2023.
3. Para mejorar los diagramas de diagnóstico se contemplará incluir datos en bandas más azules para discriminar la zona de recubrimiento entre las estrellas gigantes y las SySts. Se piensa usar sondeos de cielo como el Galaxy Evolution Explorer (GALEX); y el futuro Ultraviolet Explorer (UVEX, lanzamiento probable en ~2027) que permitirá una cobertura más amplia.

Las estrellas simbióticas que presenten características morfológicas, espectroscópicas (o cualquier otra) interesantes serán objeto de un estudio más detallado.

¹<https://www.mpe.mpg.de/eROSITA>

Referencias

- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., et al. 2009, *ApJs*, 182, 543, doi: 10.1088/0067-0049/182/2/543
- Akras, S., Gonçalves, D. R., Alvarez-Candal, A., & Pereira, C. B. 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502, 2513, doi: 10.1093/mnras/stab195
- Akras, S., Leal-Ferreira, M. L., Guzman-Ramirez, L., & Ramos-Larios, G. 2019, *MNRAS*, 483, 5077, doi: 10.1093/mnras/sty3359
- Allen, D. A. 1982, in *The Nature of Symbiotic Stars*, ed. M. Friedjung & R. Viotti (Dordrecht: Springer Netherlands), 27–42
- Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., Demleitner, M., & Andrae, R. 2021, *ApJ*, 161, 147, doi: 10.3847/1538-3881/abd806
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, *PASP*, 93, 5, doi: 10.1086/130766
- Bayo, A., Rodrigo, C., Barrado Y Navascués, D., et al. 2008, *A&A*, 492, 277, doi: 10.1051/0004-6361:200810395
- Castelli, F., & Kurucz, R. L. 2003, in *Modelling of Stellar Atmospheres*, ed. N. Piskunov, W. W. Weiss, & D. F. Gray, Vol. 210, A20, doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/0405087
- Choi, J., Dotter, A., Conroy, C., et al. 2016, *ApJ*, 823, 102, doi: 10.3847/0004-637X/823/2/102
- Corradi, R. L. M., Rodríguez-Flores, E. R., Mampaso, A., et al. 2008, *A&A*, 480, 409, doi: 10.1051/0004-6361:20078989
- Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., et al. 2003, *VizieR Online Data Catalog*, II/246
- Cutri, R. M., Wright, E. L., Conrow, T., et al. 2021, *VizieR Online Data Catalog*, II/328
- Kenyon, S. J. 1986, *The Symbiotic Stars*, Cambridge Astrophysics (Cambridge University Press), doi: 10.1017/CB09780511586071

- LeBlanc, F. 2010, *An Introduction to Stellar Astrophysics*, 1st edn. (John Wiley and Sons, Ltd.)
- Leedjårv, L. 2002, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 261, *The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, ed. B. T. Gänsicke, K. Beuermann, & K. Reinsch, 353
- Luna, G. J. M., Sokoloski, J. L., Mukai, K., & Nelson, T. 2013, *A&A*, 559, A6, doi: 10.1051/0004-6361/201220792
- Merc, J., Gális, R., & Wolf, M. 2019a, *Astronomische Nachrichten*, 340, 598, doi: 10.1002/asna.201913662
- . 2019b, *Astronomische Nachrichten*, 340, 598, doi: 10.1002/asna.201913662
- Mukai, K., Luna, G. J. M., Cusumano, G., et al. 2016, *MNRAS*, 461, L1, doi: 10.1093/mnras/1slw087
- Munari, U. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1909.01389. <https://arxiv.org/abs/1909.01389>
- Munari, U., Traven, G., Masetti, N., et al. 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 6121, doi: 10.1093/mnras/stab1620
- Parker, Q. A., Bojičić, I. S., & Frew, D. J. 2016, in *Journal of Physics Conference Series*, Vol. 728, *Journal of Physics Conference Series*, 032008, doi: 10.1088/1742-6596/728/3/032008
- Pols, O. R. 2011, *Stellar Structure and Evolution*, 1st edn. (Astronomical Institute Utrecht)
- Rodríguez-Flores, E. R., Corradi, R. L. M., Mampaso, A., et al. 2014, *A&A*, 567, A49, doi: 10.1051/0004-6361/201323182
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525, doi: 10.1086/305772
- Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., et al. 2000, *A&A*, 143, 9, doi: 10.1051/aas:200033210.48550/arXiv.astro-ph/0002110
- Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. 2010, *ApJ*, 140, 1868, doi: 10.1088/0004-6256/140/6/1868
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, John E., J., et al. 2000, *ApJ*, 120, 1579, doi: 10.1086/301513

Apéndice A

Mapas de identificación de IPHAS de los 21 candidatos a SySts

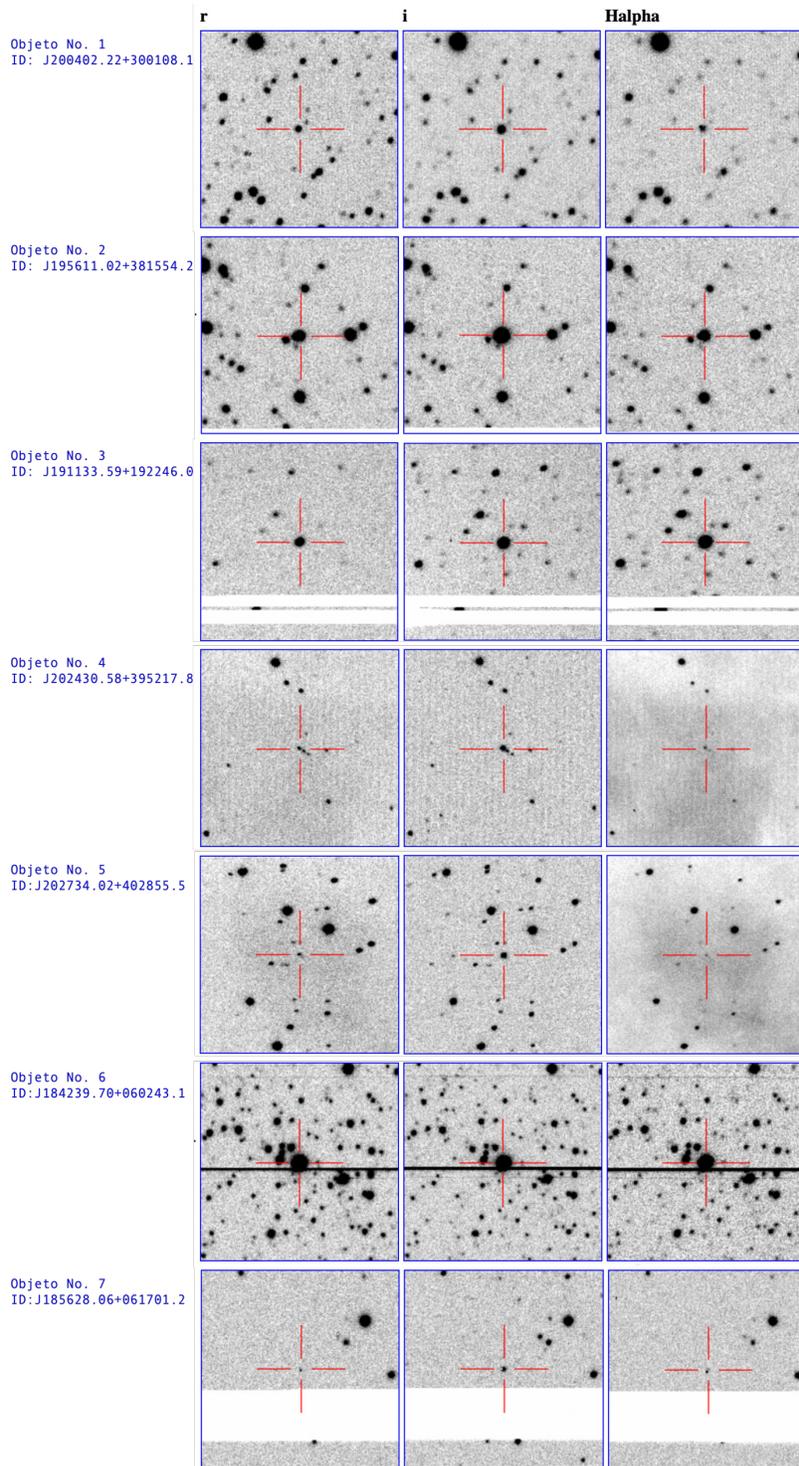


Figura A.1: Imágenes obtenidas con IPHAS en los filtros r' , i' y $H\alpha$ de los primeros 7 objetos de la lista de candidatos a estrellas simbióticas que fueron detectados durante el proceso de minería y cruce de bases datos.

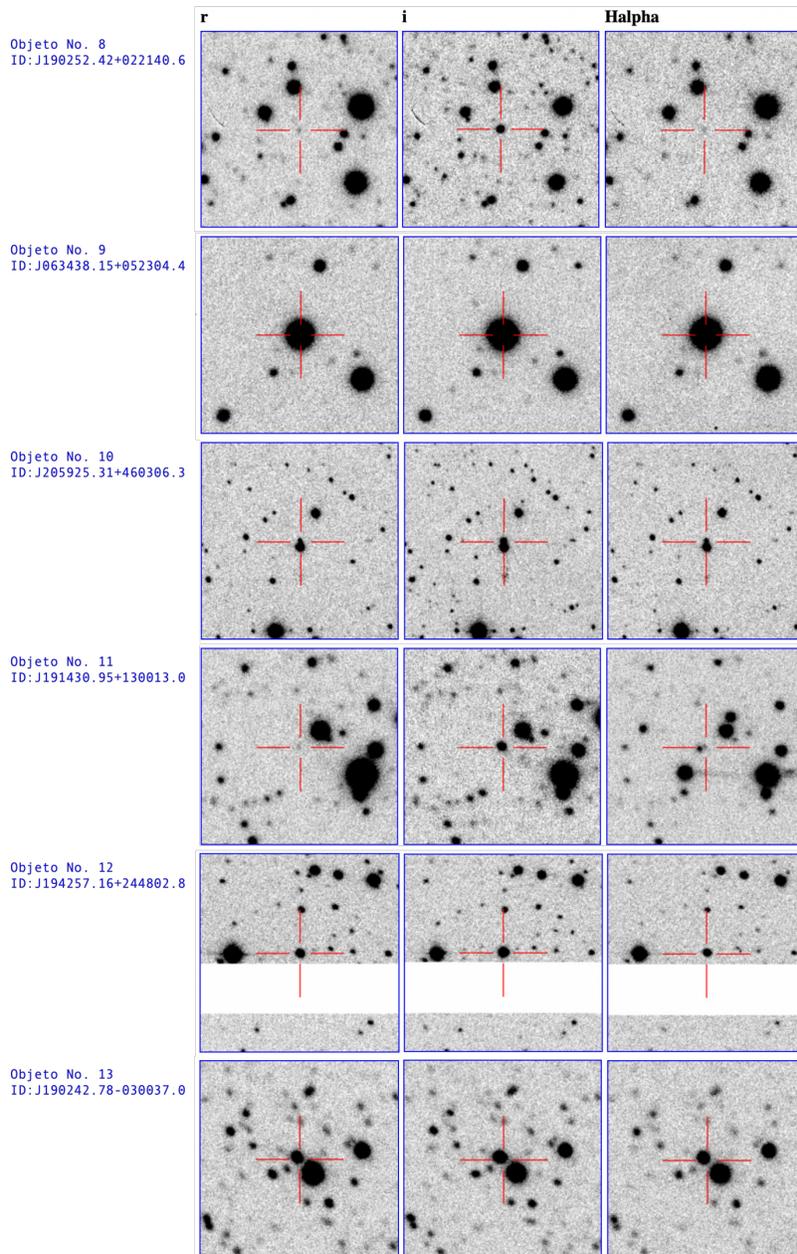


Figura A.2: Imágenes obtenidas con IPHAS en los filtros r' , i' y $H\alpha$ del objeto #9 al #13 de la lista de candidatos a estrellas simbióticas que fueron detectados durante el proceso de minería y cruce de bases de datos.

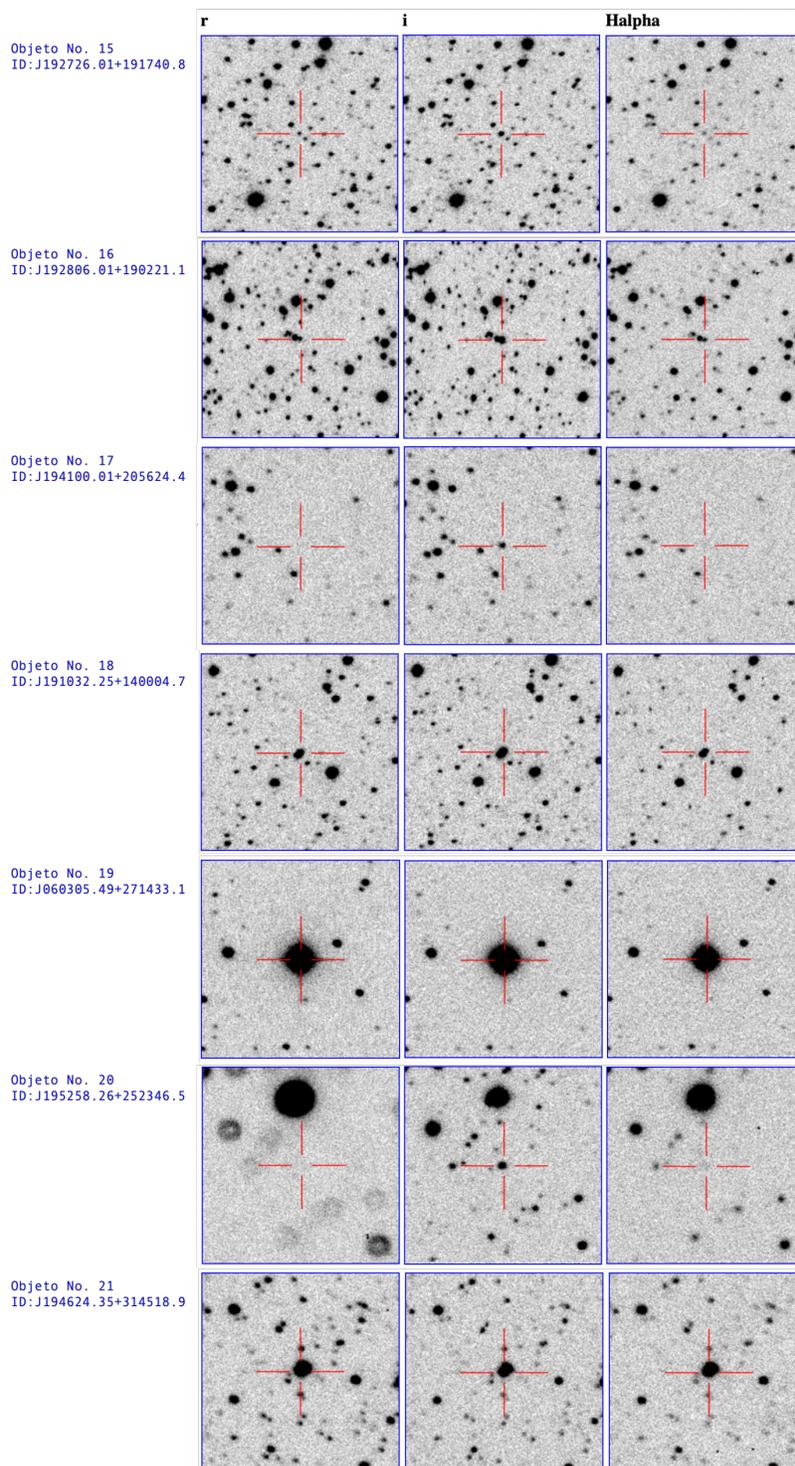


Figura A.3: Imágenes obtenidas con IPHAS en los filtros r' , i' y $H\alpha$ del objeto #15 al #21 de la lista de candidatos a estrellas simbióticas que fueron detectados durante el proceso de minería y cruce de bases datos.

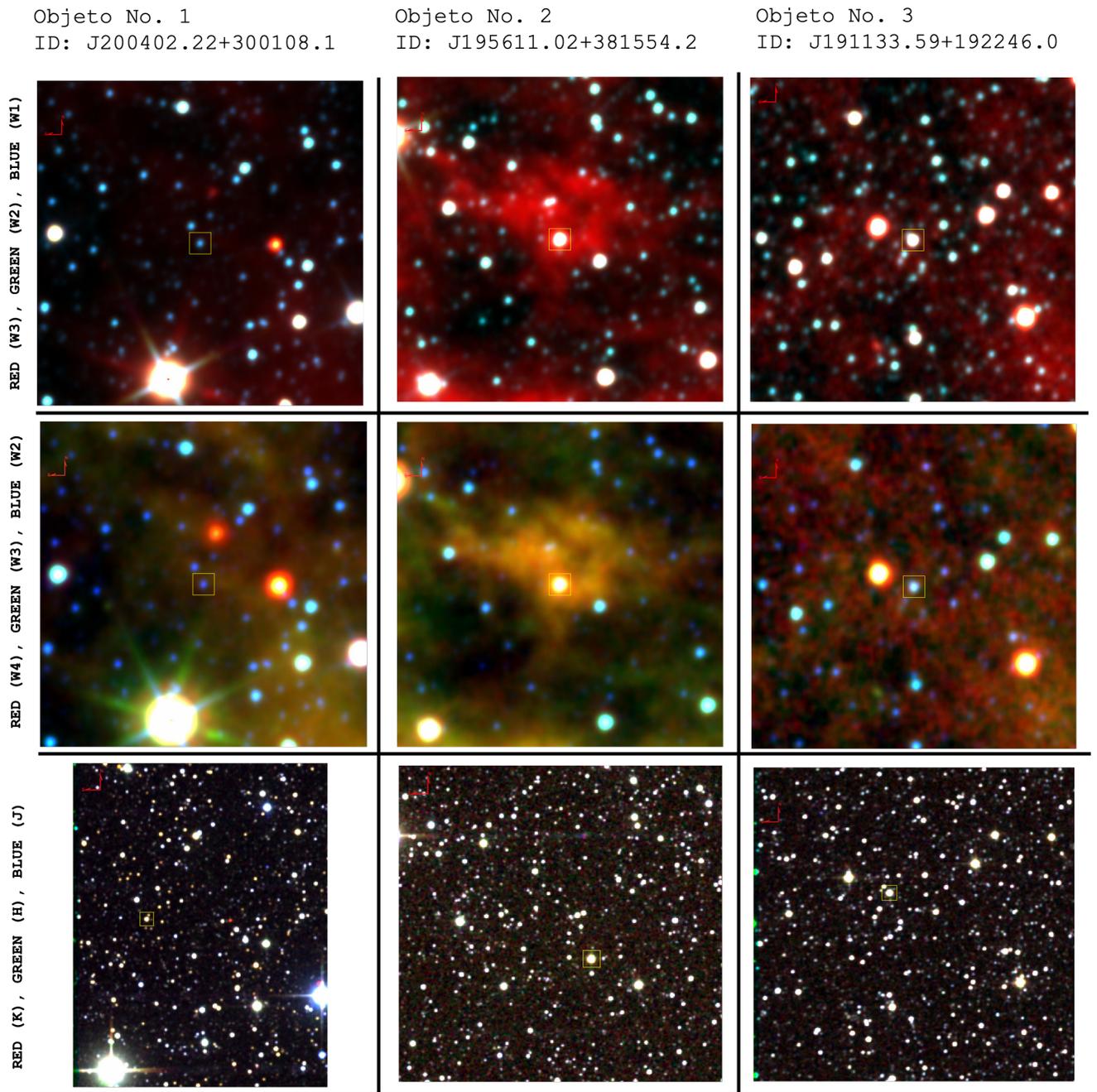


Figura A.4: Imágenes RGB de los candidatos a SySts obtenidas de IRSA con las bandas de WISE y 2MASS con un tamaño de $500''$ del #1 al #3 de la lista de 21 candidatos a estrellas simbióticas.

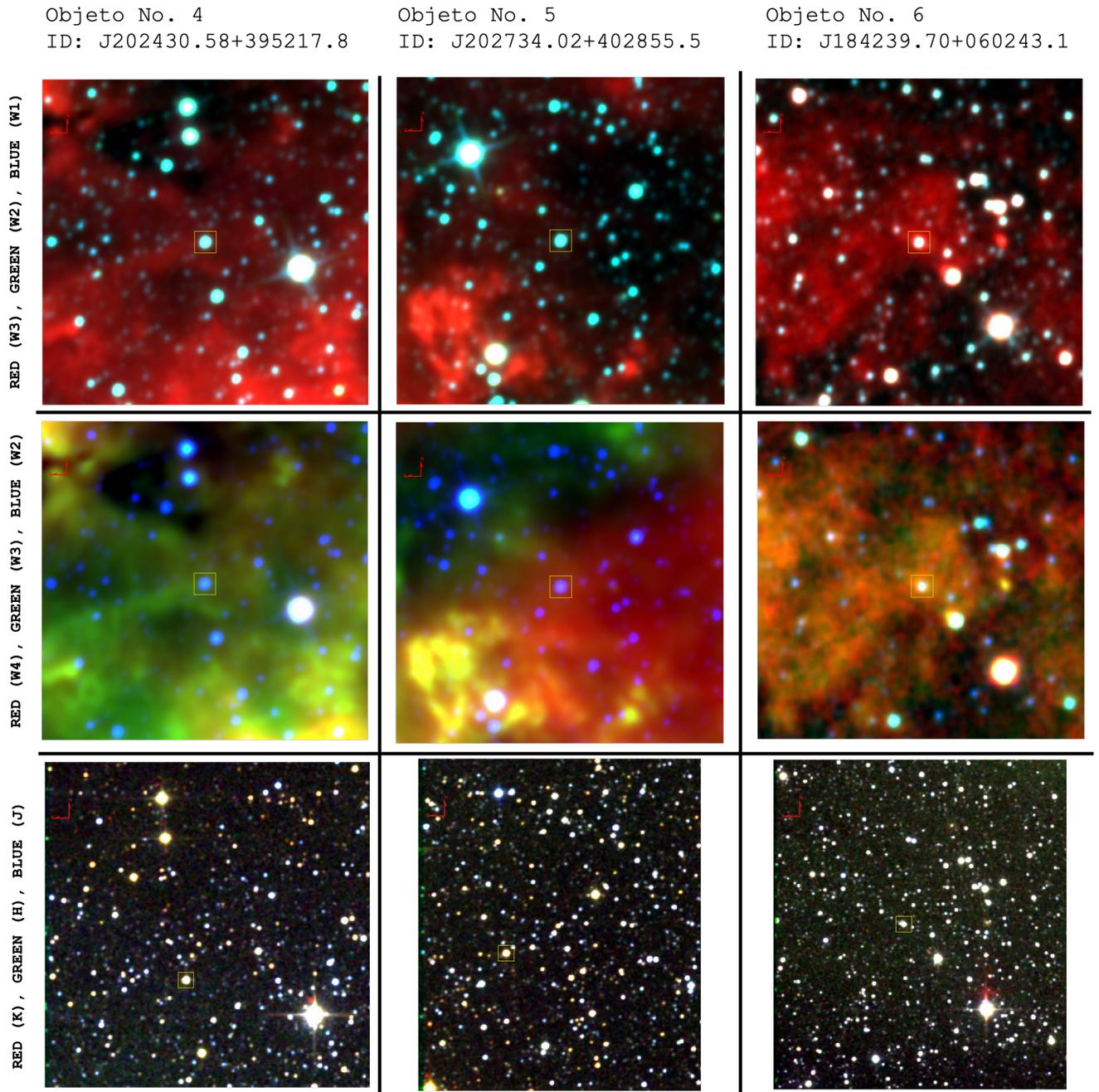


Figura A.5: Imágenes RGB de los candidatos a SySts obtenidas de IRSA con las bandas de WISE y 2MASS con un tamaño de $500''$ del #4 al #6 de la lista de 21 candidatos a estrellas simbióticas.

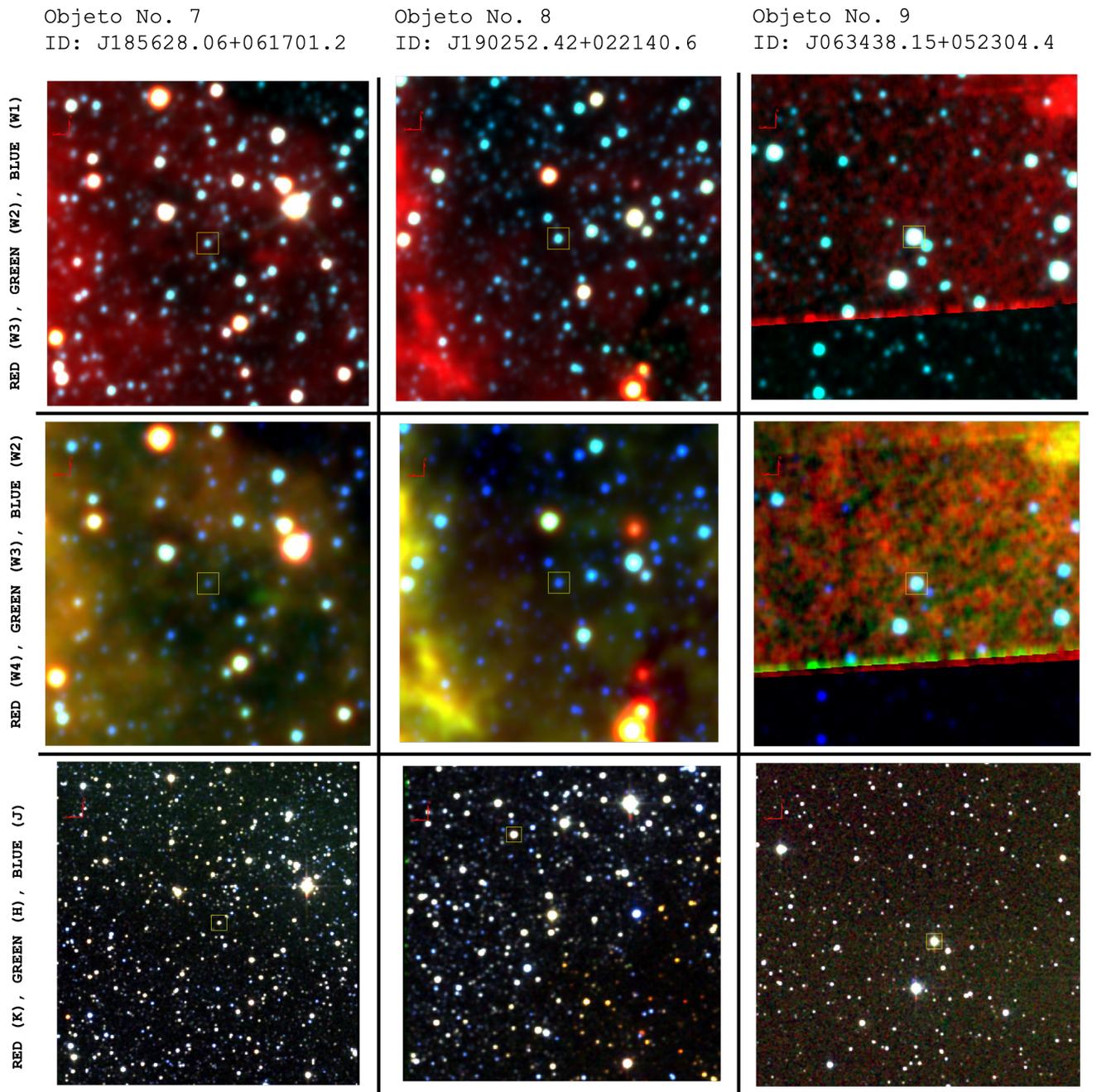


Figura A.6: Imágenes RGB de los candidatos a SySts obtenidas de IRSA con las bandas de WISE y 2MASS con un tamaño de $500''$ del #7 al #9 de la lista de 21 candidatos a estrellas simbióticas.

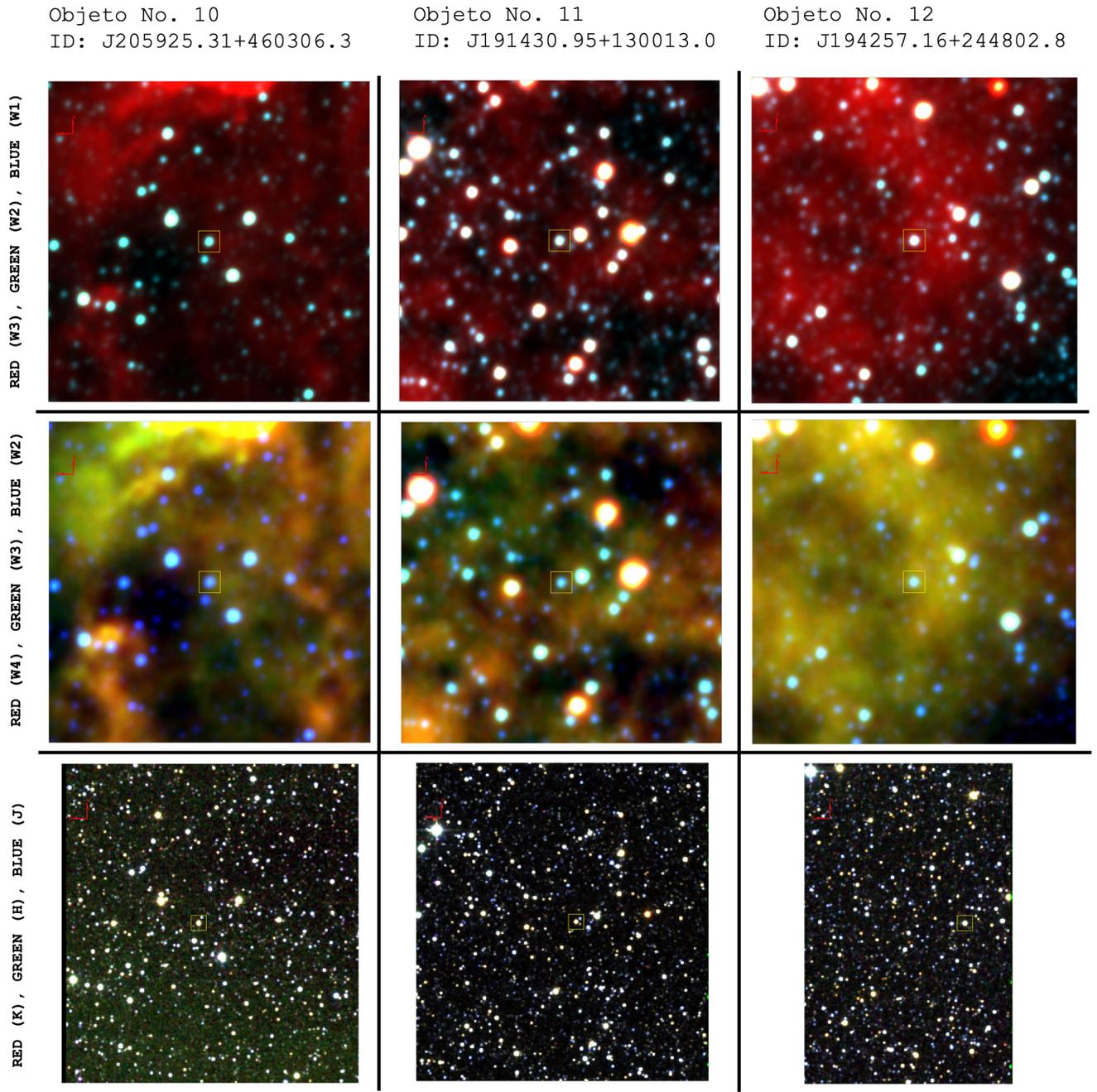


Figura A.7: Imágenes RGB de los candidatos a SySts obtenidas de IRSA con las bandas de WISE y 2MASS con un tamaño de $500''$ del #10 al #12 de la lista de 21 candidatos a estrellas simbióticas.

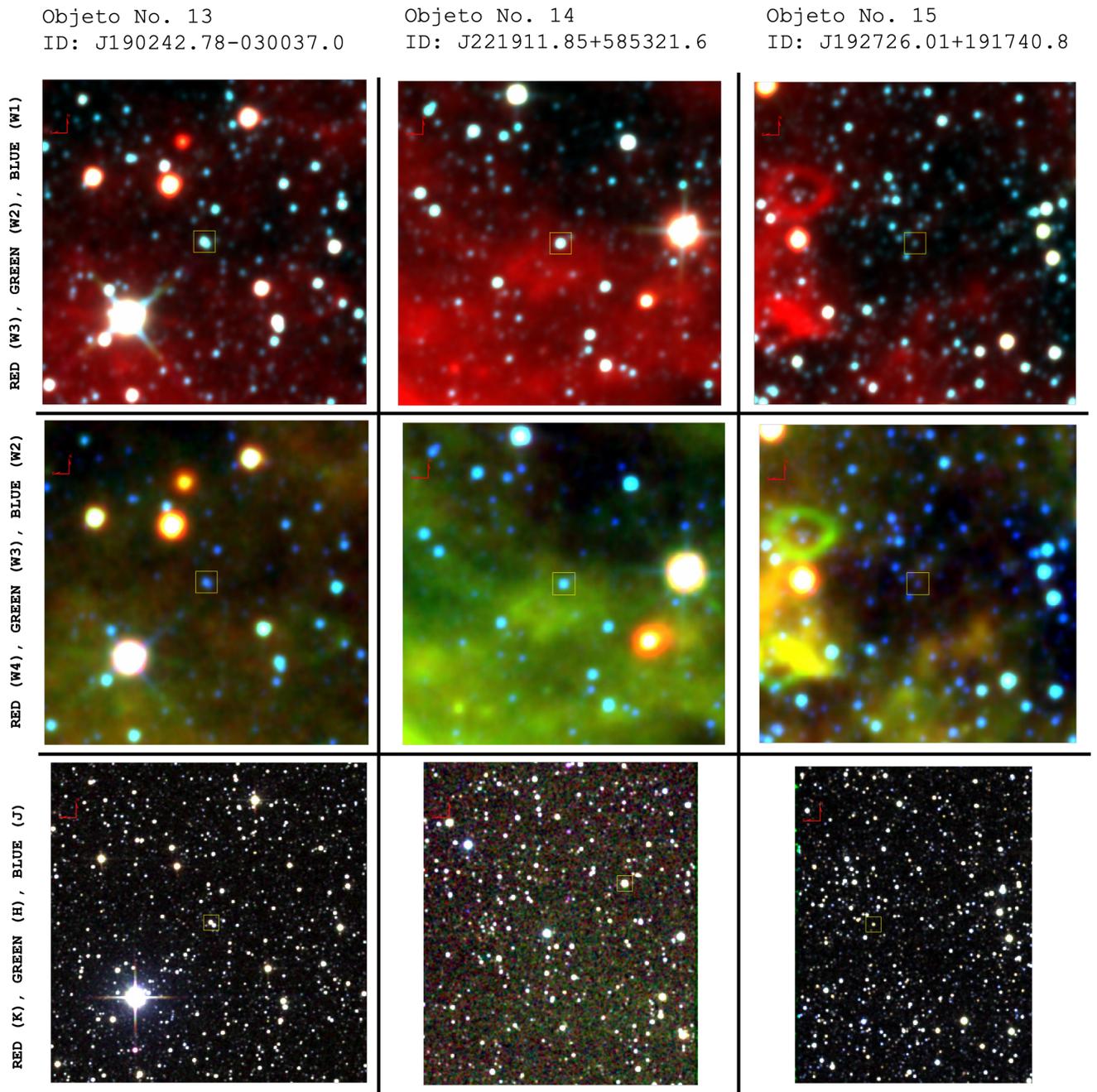


Figura A.8: Imágenes RGB de los candidatos a SySts obtenidas de IRSA con las bandas de WISE y 2MASS con un tamaño de $500''$ del #13 al #15 de la lista de 21 candidatos a estrellas simbióticas.

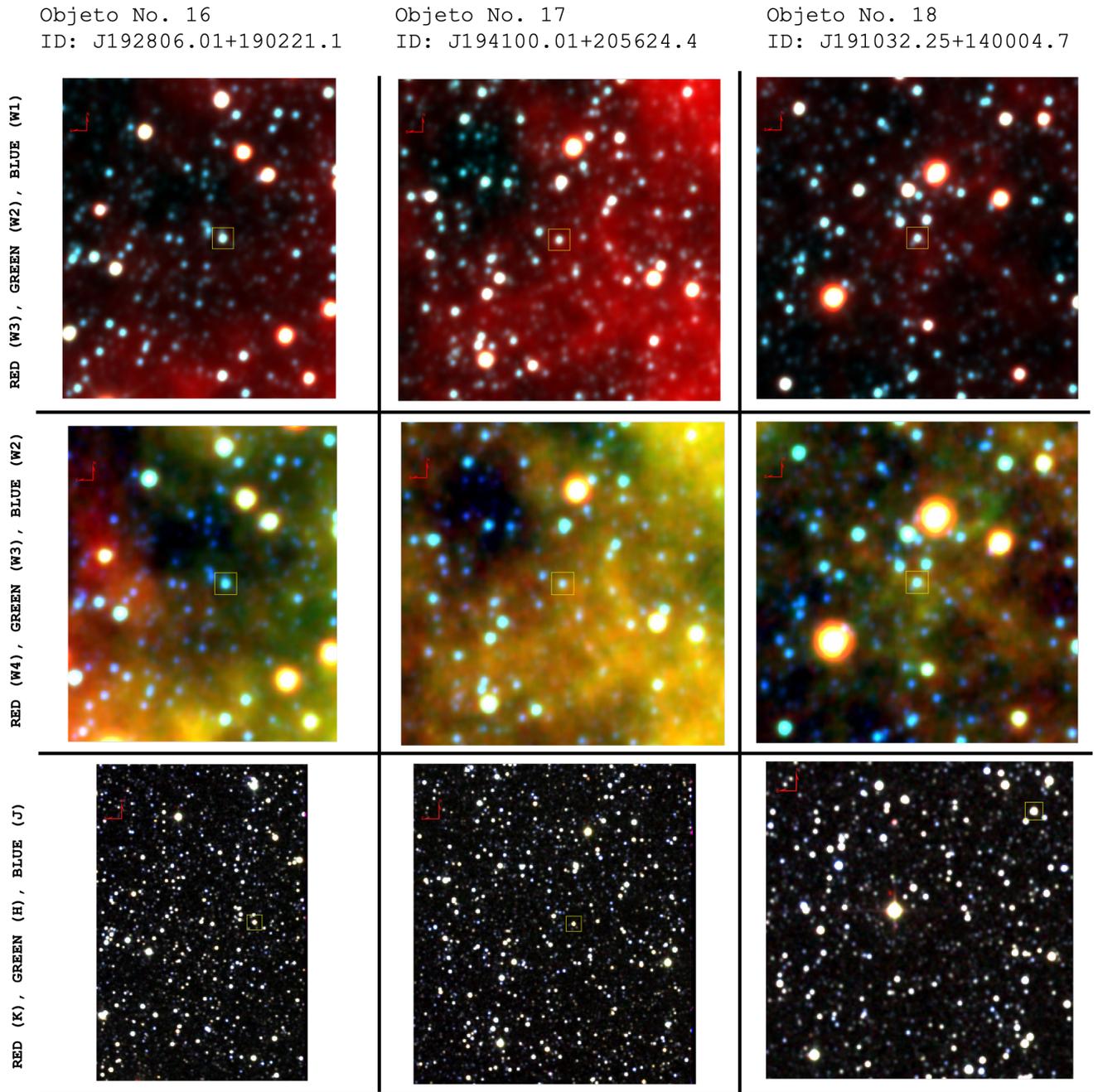


Figura A.9: Imágenes RGB de los candidatos a SySts obtenidas de IRSA con las bandas de WISE y 2MASS con un tamaño de $500''$ del #16 al #18 de la lista de 21 candidatos a estrellas simbióticas.

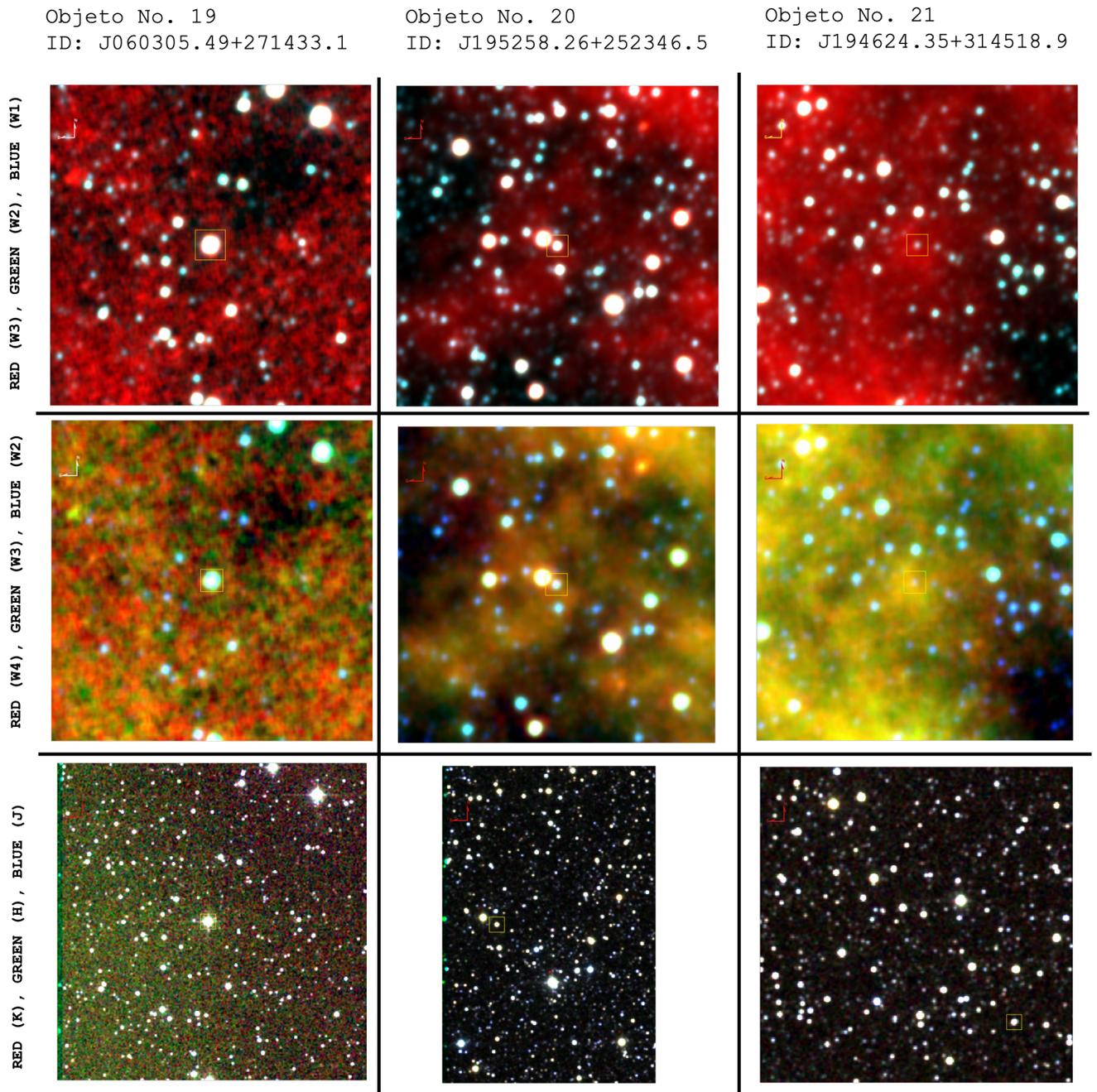


Figura A.10: Imágenes RGB de los candidatos a SySts obtenidas de IRSA con las bandas de WISE y 2MASS con un tamaño de $500''$ del #19 al #21 de la lista de 21 candidatos a estrellas simbióticas.

Apéndice B

Observaciones XMM-Newton de cuatro estrellas simbióticas (EG And, HM Sge, NQ Gem y PU Vul) – Extracto

RESUMEN: Presentamos el análisis de observaciones de archivo XMM-Newton de las estrellas simbióticas HM Sge, NQ Gem y PU Vul. Los espectros EPIC-pn revelan la presencia de líneas de emisión y el modelado espectral revela características sin precedentes. Por ejemplo, el mejor ajuste al espectro EPIC-pn de las estrellas simbióticas de tipo β PU Vul revela la presencia de dos componentes de plasma. Se ha descubierto una componente espectral extremadamente suave en el espectro EPIC-pn de las estrellas simbióticas de tipo β HM Sge, que sugerimos que se produce por eyecciones periódicas de masa, como los chorros. Sugerimos que una clasificación simple de tipo β ya no es aplicable a HM Sge. Por último, el espectro de la estrella simbiótica de tipo β/δ NQ Gem no puede ajustarse mediante un modelo de plasma de dos temperaturas como el realizado por autores anteriores. El modelo requiere componentes adicionales para ajustarse al rango de energía de 1.0-4.0 keV. Se necesitan modelos más sofisticados para estrellas simbióticas de tipo β/δ con el fin de profundizar en el proceso de acreción de tales sistemas.

DRAFT VERSION JANUARY 20, 2023
Typeset using L^AT_EX twocolumn style in AASTeX631

An XMM-Newton view of the Symbiotic Stars HM Sge, NQ Gem, and PU Vul

JESÚS A. TOALÁ,¹ MARISSA K. BOTELLO,² AND LAURENCE SABIN²

¹Instituto de Radioastronomía y Astrofísica, UNAM, Ant. carretera a Pátzcuaro 8701, Ex-Hda. San José de la Huerta, 58089 Morelia, Mich., Mexico

²Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 877, 22860 Ensenada, B.C., Mexico

(Received January 20, 2023)

Submitted to ApJ

ABSTRACT

We present the analysis of archival XMM-Newton observations of the symbiotic stars (SySts) HM Sge, NQ Gem, and PU Vul. The EPIC-pn spectra reveal the presence of emission lines and spectral modeling reveal unprecedented characteristics. For instance, the best fit to the EPIC-pn spectrum of the β -type SySt PU Vul reveals the presence of two plasma components. We report the discovery of an extremely soft spectral component in the EPIC-pn spectrum of the β -type SySt HM Sge which we suggest is produced by periodic mass ejections such as jets. We suggest that a simple β -type classification no longer applies to HM Sge. Finally, the spectrum of the β/δ -type SySt NQ Gem can not be fitted by a two-temperature plasma model as performed by previous authors. The model requires extra components to fit the 1.0–4.0 keV energy range. More sophisticated models to β/δ -type SySt are needed in order to peer into the accretion process from such systems.

Keywords: Symbiotic binary stars (1674); Stellar accretion(1578); White dwarf stars(1799); X-ray stars; Low mass stars(2050)

1. INTRODUCTION

Symbiotic stars (SySts) are binary systems composed of a compact object accreting material from a cool companion. The definition is somewhat loose if one recognizes that the compact object might be a white dwarf (WD), a neutron star or even a black hole (see Luna et al. 2013). In such systems, the compact object accretes material from the red companion through a Bondi-Hoyle process (Bondi & Hoyle 1944) which might be enhanced by Roche-lobe overflow (Podsiadlowski & Mohamed 2007). This process creates an accretion disk surrounding the compact object which is heated up by viscosity effects reaching X-ray-emitting temperatures.

X-ray observations have been classically used to assess the accretion process in WD SySts, but not many have been detected in X-rays. There are less than 300 galactic WD SySts reported thus far in our Galaxy (see, e.g., Merc et al. 2019a)¹, but only about 60 have been detected with X-ray instruments (Merc et al. 2019b). The first X-ray classification of WD SySt was presented by Mürset et al. (1997) dividing these objects into three different groups depending on their spectra properties. α -type SySt corresponds to those sources with super soft X-ray spectra peaking at energies bellow 0.4 keV

and attributed to the quasi-steady thermonuclear burning on the surface of the WD (see Orio et al. 2007). β -type objects with spectral peaks close to 0.8 keV are associated with optically-thin plasma with temperatures $\sim 10^6$ K produced by colliding winds, accretion shocks and/or accretion disk. Finally, γ -type corresponds to harder X-ray sources with emission associated with shocks between the accretion material of the compact objects that reaches up to 2.4 keV energy. We note that this classification scheme was defined by using ROSAT data which was sensitive to the soft X-ray emission ($E < 2.4$ keV).

This original $\alpha/\beta/\gamma$ classification scheme was expanded by Luna et al. (2013) by adding a fourth category, δ -type for highly absorbed, hard X-ray emission sources. These authors used Swift XRT data to unveil the harder X-ray emission from WD SySt. In particular, the X-ray emission from these sources is typically highly extinguished and very likely corresponds to emission from the innermost accretion region surrounding the WD component. Luna et al. (2013) demonstrated that WD SySts not only emit soft X-rays, but there was a significant population of objects with hard X-ray emission.

In this work we analyze publicly available XMM-Newton observations of the SySts HM Sge, NQ Gem, and PU Vul which have been classified as β -, β/δ -, and β -type SySts, respectively (see Merc et al. 2019b, and references therein).

¹ See the New Online database of symbiotic variables at <http://astronomy.science.upjs.sk/symbiotics/>

arXiv:2301.08191v1 [astro-ph.SR] 19 Jan 2023

Figura B.1: Artículo de clasificación de estrellas simbióticas en rayos X

Apéndice C

Observando la región central de un nanocuásar: Imágenes de XMM-Newton y Chandra del sistema simbiótico CH Cyg – Extracto

RESUMEN: Presentamos el análisis de observaciones de archivo XMM-Newton y Chandra de CH Cyg, una de las estrellas simbióticas (SySts) más estudiadas. La combinación de los espectros de rayos X de alta resolución XMM-Newton RGS y Chandra HETG nos permitió obtener estimaciones fiables de las abundancias químicas y corroborar la presencia de gas emisor de rayos X multitemperatura. El ajuste espectral de resolución media XMM-Newton MOS (MOS1+MOS2) requirió el uso de un componente adicional no visto en estudios anteriores para poder ajustar el rango de energía de 2.0-4.0 keV. El modelado espectral detallado de los datos de XMM-Newton MOS sugiere la presencia de un componente de reflexión, muy similar al que se encuentra en los núcleos galácticos activos. La componente de reflexión está probablemente producida por un disco ionizado (el disco de acreción alrededor de la enana blanca) y reproduce el complejo de líneas de emisión de Fe (6.4, 6.7 y 6.97 KeV), contribuyendo también a los rangos de energía suaves y medios. Se discute la variabilidad de las propiedades globales de rayos X de CH Cyg así como la variación de las tres líneas de Fe. Concluimos que se necesitan componentes de reflexión para modelar la emisión de rayos X duros que puede estar presente en la mayoría de las SySts de tipo β/δ .

Peering into the central region of a nano-quasar: *XMM-Newton* and *Chandra* views of the CH Cyg Symbiotic System

J. A. Toalá¹ , O. González-Martín¹ , M. Karovska² , R. Montez Jr.² , M. K. Botello³  and L. Sabin³ 

¹*Instituto de Radioastronomía y Astrofísica, UNAM, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex-Hda. San José de la Huerta, Morelia 58089, Mich., Mexico*

²*Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA*

³*Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ensenada 22860, Baja California, Mexico*

2 March 2023

ABSTRACT

We present the analysis of archival *XMM-Newton* and *Chandra* observations of CH Cyg, one of the most studied symbiotic stars (SySts). The combination of the high-resolution *XMM-Newton* RGS and *Chandra* HETG X-ray spectra allowed us to obtain reliable estimates of the chemical abundances and to corroborate the presence of multi-temperature X-ray-emitting gas. Spectral fitting of the medium-resolution *XMM-Newton* MOS (MOS1+MOS2) spectrum required the use of an additional component not seen in previous studies in order to fit the 2.0–4.0 keV energy range. Detailed spectral modelling of the *XMM-Newton* MOS data suggests the presence of a reflection component, very similar to that found in active galactic nuclei. The reflection component is likely produced by an ionised disk (very likely the accretion disk around the white dwarf) and reproduces the Fe emission line complex (6.4, 6.7, and 6.97 keV) while also contributing to the soft and medium energy ranges. The variability of the global X-ray properties of CH Cyg are discussed as well as the variation of the three Fe lines. We conclude that reflection components are needed to model the hard X-ray emission and may be present in most β/δ -type SySt.

Key words: stars: evolution — stars: winds, outflows — (stars:) white dwarfs — (stars:) binaries: symbiotic — X-rays: binaries

1 INTRODUCTION

Symbiotic stars (SySts) are binary systems consisting of a red giant and an accreting compact object which could be either a white dwarf (WD) or a neutron star (e.g., Luna et al. 2013; Enoto et al. 2014). WD symbiotics are particularly interesting because accretion might increase the mass of the WD to the Chandrasekhar limit making them potential type Ia supernova progenitors. It is mostly accepted that the accretion process in SySts takes place through Bondi-Hoyle accretion, but the formation of an accretion disk is expected and has been indirectly observed (Livio & Warner 1984; Alexander et al. 2011). In addition, if the material accumulates enough angular momentum jets will be launched (see Soker 2016, for discussion of the *jet feedback mechanism*).

X-ray emission has been used to characterise the physics behind the complex circumstellar medium around SySts. The innermost region of an accretion disk can be shocked and heated up due to viscosity effects producing hard X-rays ($E > 2$ keV). However, the spectral properties of the X-ray emission will also depend on the stellar masses and accretion rate (Kylafis & Lamb 1982). On the other hand, the soft X-ray emission ($E < 2$ keV) has been attributed to different mechanisms: i) an accretion disk-like corona (Ishida et al. 2009; Wheatley & Mauche 2005), ii) shocks between the WD's wind and that of the red giant companion (Kenny & Taylor 2005) or iii) as a result of the photoionisation effects of the red giant produced by the hard X-ray emission.

Using *ROSAT* observations Muerse et al. (1997) presented the first X-ray spectral classification scheme of SySts, which was later extended by the work of Luna et al. (2013) using *Swift* data. They defined α -type X-ray-emitting SySts as those with spectra dominated at $E < 0.4$ keV attributed to thermonuclear burning on the surface of the WD. β -type was assigned to those SySts with X-ray spectra peaking at 0.8 keV and attributed to the wind collision region. SySts with harder X-ray spectra were classified as γ -type. A δ classification is used to denote those SySts with hard X-ray emission from the innermost accretion region. A summary of the classification of X-ray detected SySts has been presented in Merc et al. (2019).

One of the X-ray-emitting SySt that has gained much attention is CH Cyg. Its high variability is very likely linked to the irregular mass ejections (see, e.g., Iijima et al. 2019; Tarasova & Skopal 2021). It is located at a relatively close distance from the Sun ($d=200\pm 5$ pc; Bailer-Jones et al. 2021) and as a consequence its mass ejection and jet formation have been resolved in radio, optical and X-ray data (Corradi et al. 2001; Solf 1987; Taylor et al. 1986; Galloway & Sokoloski 2004; Karovska et al. 2007).

CH Cyg has been observed by multiple X-ray missions, including *EXOSAT*, *ASCA*, *Chandra* and *Suzaku*, through different epochs (see Leahy & Taylor 1987; Leahy & Volk 1995; Ezuka et al. 1998; Karovska et al. 2007; Mukai et al. 2007). Muerse et al. (1997) classified it as a β -type source but noted that a detailed spectral fitting was difficult to be achieved (see also Leahy & Volk 1995). Later, Ezuka et al. (1998) showed that its *ASCA* spectrum rendered a more complex source. Thus a classification of β/δ seemed to be more appropriate.

* E-mail: j.toala@irya.unam.mx