

Universidad de Los Andes
Facultad de Ciencias
Postgrado en Física Fundamental

**ESTUDIANDO EL ORIGEN DEL CÚMULO
GLOBULAR OMEGA CENTAURI**

Lic. José Gregorio Fernández Trincado

Dra. Anna Katherina Vivas Maldonado, Tutor

Mérida, 31 de Enero de 2014

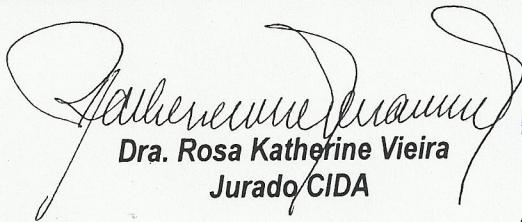
VEREDICTO

Quienes suscriben, integrantes del jurado designado por el Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad de Los Andes, para conocer el veredicto sobre el Trabajo de Grado presentado por el Lic. José Gregorio Fernández Trincado, titular de la cedula de identidad N° V-17.371.584, para optar al Grado Académico de **Magister Scientiae en Física Fundamental**, el cual se titula:

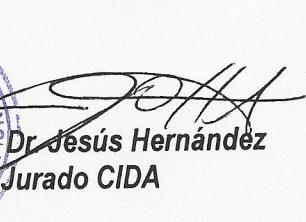
"Estudiando el Origen del Cúmulo Globular Omega Centauri"

Hace constar lo siguiente:

PRIMERO: Que hoy viernes, 31/01/2014 a las 2:00 p.m., constituidos como Jurado en la Sala de Video Conferencia, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, siendo Presidente del mismo la Dra. Anna Katherina Vivas M. **SEGUNDO:** A las 2:10 p.m., de ese mismo día, se procedió al acto público de sustentación del Trabajo de Grado presentado a requerimiento del jurado. **TERCERO:** Una vez concluida la sustentación correspondiente, el Jurado interrogó al aspirante sobre los diversos aspectos a los que el trabajo se refiere. **CUARTO:** Seguidamente el Presidente del Jurado invitó al público asistente a formular preguntas y observaciones sobre el trabajo presentado. **QUINTO:** Una vez concluido el acto de presentación y defensa, el Jurado procedió a la deliberación final y concluyó por unanimidad: **APROBAR EL TRABAJO DE GRADO PRESENTADO A NUESTRA CONSIDERACIÓN Y RECOMENDADO PARA SU PUBLICACIÓN.**


Dra. Rosa Katherine Vieira
Jurado CIDA


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES-FACULTAD DE CIENCIAS
Postgrado en Física Fundamental
COORDINACION
Mérida Venezuela


Dr. Jesús Hernández
Jurado CIDA


Dra. Anna Katherina Vivas M.
Tutor-Presidente del Jurado

Estudiando el origen del Cúmulo Globular Omega Centauri

Copyright © 2014

Universidad de Los Andes

**ESTUDIANDO EL ORIGEN DEL CÚMULO GLOBULAR OMEGA
CENTAURI**

Lic. José Gregorio Fernández Trincado

Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Facultad de Ciencias de la
Universidad de Los Andes como
requisito parcial para optar al título de:

Master en Física del Postgrado en Física Fundamental.

Dra. Anna Katherina Vivas Maldonado, Tutor

31 de Enero de 2014

Quienes suscriben, miembros del Jurado que examinó el trabajo presentado por el Lic. José Gregorio Fernández Trincado titulado: “**Estudiando el origen del Cúmulo Globular Omega Centauri**” para optar al título de Master en Física, consideramos que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos APROBADO en nombre de la Universidad de Los Andes.

Dra. Anna Katherina Vivas Maldonado, Tutor

Dr. Jesús Hernández, CIDA

Dra. Katherine Vieira, CIDA

Mérida, 31 de Enero de 2014

Este trabajo va dedicado a los miembros del International GAIA School, D. F. Mexico City, que se llevó a cabo del 03 al 12 de Noviembre del 2013. Gracias a todos por sus recomendaciones, comentarios, sugerencias, ideas y en especial a los profesores con quienes realizamos una discusión completa del problema actual de Omega Centauri, y el futuro de este cúmulo con las nuevas observaciones de GAIA.



Figura 0.1: International GAIA School 2013

Agradecimientos

Gracias por el apoyo y paciencia de mis padres y hermanas.

Gracias a la Dra. Anna Katherina Vivas (Tutor de Tesis de la Licenciatura y Maestría) por su paciencia, consejos y enseñas durante estos últimos 4 años de trabajo en el CIDA.

Gracias al Dr. Tomas Verdugo, por sus valiosos consejos y por ser un gran amigo y colaborador, siempre estuvo presente dando las mejores críticas constructivas y por su apoyo al permitirme trabajar en otros proyectos que hasta la fecha han dado buenos resultados.

Muchas gracias a Erika Antiche, por su apoyo durante los momentos difíciles.

A los Doctores: Anna Katherina Vieira, Jesús Hernández y Cecilia Mateu, por su valioso tiempo dedicado en sugerir soluciones a los problemas que se fueron presentando a lo largo del desarrollo del presente proyecto.

A los miembros de la Comisión de Asignación de Tiempo de Observación (CATO), por la aprobación de todas las noches de observación solicitadas en el telescopio Reflector de 1 m y el telescopio Jürgen Stock de 1 m ambos telescopios del Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato.

Al Lic. Hernán Ramírez, por su valioso tiempo empleado para diseñar la interfaz gráfica de los programas desarrollados por el autor en el presente proyecto, con estos se automatizará el proceso de reducción y calibración de las imágenes astronómicas del telescopio Reflector, el cual estará disponible en su versión beta a mediados del año 2014.

Muchas gracias al Dr. Octavio Valenzuela, a la Dra. Bárbara Pichardo y al Dr. Edmundo Moreno del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México con sede en el Distrito Federal, por su paciencia y orientación en las

simulaciones de órbitas realizadas en el presente proyecto, y con quienes trabajé durante 4 meses y con quienes mantengo colaboración en otros proyectos relacionados al presentando en este libro.

Gracias al Msc. Jonnathan Reyes-Pérez, estudiante de Doctorado de la Universidad Nacional Autónoma de México con sede en el Distrito Federal, por las largas conversaciones durante las horas de almuerzo, sobre los problemas del misterioso cúmulo globular Omega Centauri, gracias por sus valiosas ideas sugeridas para iniciar nuevas observaciones y estudiar desde el punto de vista de las nebulosas planetarias la naturaleza de este cúmulo.

Gracias a la Dra. Fabiola Hernández, el Msc. Rafael Gamez y el Lic. Ivan Cabrera por las discusiones de pasillo y recomendaciones dadas para finalizar con éxito el presente trabajo.

Muchas gracias a la Lic. Rut Salazar, Lic. Fátima Robles, Lic. Jackie García y a Mauricio Daniel Garza por su ayuda.

Muy agradecido con la secretaria del Postgrado en Física Fundamental (Paula) y la secretaria del departamento científico del CIDA (Gladys Méndez) quienes me ayudaron a resolver todo tipo de problema académico, administrativo, etc.

Al Centro de Investigaciones de Astronomía "Francisco J. Duarte"(CIDA) quien a financiado durante 4 años el desarrollo del presente trabajo que comenzó con una tesis de licenciatura y culmina con una tesis de Maestría, Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT), Fundacite-Mérida, por los recursos económicos recibidos con el objetivo de asistir a Escuelas, Congresos, Workshops y Conferencias Nacionales e Internacionales en el campo de la Astronomía, cuyos temas complementaron la formación académica para el desarrollo del presente trabajo.

Resumen

Estudiando el origen del Cúmulo Globular Omega Centauri

José Gregorio Fernández Trincado

Dra. Anna Katherina Vivas Maldonado, Tutor

Universidad de Los Andes

En las últimas décadas, varios trabajos observacionales han sugerido que el cúmulo globular Omega Centauri, puede ser parte de los residuos de una galaxia enana destruida por las fuerzas de marea de la Vía Láctea. Con el objetivo de detectar los restos de la galaxia progenitora, se ha llevado a cabo una campaña de observación multi-época en las bandas V e I, desde el Observatorio Astronómico Nacional de Venezuela, para detectar estrellas RR Lyrae sobre un área de 83 grados cuadrados alrededor del cúmulo globular Omega Centauri. En el presente trabajo, se detectaron 49 estrellas variables, de las cuales 10 han sido previamente reportadas. Además de presentarse las curvas de luz para 47 estrellas RR Lyrae y 2 δ Scuti, se muestra un análisis al integrar 10^6 simulaciones de pares de órbitas para 4 de esas estrellas RR Lyrae y Omega Centauri, en un modelo de potencial axisimétrico de la Vía Láctea, encontrándose que solo una estrella (V1865) presenta una probabilidad del 3 % de haber sido arrancada del cúmulo. Se concluye finalmente que estas estrellas no son suficientes para indicar la existencia de los restos de la galaxia enana asociada con el cúmulo.

Dra. Anna Katherina Vivas Maldonado
Tutor

Índice General

Índice General	ix
1. Introducción	1
2. El caso de Omega Centauri	5
2.1. Cúmulos Globulares	5
2.2. Omega Centauri: ¿Cúmulo globular ó galaxia enana?	7
2.3. ¿Agujero negro en el centro de Omega Centauri?	9
2.4. El progenitor de Omega Centauri	10
2.4.1. Cúmulo globular masivo	11
2.4.2. Galaxia enana	12
2.5. Intentos por buscar los restos de la Galaxia Progenitora	13
2.5.1. Leon et al. (2000)	15
2.5.2. Da Costa & Coleman (2008)	15
2.5.3. Trabajos en la vecindad solar	16
2.6. Estrellas RR Lyrae	19
2.6.1. RR Lyraes en Omega Centauri	20

3. Datos observacionales	22
3.1. Observaciones	22
3.1.1. Telescopio Jürgen Stock (Cámara Schmidt)	23
3.1.2. Telescopio Reflector	24
3.1.3. Procesamiento inicial de los datos	27
3.2. Fotometría	30
3.2.1. Fotometría Instrumental	30
3.2.2. Calibración Fotométrica	32
3.3. Astrometría	34
3.3.1. Catálogos de Referencia	36
3.4. Catálogo Maestro	38
4. Búsqueda de Estrellas RR Lyraes	42
4.1. Cálculo de Períodos	43
4.2. Zona de baja completitud	46
4.3. Distancia a las Estrellas RR Lyrae	46
5. Resultados y Análisis	50
5.1. Nuevos descubrimientos	50
5.1.1. Distribución de distancias	58
5.2. Número esperado de estrellas RR Lyrae alrededor de Omega Centauri	60
5.3. Espectroscopía	64
5.3.1. Reducción de los espectros	64
5.3.2. Velocidades radiales de estrellas RR Lyrae	68
5.4. Movimientos Propios por SPM4	73
5.5. Simulaciones de órbitas	75

5.6.	Posibles estrellas RR Lyrae asociadas a NGC5286	79
6.	Conclusiones	82
7.	Resultados publicados	84
7.0.1.	Publicaciones	84
7.0.2.	Memorias en Congresos	84
A.	Apéndices	86
A.1.	Parámetros de las estrellas candidatas a RR Lyraes	86
1.2.	Curvas de luz de las estrellas candidatas a RR Lyraes	87

Capítulo 1

Introducción

Omega Centauri fué clasificado inicialmente como una estrella por Ptolomeo en el siglo II. Posteriormente, en el año 1603, Johann Bayer lo clasifica también como estrella, la número 24 de la constelación del centauro. En el año 1677, Edmond Halley logra hacer la primera observación con más detalles de este objeto, y lo clasifica como una nebulosa. Finalmente, para el año 1830, es John William Herschel quien clasifica a Omega Centauri, como “cúmulo globular” y siendo catalogado con el número 5139 dentro del New General Catalog (NGC5139).

Los cúmulos globulares son las reliquias más antiguas del halo, y estudiar sus propiedades en general, puede dar una idea de como se han formado las componentes visibles de nuestra Galaxia, la Vía Láctea. En particular, Omega Centauri es el más luminoso y más masivo de los 157 cúmulos globulares conocidos hasta la fecha (Harris et al. 2010). Sin embargo, Omega Centauri exhibe una diversidad de propiedades físicas y químicas que lo hacen diferente del resto de los cúmulos globulares que alberga la Vía Láctea, y su origen es toda una controversia. En los últimos años se ha llegado a proponer que Omega Centauri es el resto de una galaxia enana cuya envolvente estelar fue destruida y disgregada en el halo, luego de su interacción con el disco de la Vía Láctea. Trabajos como el propuesto por Bekki & Freeman (2003), sugieren a partir de un modelo dinámico auto-consistente, que Omega Centauri se formó por la fusión de

una galaxia enana con el disco delgado de la Galaxia, cuando la masa del disco era de tan solo el 10 % de la masa actual.

Algunas propiedades inusuales han sido observadas hoy en día que apoyan esta hipótesis del pasado de Omega Centauri, entre ellas: (*i*) Se encuentra en un órbita retrógrada y de baja inclinación alrededor de la Vía Láctea (Dinescu et al. 1999); (*ii*) Tiene una forma ovalada, originada por la rápida rotación global del sistema de $\sim 8 \text{ km s}^{-1}$ (Merritt et al. 1997), lo cual lo hace uno de los cúmulos globulares más aplanados (White & Shawl 1987); (*iii*) Los diagramas color magnitud muestran una población estelar compleja, con un amplio rango de metalicidades y una dispersión de edad de $\Delta t = 3 - 5 \text{ Giga años}$ (Lee et al. 1999; Hilker & Richtler 2000; Hughes & Wallerstein 2004). También, han sido encontradas hasta tres secuencias principales (Bedin et al. 2004; Sollima et al. 2007), entre 5 a 11 ramas sub-gigantes (Sollima et al. 2005; Villanova et al. 2007; Bellini et al. 2010), y cuatro ramas de las gigantes rojas (Lee et al. 1999; Pancino et al. 2002; Sollima et al. 2004); (*iv*) Omega Centauri presenta un complejo patrón químico (Marino et al. 2008; Gratton et al. 2012; King et al. 2012). Varios de estos autores sugieren que una posible explicación para los diagramas color magnitud es el escenario de múltiples eventos de formación estelar (Lee et al. 1999; Pancino et al. 2002; Villanova et al. 2007; D’Orazi et al. 2011; Joo & Lee 2013); (*v*) La alta dispersión de velocidades medida hacia el centro de Omega Centauri puede ser indicación de que este podría albergar un agujero negro de masa intermedia (Noyola et al. 2006, 2008, 2010; van der Marel & Anderson 2010; Jalali et al. 2012), con una masa estimada de $(10^4 M_\odot)$.

En los últimos años se ha propuesto que Omega Centauri probablemente sea un caso similar a M54 y la galaxia enana de Sagitario pero, en el caso de Omega Centauri, la galaxia progenitora prodría haber sido destruida por completo (Carretta et al. 2010). La búsqueda de los restos del posible progenitor de Omega Centauri ha estado

llena de controversias. Aunque Leon et al. (2000) encontraron unas colas de marea en las partes externas del cúmulo, su resultado podría haber sido influenciado por el enrojecimiento variable presente en esa zona del cielo. Por otra parte, Da Costa & Coleman (2008) hicieron un sondeo espectroscópico extenso de gigantes rojas en la vecindad del cúmulo y no encontraron evidencia significativa de la presencia de restos de una galaxia. Esto sería lo esperado si la destrucción de la galaxia ocurrió hace mucho tiempo. Más recientemente, Majewski et al. (2012) encontraron un grupo de estrellas en la vecindad solar cuyas propiedades cinemáticas y, aún más importante, sus propiedades químicas se asocian con Omega Centauri. El patrón químico muy particular de esas estrellas se sabe que ocurre solo en ese cúmulo.

Omega Centauri posee una rica población de estrellas RR Lyrae (Weldrake et al. 2007) al igual que muchos otros cúmulos globulares y todas las galaxias satélites de la Vía Láctea (Vivas & Zinn 2006), por lo que es de esperarse que si realmente el progenitor asociado a Omega Centauri fue una galaxia enana, ésta haya sido rica en este tipo de estrellas. Esa galaxia fue destruida por fuerzas de marea de la Vía Láctea, es de esperarse que haya quedado parte de su material estelar disgregado en el halo de la Galaxia. Simulaciones teóricas proponen que el proceso de destrucción de galaxias por fuerzas de marea es lento y las estrellas asociadas a estos eventos conservan por largo tiempo (~ 10 giga años) información del espacio de fase de la galaxia progenitora (Johnston et al. 1999).

El objetivo principal del presente trabajo consiste en ampliar la búsqueda de estrellas RR Lyrae alrededor del cúmulo globular Omega Centauri, que comenzó en el año 2010 con la tesis de licenciatura del autor (Fernández 2011). Allí se realizó la exploración fotométrica (bandas V e I de Johnson), de alrededor de 50 grados cuadrados de cielo en la vecindad del cúmulo globular Omega Centauri, con el objetivo principal de detectar alguna sobredensidad de estrellas RR Lyrae que pudieran estar asociadas con

el material residual de una galaxia progenitora. En este trabajo ampliamos el trabajo preliminar hecho por Fernández (2011). No solo se mejoraron las técnicas de manejo de la gran cantidad de catálogos resultantes de las observaciones sino que también se complementó el estudio añadiendo más área del cielo. Se incluye un estudio cinemático de varias de las estrellas encontradas y además, se realiza un análisis de simulaciones de órbitas de las estrellas encontradas.

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera: En el **capítulo 2** se discute el problema actual de los cúmulo globulares y se coloca en este contexto el caso de Omega Centauri, así como también se describen los posibles escenarios de formación de este cúmulo globular. Se discuten la características generales de las estrellas RR Lyraes usadas como estándares de luminosidad y distancia, así como trazadores de la población estelar vieja en distintas componentes de la Galaxia (Halo, Disco Grueso y Bulbo). En el **capítulo 3** se describen las observaciones, las técnicas empleadas para el procesamiento de los datos y la creación de un catálogo general. En el **capítulo 4** se presentan las técnicas empleadas para la detección de estrellas RR Lyrae, el cálculo de sus períodos. Se muestra la completitud de las observaciones y los modelos para estimar la distancia de estas estrellas RR Lyrae así como también se detalla el gradiente de extinción presente en la región explorada. En el **capítulo 5** se presentan los resultados y análisis obtenidos de los perfiles de densidad de estrellas RR Lyrae. El estudio realizado sobre los espectros y los resultados de las velocidades radiales obtenidas de las estrellas RR Lyrae. Finalmente se presentan las simulaciones de las órbitas realizadas para un grupo de esas estrellas. En el **capítulo 6** se hacen las conclusiones pertinentes. En el **capítulo 7** se presentan las publicaciones y trabajos presentados en diferentes congresos nacionales e internacionales.

Capítulo 2

El caso de Omega Centauri

2.1. Cúmulos Globulares

Por mucho tiempo se dió por sentado que los cúmulos globulares eran sistemas estelares simples que se formaron a partir de la misma nube molecular de gas y polvo, en un único evento de formación estelar que ocurrió casi simultáneamente. Pero, en los últimos años el tema de los “cúmulos globulares” ha creado grandes debates, dada la controversia de la naturaleza de estas agrupaciones estelares. Hoy día se sabe con certeza, a partir de las observaciones de cúmulos globulares de la Vía Láctea, que no son poblaciones estelares simples como se pensaba hace 30 años. Por el contrario, en los últimos años se han realizado múltiples observaciones de estos sistemas con telescopios en el espacio como el telescopio espacial Hubble y grandes telescopios en tierra como el Very Large Telescope (VLT) en Chile, que han revelado que estas agrupaciones muestran huellas de múltiples escenarios de formación estelar, mostrando diagramas color magnitud con varias secuencias en sus diferentes ramas evolutivas. Evidencias de este hecho son aportadas por fotometría (Bedin et al. 2004; Piotto et al. 2007) y espectroscopía (Carretta et al. 2009a, 2009b, 2010a) de alta precisión. Un ejemplo observational de estos complejos sistemas autogravitantes, son estudiados por el proyecto SUMO¹ que consiste en el sondeo de múltiples poblaciones estelares en

¹Survey of Multiple Populations in globular clusters

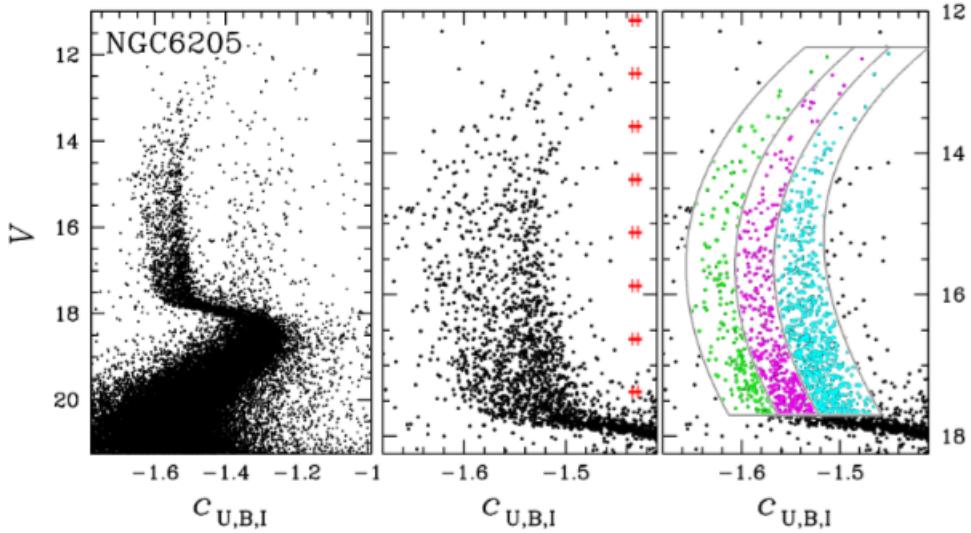


Figura 2.1: Diagrama Color Magnitud ($V, C_{U,B,I}$), donde $C_{U,B,I} = (U - B) - (B - I)$ es un índice de color del cúmulo globular NGC6205 y definido en Monelli et al. (2013). **Panel Izquierdo:** Puede apreciarse la secuencia principal, el Turn-off de la secuencia principal, la Rama de la Subgigantes y la Rama de la Gigantes Roja. **Panel Central:** Corresponde a un zoom de la Rama de las Gigantes Roja para $V \leq 18$ mag. **Panel Derecho:** Se muestran las tres poblaciones estelares en la Rama de la Gigantes Roja, en verde la población pobre en metales, en rosa una población de metalicidad intermedia y finalmente en azul una población rica en metales. Imagen tomada de Monelli et al. (2013).

cúmulos globulares de la Vía Láctea (Monelli et al. 2013), realizando fotometría de alta precisión con el objetivo de descubrir y caracterizar el fenómeno de múltiples poblaciones en cúmulos globulares galácticos. En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo, de un Diagrama Color Magnitud en el plano ($C_{U,B,I}, V$), donde se puede apreciar tres secuencias bien definidas en la rama de la gigantes rojas, que muestra la existencia de tres poblaciones estelares con diferentes contenidos en metales y a su vez, dando indicio de tres posibles brotes de formación con una dispersión de edad alrededor de 3 a 5 Giga años.

La definición de cúmulos globulares está hoy en día en debate. La mejor definición aceptada hasta la fecha, es sugerida en la segunda edición del James Binney &

Scott Tremaine (2008): “*Los cúmulos globulares son sistemas estelares, que contienen alrededor de $10^4 - 10^6$ estrellas en una distribución casi esférica. Estos sistemas son viejos, no contienen gas, polvo o estrellas jóvenes, y se cree son las reliquias de la formación de la propia Galaxia*”. En el año 2012, Gratton et al. (2012) establece que una población estelar simple, es un conjunto de estrellas que tienen la misma edad y composición química inicial (en términos de la abundancia de Helio y metales), y diferentes masas, distribuidas acorde a la función inicial de masa. Esta era la definición aceptada para los cúmulo globulares hace tiempo. Hoy en día es claro que los cúmulos globulares contienen varias generaciones de estrellas que puede ser dividida en una generación primordial y una segunda generación la cual puede tener varias sub-poblaciones distintas.

2.2. Omega Centauri: ¿Cúmulo globular ó galaxia enana?

La presencia de múltiples poblaciones estelares observadas en el cúmulo globular Omega Centauri no parece ser tan diferente del resto de los cúmulos globulares de la Vía Láctea. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, éste presenta propiedades físicas y patrones químicos que son únicos en su clase y que lo hacen diferente del resto de estas agrupaciones estelares. Varios son los estudios que se han realizado hasta la fecha, con el objetivo de entender la naturaleza de Omega Centauri y su influencia en la formación y evolución de la Vía Láctea. Algunas hipótesis han sido propuestas para entender su origen, entre ellas, las más relevantes, son:

- En los años 80 se propuso que Omega Centauri, probablemente sea la etapa de transición entre un galaxia enana y un ordinario cúmulo globular (Meylan & Mayor 1986; Meylan 1987), dada la anisotropía del sistema y la alta dispersión

de velocidades observadas (Meylan et al. 1995) que hacen que este sistema estelar se asemeja a las de galaxias enanas satélites a la Vía Láctea.

- Simulaciones de N-cuerpos sugieren que Omega Centauri es el núcleo de una galaxia enana cuya envolvente estelar fue destruida por completo por campos de marea en su interacción con la Vía Láctea (Majewski et al. 2000; Bekki & Freeman 2003; Tsuchiya et al. 2004; Ideta et al. 2004; Harris et al. 2004).
- Modelos hidrodinámicos sugieren que Omega Centauri, se formó a partir de un cúmulo globular masivo del orden de $10^9 M_{\odot}$ que luego de las eyeciones por vientos de estrellas masivas y explosiones de supernovas acumuló suficiente material que, al combinarse con el gas primordial, desencadenó la formación de nuevas poblaciones estelares, repitiéndose el ciclo y generando un autoenriquecimiento de elementos pesados en las subsecuentes poblaciones estelares (Valcarce & Catelan 2011).

Todos estos escenarios han sido rigurosamente estudiados, y todos coinciden con el estado actual del cúmulo. Ahora bien, si todos estos escenarios son igualmente de probable, nos formulamos la siguiente pregunta: *¿Que es realmente Omega Centauri?*. La respuesta a esta pregunta es realmente complicada, y el objetivo del presente proyecto es aportar una pieza adicional al rompecabeza, para tratar de entender la naturaleza de este sistema estelar.

En las siguientes secciones, se discuten los aspectos más generales que hacen de Omega Centauri un caso especial dentro de la familia de cúmulos globulares conocidos en la Vía Láctea.

2.3. ¿Agujero negro en el centro de Omega Centauri?

Desde el punto de vista de su cinemática y dinámica, en los últimos años se ha acumulado evidencia observacional que sugiere que en el centro de ese sistema estelar alberga un agujero negro de masa intermedia con una masa del orden de $10^4 M_{\odot}$ (van de Ven et al. 2006, Noyola et al. 2008, 2010; van der Marel & Anderson 2010; Jalali et al. 2012; Trenti et al. 2013). La masa exacta del agujero negro varía entre los diferentes trabajos realizados y se ubica entre 1 a $7 \times 10^4 M_{\odot}$. Todos estos trabajos coinciden, sin embargo, en que existe una dispersión de velocidades muy grande hacia el centro del cúmulo y esa es la evidencia principal de la existencia del agujero negro. Las diferencias de masa propuestas para el agujero negro nacen del hecho de que Omega Centauri presenta una cinemática interna compleja, y ubicar un centro común para cualquiera de ellos es complicado. Por ejemplo, los trabajos observacionales de Noyola et al., suponen un sistema interno, completamente isotrópico, mientras que van de Ven et al. suponen en conjunto un sistema completamente dinámico y anisotrópico, llevando a fijar diferentes centros en el cúmulo, como se muestra en la Figura 2.2. Cabe mencionar, que todo los centros propuestos hasta la fecha, han sido inferidos a partir de observaciones en la banda óptica del espectro electromagnético. Motivados en el hecho de confirmar la existencia de un agujero negro de masa intermedia en el centro del cúmulo, Lu & Kong (2011) y Haggard et al. (2013) amplian las observaciones de este cúmulo hacia otras longitudes de onda, con el objetivo de detectar señales evidentes de la presencia de un agujero negro de masa intermedia, basados en el fenómeno físico, de que un agujero negro con esta masa, sería capaz de producir acreción de material, generando la suficiente energía en la frontera para ser detectada tanto en los Rayos X como en longitudes de onda de Radio.

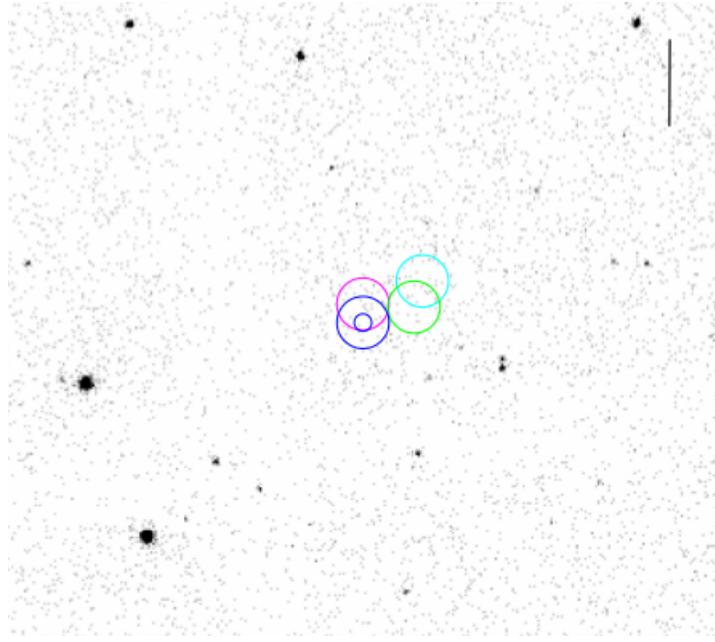


Figura 2.2: Centros propuestos por varios autores para Omega Centauri [Fucsia: Noyola et al. (2010), Verde: Noyola et al. (2008), Azul Claro: Harris et al. (2004) y Azul Oscuro: van der Marel & Anderson (2010)]. Los anillos grandes tienen un tamaño de 6 arcsec y corresponden a las zonas exploradas por Haggard et al. (2013), para el cual se intenta buscar sobre los centros propuestos por los autores ya mencionados. El anillo de menor tamaño es de 2 arcsec y corresponde al centro dinámico propuesto por Van Der Marel & Anderson (2010). La barra vertical, en el extremo superior derecho de la imagen, representa la escala de la misma, de 1 arcmin. Imagen tomada de Haggard et al. (2013).

2.4. El progenitor de Omega Centauri

Esfuerzos recientes por explicar la naturaleza del cúmulo globular Omega Centauri, han propuesto diferentes escenarios asociados con su progenitor, los cuales se describen brevemente a continuación:

2.4.1. Cúmulo globular masivo

Simulaciones hidrodinámicas logran explicar la existencia de múltiples poblaciones estelares en cúmulos globulares masivos como Omega Centauri. Estos cúmulos masivos se forman a partir de una proto-estructura con una masa inicial del orden de $10^9 M_{\odot}$, que eventualmente se fragmenta por el colapso gravitacional de una nube de gas primordial, dando inicio a la formación de la primera generación de estrellas en el sistema. Los vientos ejectados a altas velocidades de estrellas masivas y el material ejectado por la explosión de supernovas de esta primera generación estelar, es mezclado con el resto del gas primordial y posteriormente concentrado en el centro del cúmulo, dado su alto potencial gravitacional, formándose de esta forma una nueva proto-estructura, que eventualmente colapsará y desencadenará la formación de una segunda población estelar, con el nuevo material enriquecido. Para proto-estructuras con masas inciales a la ya mencionada, el ciclo se repite, formándose de esta forma hasta cuatro poblaciones estelares (Valcarce & Catelan 2011), con una dispersión de edades del orden de los 2 a 3 Giga años (Hughes et al. 2004).

En la Figura 2.3, se muestra de forma simplificada, la formación y evolución de un cúmulo globular masivo como Omega Centauri. A continuación se describen cada uno de los paneles de la Figura 2.3: (a) La nube de gas y polvo se fragmenta para dar formación a la primera generación de estrellas, siguiendo una distribución homogénea, y siguiendo la función inicial de masa, la cual establece que se forman más estrellas de baja masa que de alta masa; (b) Posteriormente, se forma una nube (círculo de color azul en el panel b) altamente enriquecida de Helio. Este material proviene de las eyecciones por vientos estelares de estrellas de la Rama Asintótica de las Gigantes y Super Novas. Esta nube tiende a concentrarse en el centro del cúmulo dado el alto potencial gravitacional ligado a todo el sistema. La nube intenta vencer la barrera de potencial, intentando salir del centro del cúmulo, pero los vientos de estrellas en la vecindad de la nube y vientos que se mueven a altas velocidades desde las partes

externas del cúmulo hacia el centro (colapso gravitacional), terminan por concentrar la nube formada en el centro del cúmulo; (c) Las primeras explosiones producidas por el colapso de supernovas, generan ondas de choque, que fragmentan la nube concentrada en el centro del cúmulo, desencadenando la formación de una segunda generación de estrellas; (d) Eventualmente el material ejectado por las explosiones de supernovas de primera generación vientos de estrellas de primera generación y restos de gas usado en la formación de estrellas de la segunda generación, es mezclado y concentrado en el centro del cúmulo, repitiéndose el ciclo nuevamente hasta formar la tercera generación de estrellas (panel e) y cuarta generación de estrellas (panel g). El panel f es similar al proceso ocurrido en el panel d, con la diferencia que las supernovas son originadas de la segunda generación de estrellas formadas previamente.

2.4.2. Galaxia enana

Modelos dinámicos (simulaciones numéricas) sugieren que Omega Centauri se formó a partir de un antiguo núcleo de galaxia enana (con una masa de $1,25 \times 10^8 M_{\odot}$) fusionada con la primera generación de estrellas del disco delgado de la Galaxia (Bekki & Freeman 2003). Tras la colisión se estima que la galaxia enana perdió alrededor del 95 % de su envolvente estelar, quedando la misma disgregada en la órbita ligada al progenitor. Estos resultados sugieren ser consistentes con la evolución química observada en Omega Centauri, la cual puede ser explicada en el contexto de la influencia del contenido de gas dinámico, que bajo influencia de torques de marea, desencadenó la nueva formación de estrellas, produciendo un ensanchamiento de $0,025 M_{\odot}$ por año y posteriormente su enriquecimiento químico (D’Orazi et al. 2011), luego de los primeros 1,2 Giga años de su interacción con la Galaxia. Este escenario es mostrado en la Figura 2.4. Todos los modelos dinámicos conocidos a la fecha, sugieren que Omega Centauri nació de un progenitor con una masa del orden de $10^8 M_{\odot}$, cuya órbita sufrió una evolución constante hasta llegar a la órbita estable en la que se encuentra actualmente. Es importante recalcar que estos modelos son primeras aproximaciones, y aún quedan

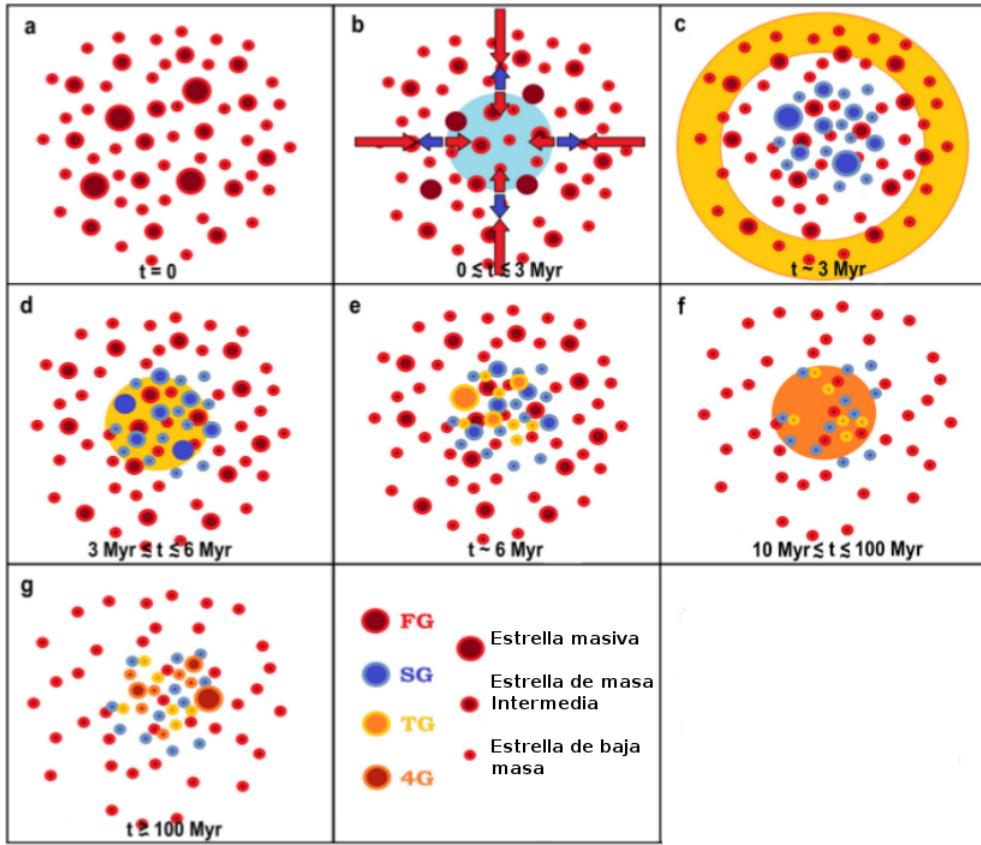


Figura 2.3: Escenario de formación de múltiples poblaciones estelares en un cúmulo globular masivo, similar a Omega Centauri. Las flechas de diferentes colores y tamaños indican la composición química asociada con cada generación de estrellas formadas y el flujo de gas en el cúmulo. Figura modificada de Valcarce & Catelan (2011).

varias variables por ser controladas en estas simulaciones, como los son la influencia de materia oscura en el proceso de evolución dinámica del progenitor, así como los modelos precisos de potenciales que deben ser usados, el número de partículas usadas para hacer lo más realista las simulaciones, etc.

2.5. Intentos por buscar los restos de la Galaxia Progenitora

En los últimos años se han realizado pocos intentos, por encontrar los restos de la galaxia progenitora asociada a Omega Centauri. Entre estos se mencionan los más

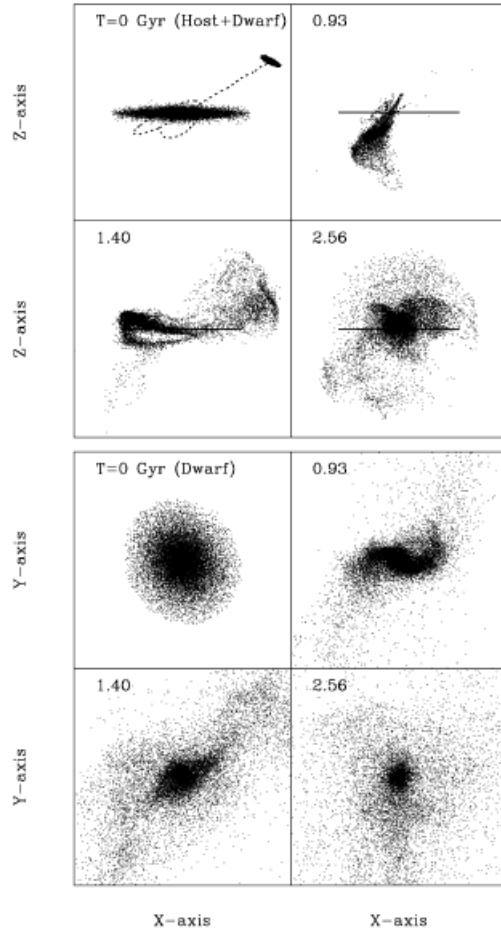


Figura 2.4: Simulación de N-cuerpos (95 mil partículas para el progenitor asociado a Omega Centauri). Tiempo de evolución del modelo de 2,56 Giga años. Los primeros 4 paneles superiores, se observa el momento antes y después del progenitor en la colisión con el disco de la Galaxia, visto en el plano (X, Z). Y en los 4 últimos cuadros, se muestra la apariencia física del progenitor antes y después de la colisión en el plano (X, Y). Imagen tomada de Bekki & Freeman (2003).

relevantes:

2.5.1. Leon et al. (2000)

En el año 2000, se llevó acabo un censo fotométrico de estrellas sobre un área de $4^\circ \times 4^\circ$, alrededor del cúmulo globular Omega Centauri (Leon et al. 2000). En este censo de estrellas se contabilizaron 7000 ± 600 estrellas de todos tipos, localizadas fuera del radio de marea ($r_t > 57$ arcmin) de Omega Centauri. La distribución espacial de esas estrellas parecieran formar dos estructuras bien definidas en forma de colas de marea, en la dirección Norte-Sur, y extendidas alrededor de 2° cada una en las direcciones mencionadas (ver Figura 2.5). Las dos estructuras formadas por el conteo de estrellas realizado por los autores, tiene una masa del orden del 1% de la masa del cúmulo. Es importante destacar que el estudio realizado por Leon et al. (2000) no separa las estrellas de campo de la posible población estelar asociada a Omega Centauri. Este procedimiento prodría acarrear problemas en la interpretación de los datos pues no se toma en cuenta la posible contaminación por estrellas de campo, la cual puede llegar a ser muy importante a lo largo de esa línea de visión. Otra posible debilidad en el trabajo de Leon et al. (2000) es que no toman en cuenta la alta extinción, la cual además es variable en la región. Esto introduce un error mayor en su método al seleccionar estrellas del diagrama color magnitud.

2.5.2. Da Costa & Coleman (2008)

En el año 2008, Da Costa & Coleman obtuvieron las velocidades radiales para 4105 estrellas de la rama de las gigantes rojas, con el objetivo de estudiar la cinemática de estas estrellas localizadas fuera del radio de marea de Omega Centauri, y verificar si existía alguna relación con estructuras externas asociadas al cúmulo. Estos trabajos se realizaron sobre un área de $2,4^\circ \times 3,9^\circ$ grados cuadros centrados en Omega Centauri (ver Figura 2.6), correpondiendo a un área menor al área explorada por Leon et al (2000). Del análisis realizado en esta región, los autores encontraron solo 6 estrellas con velocidades radiales similares a la velocidad radial del cúmulo globular Omega

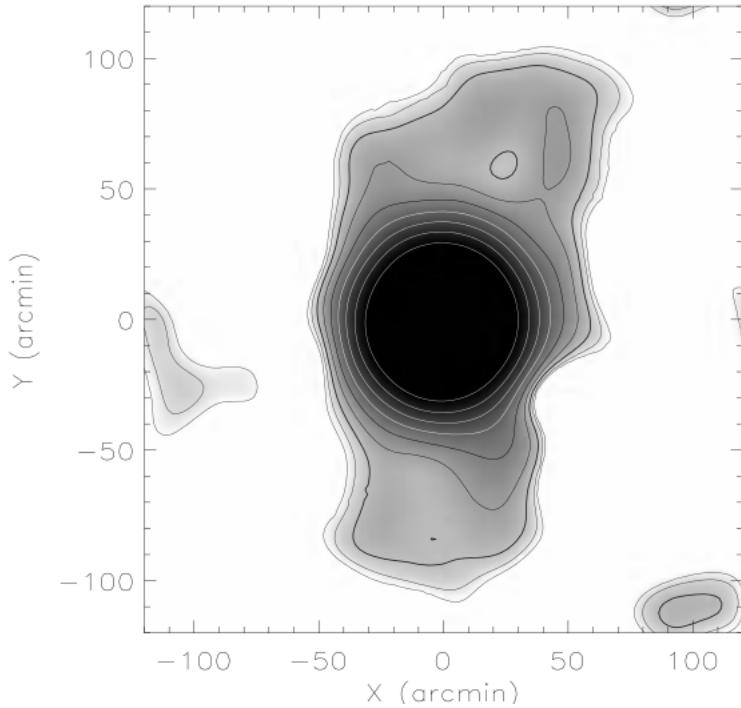


Figura 2.5: Estructuras externas en forma de colas de marea, representadas por contornos de densidad estelar alrededor de Omega Centauri. Figura tomada de Leon et al. (2000).

Centauri, y distribuidas en la periferia del radio de marea del cúmulo, por lo que no es evidente que realmente existan colas de marea en las regiones externas del cúmulo tal como lo sugieren Leon et al. (2000). La estrellas encontradas por Da Costa & Coleman (2008), representan cerca del $0,7 \pm 0,2\%$ de la masa total del cúmulo contenida entre 57 arcmin a 114 arcmin, centrados en el cúmulo, lo cual no es una prueba convincente, de la existencia de una asociación estelar en las partes más externas de Omega Centauri.

2.5.3. Trabajos en la vecindad solar

En los últimos 5 años han comenzado a aparecer sub-estructuras a diferentes latitudes galácticas, y bajo ciertas condiciones que las hacen diferentes tanto de la población que sigue la cinemática del disco y el halo de la Galaxia. Esta pequeñas

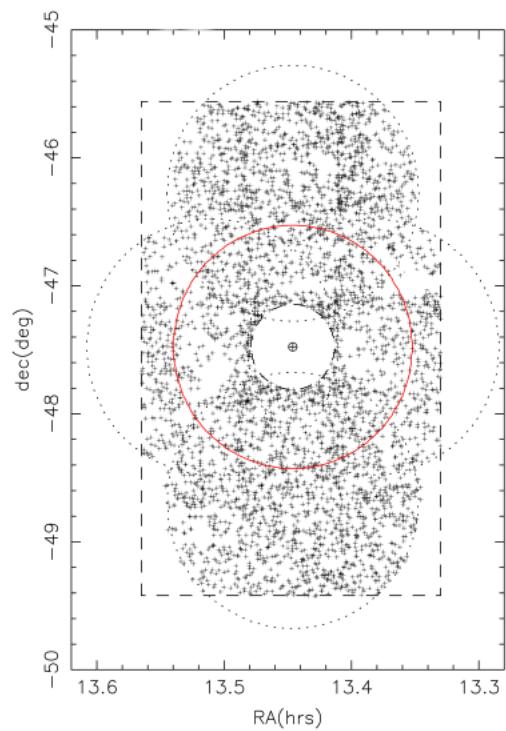


Figura 2.6: Región explorada por Da Costa & Coleman (2008) para detectar posibles estructuras en formas de colas de marea alrededor del cúmulo globular Omega Centauri, usando como trazadores estelares, las estrellas de la Rama de la Gigante Roja.

sub-estructuras, muestran una cinemática y propiedades químicas que hasta la fecha solo han sido observadas en el cúmulo globular Omega Centauri, por lo que sugiere que probablemente estuvieron en un pasado asociadas a la población del cúmulo. Se han encontrado estrellas con propiedades cinemáticas y químicas similares a las observadas en Omega Centauri distribuidas a lo largo de todo el cielo (Wylie-de Boer et al. 2010; Nissen et al. 2010; Majewski et al. 2012; Casey et al. 2013). La Figura 2.7 muestra la distribución espacial de esas estrellas. Estas poblaciones de estrellas, ubicadas a diferentes latitudes galácticas, podrían sugerir que la órbita de Omega Centauri sufrió constante evolución en el pasado, hasta colocarse en una órbita estable como la observada hoy en día, y la importancia de detectar estas sub-estructuras, coloca fuertes restricciones en los modelos de simulaciones de N-cuerpos de la evolución dinámica de la galaxia enana asociada a Omega Centauri.

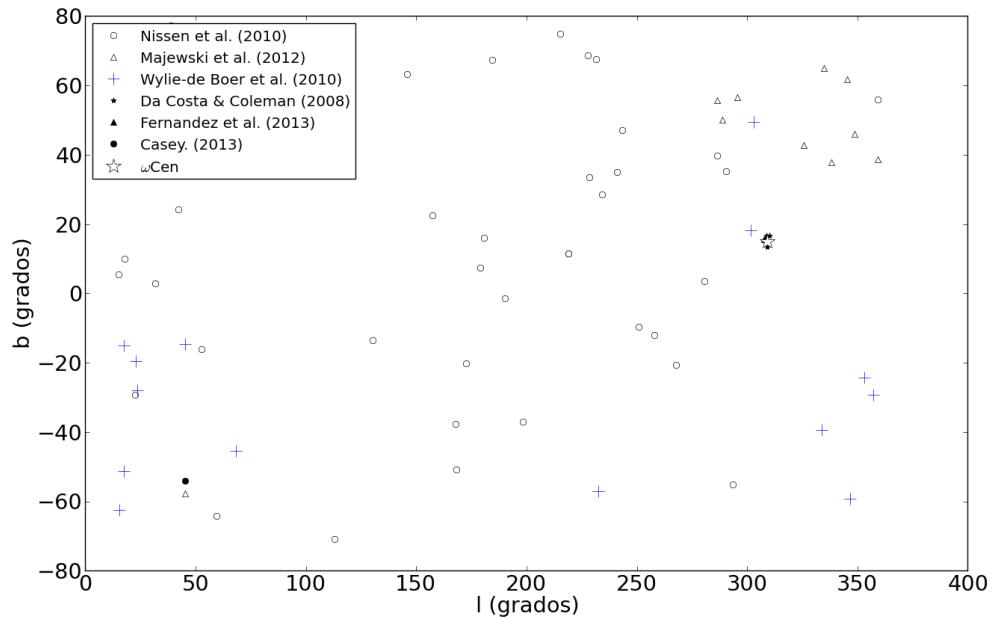


Figura 2.7: **Izquierda:** Distribución espacial en el plano (l, b), de todas las estrellas asociadas a Omega Centauri basado en lo similar de sus propiedades químicas y cinemáticas. Cada símbolo corresponde al sondeo realizado por diferentes autores.

2.6. Estrellas RR Lyrae

Las estrellas RR Lyrae son estrellas subgigantes y evolucionadas de tipo espectral A-F que se encuentran en la fase de quemado de Helio en su núcleo. El período de pulsación de estas estrellas va de los 0,2 a 1,2 días y tienen masas del orden de $0,7 M_{\odot}$ y luminosidades de $40 L_{\odot}$ a $50 L_{\odot}$ (Smith 1995). Este tipo particular de estrellas variables se encuentran distribuidas en la rama horizontal, que a su vez es interceptada por la banda de inestabilidad en los diagramas color magnitud (ver Figura 2.8). Las estrellas RR Lyrae en esta zona mantienen temperaturas superficiales en el rango de 6100 K para el extremo frío y rojo de la rama horizontal, a 7400 K para el extremo caliente y azul de la banda de inestabilidad. En esta fase evolutiva, las estrellas se encuentran en el estado de quemado de Helio para formar elementos más pesados como el Carbono, por medio de reacciones termonucleares. Adicionalmente, se destaca que estas estrellas se caracterizan por ser encontradas en todas las latitudes galácticas; son estrellas viejas y pobres en metales, lo que implican que son buenas trazadoras de las propiedades químicas y dinámicas de la población vieja (Población II), por lo que suelen ser encontradas en el Bulbo, el Disco Grueso y el Halo de la Vía Láctea. Dado que se encuentran en la rama horizontal del diagrama color magnitud, resultan tener el mismo brillo intrínseco, propiedad por la cual son usadas como estándares de luminosidad y como buenos indicadores de distancia.

Por lo general este tipo de estrellas variables son clasificadas en los sondeos en dos clases principales, llamadas tipo ab, y las tipo c (Bailey 1902).

1. **Tipo ab (RRab):** Son estrellas que presentan pulsación prolongada en el tiempo, con largos períodos que oscilan entre las 12 a 20 horas. Su brillo incrementa muy rápidamente y disminuye mucho más lento que su incremento. Este tipo

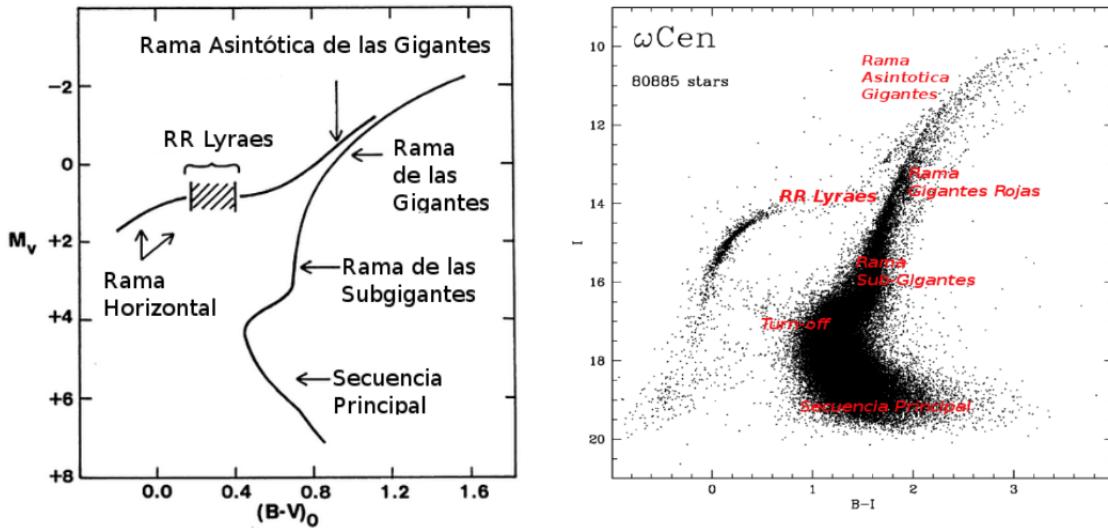


Figura 2.8: **Izquierda:** Localización de las estrellas RR Lyrae en el diagrama color magnitud; Imagen modificada de Smith (1995). **Derecha:** Localización de las estrellas RR Lyrae en el diagrama color magnitud del cúmulo globular Omega Centuari; Imagen modificada de Sollima et al. (2006).

de estrellas pulsantes se caracterizan por presentar curvas de luz asimétricas y se encuentran localizadas hacia el extremo de baja temperatura de la Rama Horizontal (borde rojo, ≈ 6100 K).

2. **Tipo c (RRc):** Estas estrellas se caracterizan por ser estrellas pulsantes de corto peíodos cuya oscilación en el tiempo esta acotada entre las 8 a 12 horas para completar el ciclo de pulsación. Además sus curvas de luz muestran una apariencia sinusoidal. Se encuentran localizadas en el extremo de altas temperaturas de la Rama Horizontal (borde azul, ≈ 7400 K) y resultan ser usualmente menos comunes que las estrellas RR Lyrae tipo ab.

2.6.1. RR Lyraes en Omega Centauri

Omega Centauri posee una rica población de estrellas RR Lyrae. Un total de 69 estrellas RR Lyrae fueron detectadas en Omega Centauri por Weldrake et al. (2007)

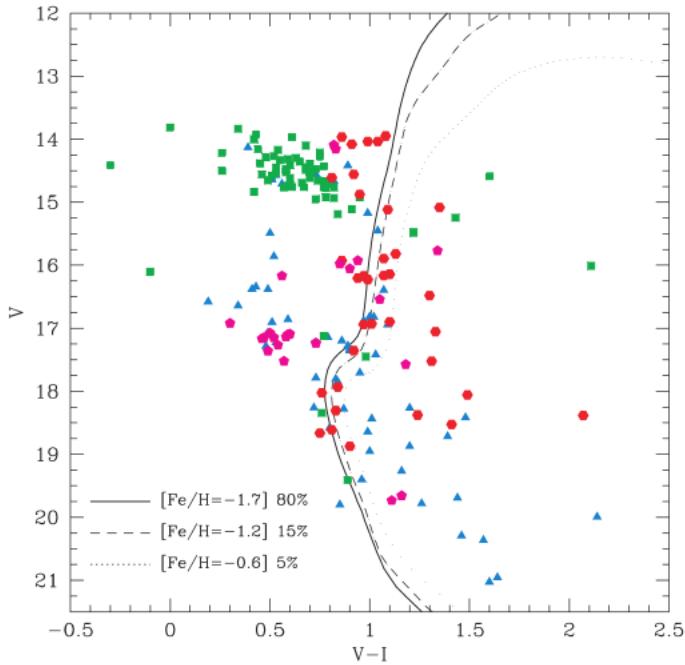


Figura 2.9: Estrellas variables en NGC5139 detectadas por Weldrake et al. (2007) superpuestas a 3 isocronas de diferentes metalicidades. Los cuadrados verde son RR Lyraes, los hexágonos rojos son variables de largo período (LPV), los triángulos azules son binarias eclipsantes (EcBs), y el resto son estrellas variables SX Phoenicis. Figura tomada de Weldrake et al. (2007).

(ver Figura 2.9) y 17 RR Lyrae fueron también previamente reportadas por Kaluzny et al. (2004) en el centro del cúmulo y la mayoría de estas localizadas en la banda de inestabilidad de la Rama Horizontal, con magnitudes $V = (14,51 \pm 0,04)$. Del número reportado por Weldrake et al. (2007), 59 % de su muestra son de tipo RRab (pulsan en el modo fundamental), y el 41 % son variables de corto período de tipo RRc. La distribución de metalicidades de estas RR Lyrae presenta un doble pico en: $[Fe/H] = -1,71$ y $[Fe/H] = -1,25$, consistente con las múltiples poblaciones estelares observadas en este cúmulo.

Capítulo 3

Datos observacionales

3.1. Observaciones

Los datos observacionales presentados en este trabajo son el resultado de 85 noches de observación realizadas durante 4 años con el telescopio Reflector de 1 m y el telescopio Jürgen Stock de 1m (Cámara Schmidt de 1,5 m). Estos telescopios se usaron con el objetivo de hacer seguimiento fotométrico de las regiones externas del cúmulo globular Omega Centauri desde el Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato, administrado por el Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA), Mérida, Venezuela. Este censo consistió en explorar 83 grados cuadrados de cielo en el hemisferio Sur, con el objetivo principal de detectar posibles estructuras en forma de colas de marea o corrientes estelares coherentes que pudieran ser evidencia de la destrucción de este objeto. Para lograr ese objetivo proponemos investigar si existen sobredensidades de estrellas RR Lyrae en las regiones que se muestran en la Figura 3.1. Las RR Lyrae son comunes en el cúmulo y por tanto son un buen trazador de las colas de marea, si existen. La región de color gris en la Figura 3.1 corresponde a observaciones entre los años 2010-2011. Esta zona comprende unos 50 grados cuadrados del cielo y resultados preliminares del análisis de esta región pueden verse en Fernández 2011¹. Estos datos fueron reanalizados en el presente trabajo para tomar en cuenta el solapamiento entre

¹Tesis de Licenciatura de la Universidad Central de Venezuela

campos que fue ignorado en el trabajo anterior y es de vital importancia para mejorar la completitud del sondeo. Los polígonos de color rojo corresponden a nuevas observaciones (2012-2013) que extienden el área por unos 33 grados cuadrados adicionales.

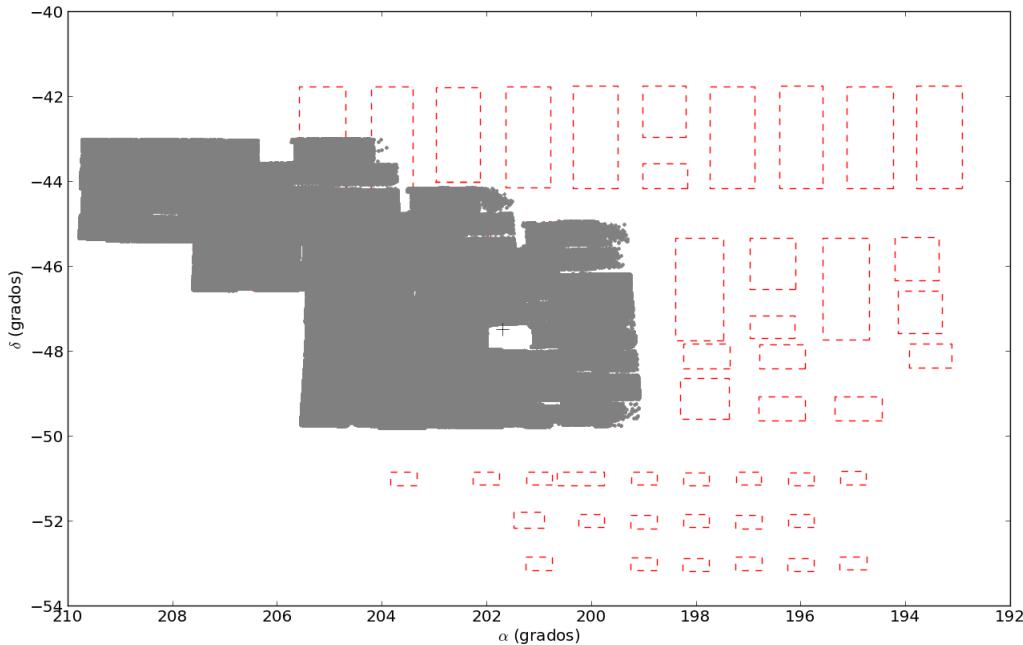


Figura 3.1: Región explorada alrededor del cúmulo globular Omega Centauri. El centro del cúmulo es indicado con un símbolo +. El área de color gris, corresponde a observaciones realizadas durante el año 2010 al 2011, y los polígonos de color rojo corresponden a nuevas observaciones realizadas durante el año 2012 al 2013.

3.1.1. Telescopio Jürgen Stock (Cámara Schmidt)

Es un telescopio tipo cámara Schmidt, con un tubo de aproximadamente 7 m de largo y una apertura principal de 1,0 metros de diámetro, que a su vez cuenta en su interior con un espejo primario de 1,5 metros de diámetro y un arreglo de 16 CCDs², conocido como cámara QUEST³ (Baltay et al. 2002) que consiste en una matriz de 4 CCDs×4 CCDs. Esta cámara tiene una cobertura angular en el cielo de

²CCDs: Charge Coupled Devices, en español es: Dispositivo de Carga Acoplada

³QUasar Ecuatorial Survey Team

aproximadamente $5,5^{\circ}$ grados cuadrados. Cada CCD posee un arreglo de 2048 píxeles \times 2048 píxeles y una resolución angular de 1,034 segundos de arco/píxel. La razón focal para este telescopio es ($f/2,1$), con una distancia focal de aproximadamente 3,3 metros. Esta cámara cubre un área angular de $2,3^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ en el cielo y cuenta con un soporte frontal de filtros acoplados de tal manera que dividen a la cámara en 4 arreglos de CCDs bien definidos (ver más detalles en la Figura 3.2). Este telescopio posee dos modo de operación que consisten en dos estilos de sincronización entre el movimiento del telescopio y la lectura de los datos en el CCD. El modo Driftscan básicamente consiste en fijar el telescopio en una posición y posteriormente integrar las observaciones en intervalos de tiempo de aproximadamente 132 segundos que es el tiempo necesario para leer el CCD a la misma velocidad con la que se mueven las estrellas en el cielo. La ventaja de este metodo se basa en tomar secuencias continuas de imágenes en un área amplia del cielo y en múltiples filtros durante la misma noche, pero su mayor desventaja es que esta optimizado para el observar en el rango de declinación de: $-6^{\circ} < \delta < 6^{\circ}$. Por otro lado, el modo Guiado ó Apuntado consiste en hacer seguimiento sideral del campo estelar de cualquier región del cielo. Este último método es el usado en este trabajo pues Omega Centauri se encuentra a una declinación Sur de -47° grados y está lejos del rango permitido para hacer observaciones driftscan. Para este trabajo, la mitad de la cámara se usó con filtros V y la otra mitad con filtros I.

3.1.2. Telescopio Reflector

El telescopio Reflector del OAN, con un tubo de aproximadamente 5 metros de longitud, que cuenta con una apertura principal y un espejo primario, ambos de 1 metro de diámetro. En el plano focal del equipo se encuentra un detector CCD de 2048 píxeles \times 2048 píxeles. En la configuración $f/5$, la luz recorre una distancia focal de 5 metros, desde el punto en que es reflajada en el espejo primario hasta llegar al plano focal del telescopio, cubriendo un campo de visión en el cielo de 19 arcmin \times

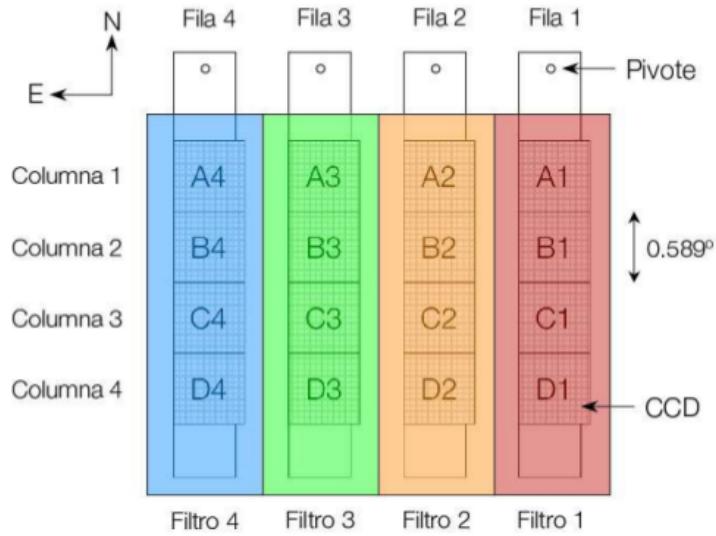


Figura 3.2: Figura ilustrativa del arreglo de CCDs que forman la Cámara QUEST. Imagen tomada de Mateu 2011.

19 arcmin, y una resolución angular de 0,557 arcsec/píxel. Esta configuración es ideal para cubrir una zona relativamente amplia del cielo (aunque no tan grande como en la Schmidt) siendo efectiva para realizar estudios de variabilidad.

El telescopio Reflector de 1 metro opera en modo Guiado ó Apuntado, y actualmente cuenta con un sistema automatizado para hacer seguimiento entre diferentes campos con un tiempo de retardo de no menos de 1 minuto sino implica movimientos del telescopio mayores a 10 grados. Las observaciones se planificaron de tal modo que el telescopio Reflector cubriera zonas del cielo que son imposibles de alcanzar, por razones mecánicas por el telescopio Jürgen Stock, lográndose de esta manera cubrir campos localizados más al sur. El uso de ambos telescopios simultáneamente permite cubrir un área mayor en corto tiempo, optimizando las pocas noches despejadas con las que cuenta el OAN.

En la siguiente tabla se muestran los rangos del cielo explorados por cada telesco-

Tabla 3.1: Zonas cubiertas por ambos telescopios alrededor de Omega Centauri.

Telescopio ^a	Configuración	α ($^{\circ}$)	δ ($^{\circ}$)	Área (grado cuadrados)
Jürgen Stock	f/2,1	$192 < \alpha < 210$	$-50 < \delta < -41$	79,59
Reflector	f/5	$194 < \alpha < 204$	$-54 < \delta < -50$	3,41

^a Ambos telescopios fueron operados en modo de observación guiado.

pio y el área cubierta por estos. Cada campo se observó múltiples veces en diferentes días. También es importante mencionar que cada campo fue observado repetidamente con dos filtros (V e I), con el objetivo de poder construir no solo diagramas color magnitud sino también series de tiempos que permitan la identificación de estrellas RR Lyrae. Sin embargo algunos campos fueron observados con un solo filtro. Esto es debido a la configuración de la cámara QUEST cuyos extremos en la secuencia de cobertura espacial hacen que no pueden ser observados por diferentes filtros ver ejemplo en la Figura 3.3.

Dada la localización de Omega Centauri en el cielo ($\alpha = 201,69700^{\circ}$ y $\delta = -47,47947^{\circ}$) y la latitud del observatorio (Latitud= $+8^{\circ}47'11''$) en Llano del hato, el cúmulo nunca está a angulos cenitales pequeños que impliquen masas de aire menores a 1,5. Las observaciones se hicieron de tal manera que la masa de aire nunca fuera mayor a 2,0.

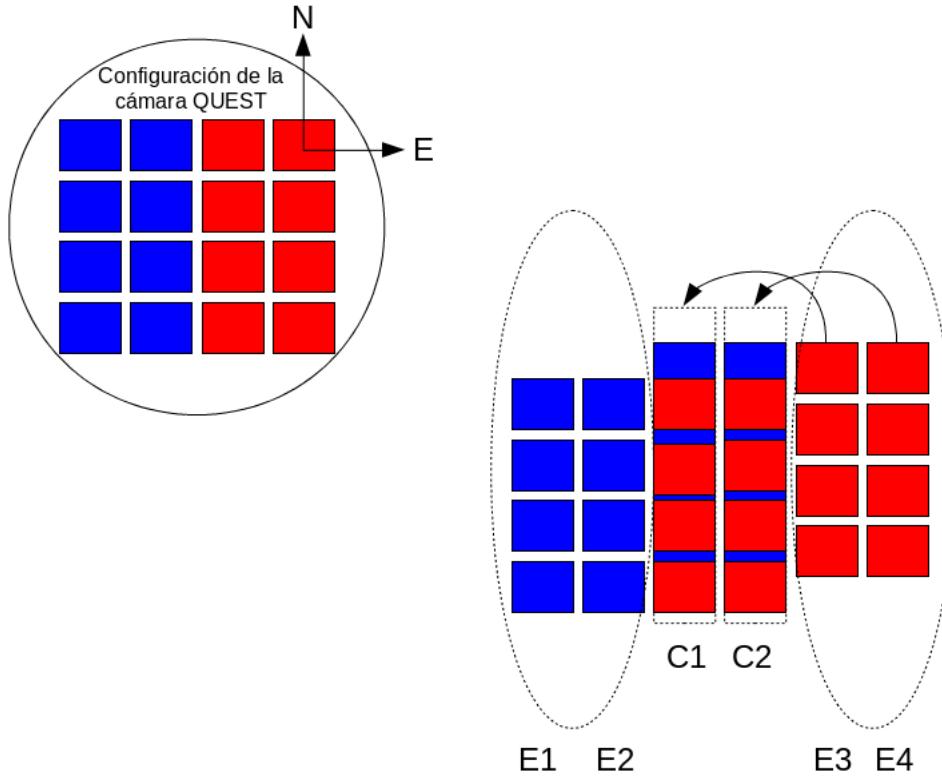


Figura 3.3: Ejemplo de la configuración de las observaciones realizadas con el telescopio Jürgen Stock. Extremo superior izquierdo, el arreglo de CCD de la cámara QUEST con sus respectivo juego de filtros (Rojo: Filtro I y en Azul: Filtro V). Supongamos que se quieren observar los campos C1 y C2 en los filtros I y V. La secuencia comienza desde el Este al Oeste. Inicialmente se observan los campos C1 y C2 en el filtro V. Posteriormente se mueve el telescopio de tal manera que los campos C1 y C2 sean observados con los filtros I. Todos los campos EX, X=1,2,3,4 son observados entonces en una sola banda. Sin embargo, no significa que no sean útiles para nuestro trabajo, pues se pueden obtener series de tiempo de estrellas en esa zona.

3.1.3. Procesamiento inicial de los datos

El proceso de reducción de las imágenes empleadas en el presente trabajo corresponden a las técnicas estándares empleadas en astronomía y en particular a las usadas en el trabajo preliminar que hicimos en Omega Centauri (Fernández 2011) con observaciones del telescopio Jürgen Stock. A continuación se describen brevemente:

1. **Punto Cero del detector CCD ó Nivel de Pedestal:** Consiste en caracterizar el nivel de electrones producidos por la electrónica acoplada a los detectores (CCDs), para lo cual se toman imágenes con tiempos de exposición $t=0$ segundos. Estas imágenes permiten medir en Unidades Analógicas Digitales (ADU) el nivel de cuentas que es generado en cada píxel de la imagen sin ser expuesta a la luz. A esta imagen se le conoce como BIAS. El nivel promedio de cuentas de estas imágenes en ambos telescopios es entre 1800 ADU y 2000 ADU. En cada noche de observación usualmente se toman alrededor de 10 Bias. Posteriormente estas imágenes son combinadas usando una media estadística y la imagen resultante es sustraída de las imágenes de cielo y de los mapas de sensibilidad. Para las imágenes del telescopio Júrgen Stock no es necesario usar este tipo de imágenes para caraterizar el nivel de pedestal, dado que en la misma se generan unas columnas de 100 píxeles adicionales no expuestas a la luz. Esta región, conocida como *overscan*, da información del nivel de pedestal al momento de la observación.
2. **Mapa de sensibilidad:** Es una imagen que se genera al exponer a la luz de manera uniforme los detectores CCDs. La importancia de generar este tipo de imagen radica en el hecho de que todos los píxeles que forman cada detector CCD no poseen la misma respuesta a la luz (eficiencia cuántica). Para corregir por este efecto las imágenes del cielo deben ser divididas por estos mapas de sensibilidad (Flats en inglés). Al igual que los Bias, es usual obtener 10 imágenes flat por noche. Los flats deben hacerse en cada banda fotométrica usado en el proyecto, pues estos son sensibles a la longitud de onda.

En el OAN existen dos técnicas para generar los mapas de sensibilidad. Ambas técnicas tienen sus ventajas y desventajas, dependiendo del objetivo científico

del proyecto.

- **Flat de Cúpula:** Esta imagen es originada al iluminar una pantalla que es colocada frente a la apertura del telescopio. La mayor desventaja de esta técnica es que a veces es difícil iluminar la pantalla de manera homogénea. En ese caso se genera un gradiente de luminosidad sobre el detector. Esto ocurre en el telescopio Jürgen Stock.
- **Flat Sintético:** Son imágenes generadas con las mismas observaciones de cielo, en campos de baja densidad estelar. Estas imágenes son combinadas estadísticamente usando la mediana, para de esta manera eliminar las estrellas y obtener una imagen más homogénea posible. Para el presente trabajo se usaron alrededor de 35 imágenes de cielo de diferentes campos y con los mismos tiempos de integración.

Para el proceso de Procesamiento, Fotometría y Astrometría de las imágenes del telescopio Júrgen Stock, se usó un conjunto de programas desarrollados por la Dra. Cecilia Mateu en el 2007. Para la imágenes del telescopio Reflector se desarrollaron programas como parte de esta tesis de Maestría. Este último conjunto de programas están escritos en lenguaje de programación Python que integran otros programas externos como IRAF⁴, WCSTools, etc. Los programas del telescopio Reflector fueron desarrollado para el libre acceso y son mantenidos por el autor en el siguiente repositorio: https://github.com/Fernandez-Trincado/Reduction_Reflector1m_OAN. Actualmente, están siendo usados por otras personas que tienen proyectos en este telescopio.

⁴ Image Reduction and Analysis Facility

3.2. Fotometría

Este proceso consiste en medir el flujo de energía emitido por cada fuente en el cielo. Los fotones emitidos por cada estrella siguen una distribución espacial aproximadamente gaussiana cuya distribución de energía cae radialmente desde el centro (Figura 3.4). El brillo o magnitud de una estrella (m_λ) sigue una relación logarítmica con el flujo de energía de la estrella (f_λ), acorde a la relación de la ecuación 3.1 (también conocida como Ley de Pogson).

$$m_\lambda = k - 2,5 \log(f_\lambda) \quad (3.1)$$

donde k es una constante cuyo valor se calibra con una estrella de magnitud intrínseca igual a cero, o en la práctica, con un conjunto de estrellas de brillo conocido.

3.2.1. Fotometría Instrumental

Para medir el brillo de una estrella usamos una técnica conocida como Fotometría de Apertura que consiste en obtener sobre cada fuente (estrella), de cada imagen, el número de cuentas dentro de un círculo de cierto radio, conocido como apertura. La apertura se escoge de tal manera que incluya la mayor parte, o toda, la luz de la estrella. Dentro de esta apertura se está midiendo no solo el brillo de las estrellas sino también el brillo del fondo del cielo (FC), el cual debe ser eliminado. Para ello se define un anillo concéntrico cuyo radio interno debe estar lo suficientemente lejos del área que cubre la estrella. El valor del fondo de cielo posteriormente será sustraído del flujo medido de la apertura estelar. El radio de apertura usado en este trabajo se definió como el promedio del FWHM⁵ sobre toda la imagen. Para las imágenes del

⁵Full Width Half Maximum, o radio a la mitad del pico de la Gaussiana

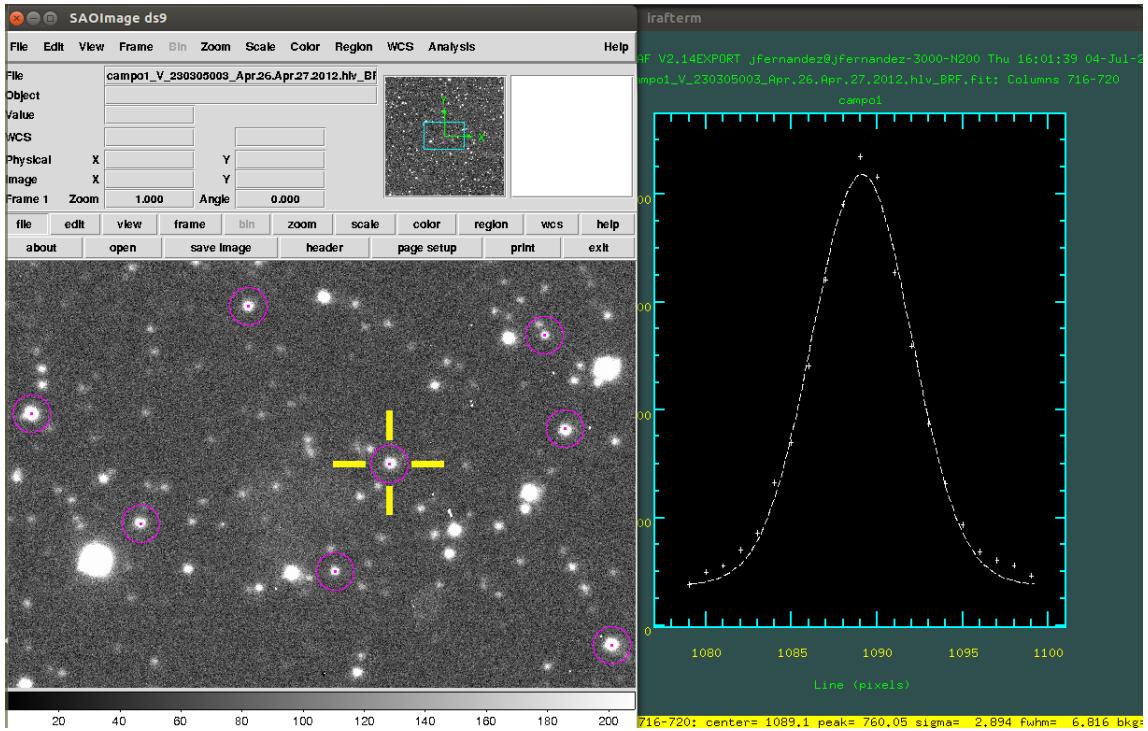


Figura 3.4: Representación visual del perfil de luz de la estrella indicada por las líneas de color amarillo. El eje vertical de la grafica derecha, corresponde al brillo de la estrella en unidades de ADU y el horizontal al número de líneas en unidades de píxeles en la imagen.

telescopio Jürgen Stock el radio interno del anillo se fijó en 10 píxeles con un ancho de 5 píxeles y para las imágenes del telescopio Reflector el radio de apertura se estimó para cada imagen como $\langle \text{FWHM} \rangle / 0,557$ píxeles. Para estimar el brillo instrumental se uso la tarea DAOPHOT de IRAF, que usa como base, la siguiente ecuación:

$$m = -2,5 \log \left(\sum_j^n C_j - A_{ap} \times FC \right) + ZP + 2,5 \log(t_{exp}) \quad (3.2)$$

con la incertidumbre calculada como se indica:

$$\Delta m = \left[\left(\frac{\sum_j^n C_j - A_{ap} \times FC}{epadu} \right) + A_{ap} \sigma_c^2 \left(1 + \frac{A_{ap}}{A_c} \right) \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

donde $ZP = 25$ es el punto cero instrumental tomado por IRAF; C_j es el número de cuentas en cada píxel dentro de la apertura; A_{ap} es el área de la apertura en unidades de píxeles; t_{exp} es el tiempo de exposición empleado en la observación; FC es la moda del fondo del cielo en el anillo en unidades de ADU; A_c es el área del anillo del fondo del cielo en unidades de píxeles; σ_c es la desviación estándar de los píxeles en el fondo del cielo y $epadu$ la conversión de electrones a ADU que viene dada por la electrónica del CCD.

3.2.2. Calibración Fotométrica

La calibración fotométrica se hizo en dos paso. El primer paso consiste en calcular magnitudes promedios instrumentales provenientes de todas las observaciones repetidas del mismo campo. El segundo paso consiste en transformar esas magnitudes promedio al sistema estándar fotométrico.

En primer lugar se seleccionaron todos aquellos campos que fueron observados múltiples veces por ambos telescopios, y fueron clasificados en grupos, tales que, cada grupo depende de una imagen de referencia. La imagen de referencia es una imagen de alta calidad que usualmente se escoge como aquella que posee la mayor cantidad de estrellas con condiciones de cielo óptimas (imagen con el menor FWHM). Las estrellas en esta imagen de referencia se ubican, mediante sus coordenadas (α y δ , ver sección 3.3) en todas las otras observaciones de la misma zona del cielo. Para cada una de estas observaciones se obtiene la diferencia en brillo instrumental entre la i-ésima estrella y la misma estrella en la imagen de referencia. Se aplica un $3-\sigma$ clipping (promedio

cortado) sobre las diferencias con el objetivo de evitar todos aquellos valores desviados de su distribución normal que pueden ser productos de variaciones externas. Estas diferencias son aplicadas a cada observación para así tener todas la magnitudes en el mismo sistema que la imagen de referencia. Finalmente se obtiene para cada campo un catálogo maestro que contiene el promedio instrumental del brillo de cada estrella y su desviación estándar. La Figura 3.5 muestra la desviación estándar de cada estrella como función de la magnitud para un campo típico. Este tipo de gráficos definen los errores típicos en la fotometría.

El paso final consiste en llevar estas magnitudes promedios a magnitudes reales, por lo que se comparan las magnitudes instrumentales con catálogos de la literatura de estrellas con brillos conocidos. Se calculan las diferencias respecto a estos catálogos de manera similar al paso anterior, calculando un $3-\sigma$ clipped mean. Los catálogos utilizados fueron DENIS⁶ para todo los campos en filtro I y APASS⁷ para todos los campos en el filtro V. Una breve descripción de estos catálogos se encuentra en la sección 3.3.1. La calibración se hizo sólo por punto cero y no se usó el término de color. La expresión para obtener las magnitudes finales es:

$$m_{cal} \pm \Delta m_{cal} = (m - \xi) \pm \sqrt{(\sigma)^2 + (\sigma_\xi^2/N)} \quad (3.4)$$

donde m_{cal} y Δm_{cal} es la magnitud calibrada y su error para cada estrella de cada campo; m y σ son la magnitud instrumental promedio y desviación estándar en el catálogo maestro; ξ es el punto cero con respecto al catálogo de la literatura; σ_ξ^2 , es la desviación estándar de las diferencias obtenidas al comparar N estrellas con los

⁶Deep Near Infrared Survey of the Southern Sky

⁷The American Association of Variable Star Observers Photometric All-Sky Survey

catálogos de la literatura.

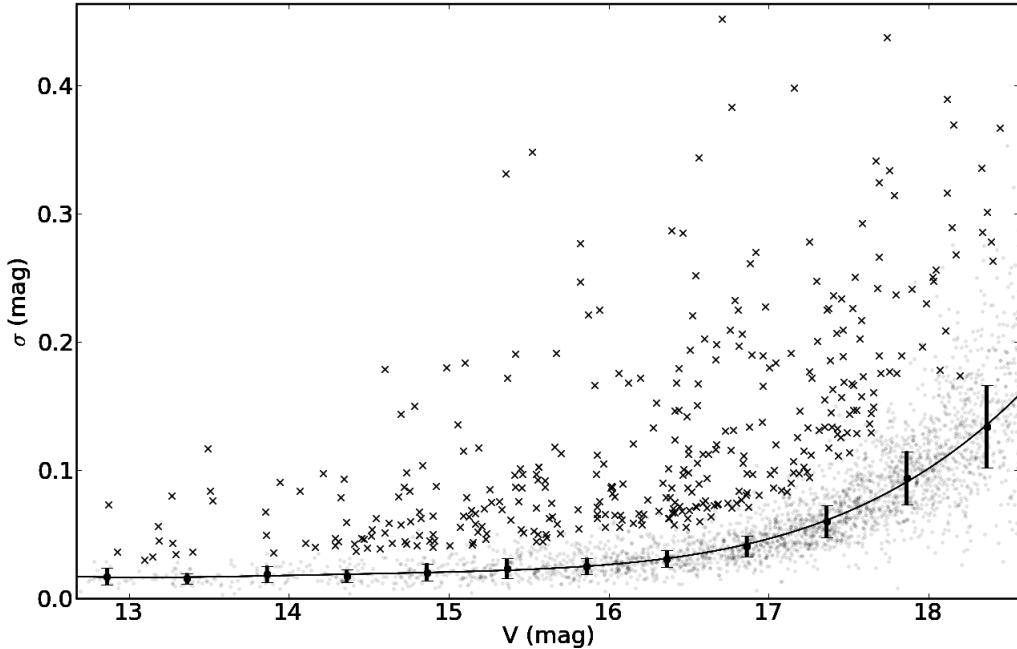


Figura 3.5: Curva de errores σ y magnitud V para un campo dado. Los puntos negros que siguen la curva corresponden al promedio por bin de 0,5 magnitudes y las barras de error son la desviación estándar. Los símbolos indicados con “x“ indican candidatas a estrellas variables, que no siguen la distribución típica de errores.

3.3. Astrometría

La astrometría consiste en asignar coordenadas de cielo (α, δ) a coordenadas (x, y) medidas en el CCD. Esto se logra proyectando tangencialmente en el centro del detector el campo del cielo observado, usando como referencia un catálogo astrométrico. Tanto para las observaciones del telescopio Reflector como las observaciones del telescopio Jürgen Stock se usó como referencia el catálogo astrométrico UCAC4⁸ (Zacharias et al. 2013, ver sección 3.3.1). Para la calibración astrométrica se usaron dos conjuntos

⁸The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog

de programas diferentes, que se describen a continuación:

1. Imágenes del telescopio Jürgen Stock

Se usó el programa **astrometry.guided.v3.pl** desarrollado en el CIDA por la Dra. Cecilia Mateu en el año 2007 para asignar coordenadas de cielo a objetos celestes en imágenes obtenidas en observaciones guiadas con el telescopio Jürgen Stock (Mateu et al. 2009). El programa fue desarrollado para tolerar problemas de apuntado del telescopio menores a 0,5 grados tanto en ascensión recta como en declinación. Con el objetivo de obtener la mejor solución astrométrica se busca la mínima distancia entre la i-ésima estrella de la imagen en coordenadas (x_i, y_i) y la j-ésima estrella del catálogo UCAC4. Este proceso se repite iterativamente eliminando estrellas con diferencias muy grandes hasta alcanzar una solución global cuyo resultado debe ser menor a 1 segundo de arco, tratando de conservar el máximo numero de coincidencias entre los objetos de la imagen y el catálogo UCAC4. La proyección tangente para transformar las coordenadas (α, δ) del cielo a coordenadas (x, y) en el detector viene dada por las siguientes ecuaciones, tomadas de Hiltner (1962):

$$x = \frac{\cos(\delta)\sin(\Delta\alpha)}{\sin(\delta)\sin(\delta_0) + \cos(\delta)\cos(\delta_0)\cos(\Delta\alpha)} \quad (3.5)$$

$$y = \frac{\sin(\delta)\cos(\delta_0) - \cos(\delta)\sin(\delta_0)\cos(\Delta\alpha)}{\sin(\delta)\sin(\delta_0) + \cos(\delta)\cos(\delta_0)\cos(\Delta\alpha)} \quad (3.6)$$

donde $\Delta\alpha = (\alpha - \alpha_0)$ y α_0 y δ_0 son la ascensión recta y declinación del punto de tangencia; α y δ son las coordenadas de cielo de la estrella.

2. Imágenes del telescopio Reflector

Para las imágenes de este telescopio, se uso el programa **AstrometryV2.py** desarrollado por el autor como parte de esta tesis y disponible en el repositorio mencionado anteriormente. Este programa integra el programa WCStools⁹ (Mink 2002) con tareas de Python para realizar la correcta calibración astrométrica de imágenes obtenidas en observaciones en modo guiado. Similar al programa anterior, este programa usa una proyección tangente para encontrar la solución a la matriz astrométrica. El programa, fue desarrollado para resolver problemas de apuntado del telescopio que en este caso pueden llegar a ser hasta de 1 grado.

3.3.1. Catálogos de Referencia

A continuación se describen brevemente los catálogos de referencia fotométricos y astrométricos utilizados para calibrar nuestros datos.

- **DENIS**¹⁰

Es un sondeo astronómico del hemisferio sur en una banda fotométrica optica y dos bandas fotométricas infrarrojas ($J = 1,25\mu\text{m}$, $K = 2,16\mu\text{m}$ e $I = 0,8\mu\text{m}$ respectivamente). Este sondeo es conducido en un telescopio de 1 m localizado en el observatorio de La Silla en Chile, y es mantenido y controlado por un consorcio Europeo. El sondeo cubre un área en el cielo del hemisferio sur de alrededor de 16700 grados cuadrados, e incluye toda la zona explorada en este trabajo.

- **APASS**¹¹

⁹ World Coordinate Systems

¹⁰<http://cdsweb.u-strasbg.fr/denis.html>

¹¹<http://www.aavso.org/apass>

Es un sondeo conducido en 5 bandas fotométricas: B, V, g', r' y i'. El catálogo es completo entre magnitudes 10 a 17. En su versión mas reciente (Data Release 7) suministra la fotometría de alrededor 50 millones de objetos de 97 % del cielo. El catálogo es mantenido por la AAVSO¹².

- **UCAC4**¹³

Es una compilación de estrellas de todo el cielo cubriendo principalmente el rango de magnitudes desde 8 a 16 y contiene posiciones astrométricas con una precisión del orden de 15 a 20 mili-segundos de arcos. Este catálogo es mantenido por el USNO¹⁴.

- **SPM4**¹⁵

Es un catálogo astrométrico que tiene información de movimientos propios de alrededor de 103 millones de estrellas, galaxias y cúasares. Estos movimientos propios son medidos con una precision de 2-3 mili-segundos de arco por año y es completo hasta magnitud V=17,5. Este catálogo cubre esencialmente casi todo el cielo del hemisferio sur a declinaciones menores de $\delta < 20^\circ$. Este sondeo es conducido por la Universidad de YALE.

- **2MASS**¹⁶

Es un catálogo en el infrarrojo cercano ($J = 1,25\mu\text{m}$, $H = 1,65\mu\text{m}$ y $K_s = 2,17\mu\text{m}$) del 70 % del cielo. Las observaciones son realizadas con dos telescopios de 1,3 m, localizado uno en el Mt. Hopkins, Arizona y otro en el Observatorio Inter-American de Cerro Tololo, Chile. Este catálogo fue usado para obtener

¹²American Association of Variable Star Observers

¹³<http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/ucac>

¹⁴US Naval Observatory

¹⁵<http://www.astro.yale.edu/astrom/spm4cat/spm4.html>

¹⁶<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>

un color (por ejemplo, I-J) en aquellas zonas del cielo que fueron observadas en una sola banda fotométrica. El color es importante para detectar eficientemente estrellas RR Lyrae.

3.4. Catálogo Maestro

El resultado final de todo el proceso de reducción (procesamiento de imágenes fits) y calibración (fotometría y astronometría) consiste en la creación de un catálogo general que contiene 575691 estrellas distribuidas en 83 grados cuadrados del cielo. El catálogo es completo en el filtro I hasta magnitud 16,9 y en el filtro V hasta magnitud 18,1, como se muestra en la distribución de magnitudes en la Figura 3.6. Los límites en magnitudes en ambos filtros son: I=(11,5;19,0) y V=(12,0;20,0). En este catálogo se compiló toda la información existente para las estrellas de la zona, incluyendo no solo las medidas realizadas con nuestras observaciones, sino también información proveniente de otros catálogos en la literatura. Este catálogo (no para uso público) es la fuente principal para el análisis realizado en esta tesis.

El catálogo esta organizado como se indica a continuación:

1. Posee el ID, la ascensión recta y declinación (α, δ) de cada estrella en J2000.
2. La posisión X_i, Y_i en el sistema de refencia del cúmulo globular Omega Centauri y el radio r desde el centro del cúmulo. Las columnas 4 y 5, fueron calculadas siguiendo las ecuaciones 3.7 y 3.8, ambas tomadas de Van de Ven et al. (2006).

$$X_i = -r_o \cos(\delta_o) \sin(\alpha_i - \alpha_o) \quad (3.7)$$

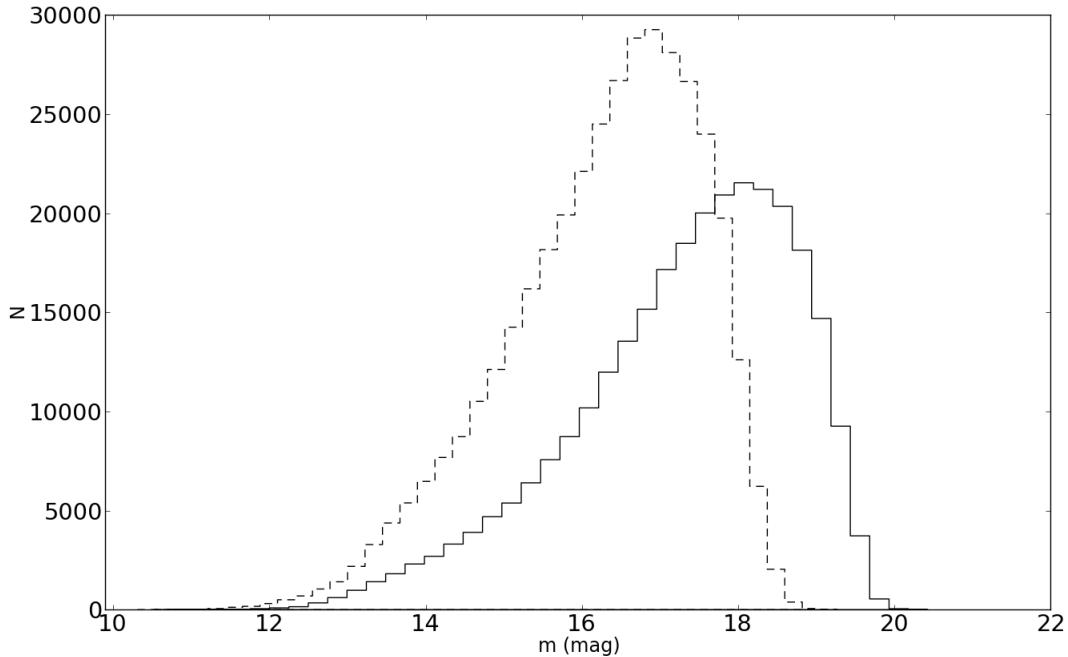


Figura 3.6: Distribución de magnitudes de las estrellas del catálogo. Histograma con líneas discontinuas representan la distribución de magnitudes para estrellas observadas en el filtro I y la línea continua para estrellas observadas en el filtro V.

$$Y_i = -r_o[\sin(\delta_i)\cos(\delta_o) - \cos(\delta_i)\sin(\delta_o)]\cos(\alpha_i - \alpha_o) \quad (3.8)$$

donde $r_o = 10800/\pi$ es una constante para que (X, Y) estén en unidades de minutos de arco (arcmin), (α_o, δ_o) corresponde a las coordenadas centrales del cúmulo globular Omega Centauri, tomadas de Harris et al. (2010) y (α_i, δ_i) corresponden a las coordenadas de i-ésima estrella del catálogo.

3. Las magnitudes V e I medidas en nuestra observaciones, y J, H y K tomadas del catálogo 2MASS.
4. El número de observaciones y errores de la fotometría en los filtro V e I.
5. Los movimientos propios en α y δ y sus errores, así como el movimiento

propio total (ver ecuación 3.9). Estos valores fueron tomadas del catálogo SPM4, con una tolerancia de 5 segundos de arco en la relación cruzada.

$$\mu = [\mu_{\alpha}^2 \cos(\delta)^2 + \mu_{\delta}^2]^{1/2} \quad (3.9)$$

6. La extinción A_V , A_I (ambos valores calculados de las ecuaciones 4.9 y 4.10) y el enrojecimiento E_{B-V} correspondiente de la Figura 4.2.
7. Los colores V-I, I-K, J-K y I-J.

En la Figura 3.7 se muestra el número de observaciones obtenidas en nuestro catálogo y en las dos bandas fotométricas usadas.

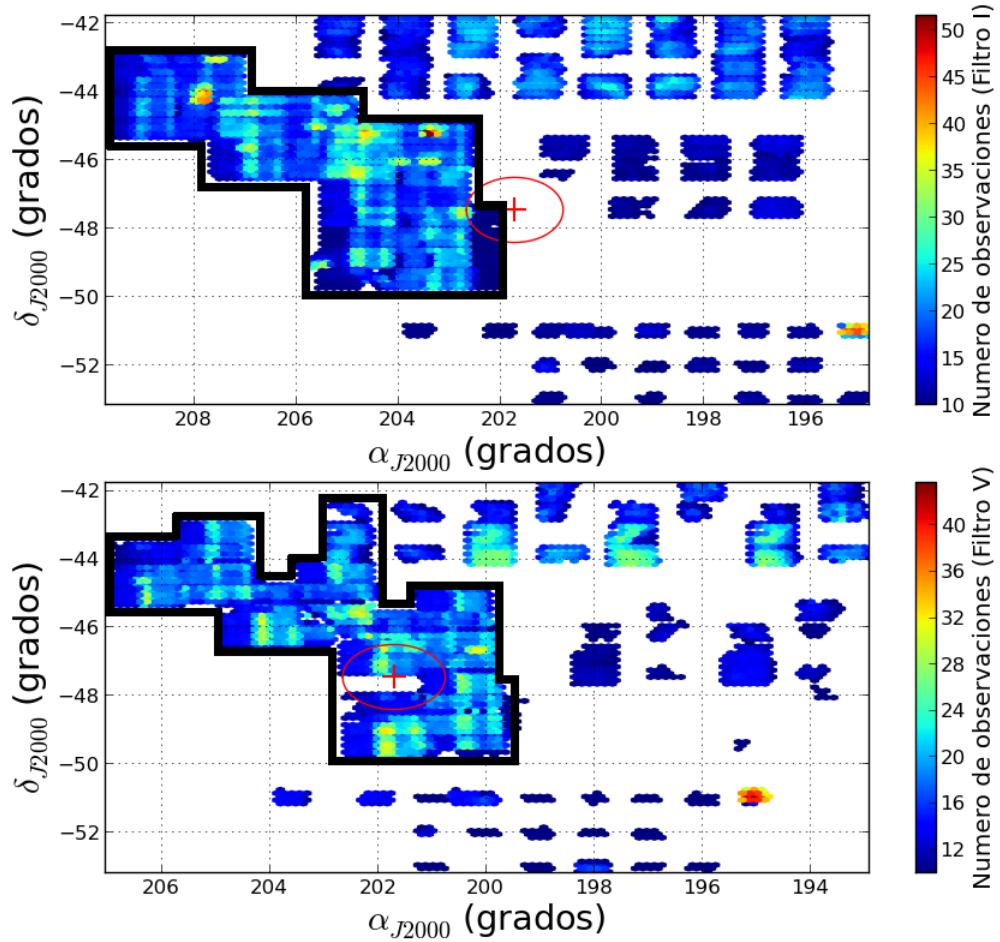


Figura 3.7: Densidad de las observaciones en los alrededores del cúmulo globular Omega Centauri, en las dos bandas fotométricas usadas en el sondeo fotométrico (filtro V y filtro I). La cruz y la circunferencia de color rojo indican el centro del cúmulo y el radio de marea de $r_t = 57$ arcmin. Los polígonos negros encierran la zona donde la búsqueda de RR Lyraes fue mas efectiva ya que tenía mayora número de observaciones y/o mejor cadencia en las observaciones.

Capítulo 4

Búsqueda de Estrellas RR Lyraes

El presente trabajo tiene como objetivo general detectar nuevas corrientes estelares formadas por estrellas RR Lyrae que pudieran formar parte de estructuras externas asociadas con Omega Centauri, como evidencia de una posible galaxia enana que sufrió los eventos de destrucción por fuerzas de marea de la Vía Láctea. Para tal objetivo, se seleccionaron todas aquellas estrellas variables del catálogo maestro, para lo cual se calculó la probabilidad de que cada fuente sea variable, seleccionando aquellos objetos con un grado de confianza dado por la probabilidad $P(\chi^2) < 0,01$ (Vivas et al. 2004), el cual corresponde a un 99 % de nivel de confianza de ser variable. Se aplico un test χ^2 (ver ecuación 4.1) sobre las magnitudes instrumentales de cada i-ésima fuente en cada banda fotométrica. En el caso de aquellas estrellas que fueron observadas en ambas bandas (V e I) y que contenían suficiente número de medidas (mayor a 10 observaciones), el criterio del χ^2 fue aplicado independientemente en cada banda fotométrica.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(m_i - \langle m \rangle)^2}{\nu \sigma_i^2} \quad (4.1)$$

Se seleccionaron como posibles candidatas a estrellas RR Lyrae todas aquellas que cumplen los siguientes criterios:

1. Ser variables ($P(\chi^2) < 0,01$).

2. Amplitud de variabilidad mayor a 0.2 mag.
3. Tener un mínimo de 10 observaciones.
4. Tener un color $(V-I) \leq 0.95$ mag ó $(I-J) \leq 0.7$ mag (ver Figura 5.3). Estos límites fueron determinados a partir de las librerías estelares de Lejeune et al. (1998) y considerando la extinción estelar variable en todo el sondeo. Con estos límites de color se busca aislar estrellas de tipo espectral entre A6 y F7, que son los esperados para estrellas RR Lyrae.

Usando estos criterios, resultaron ser estrellas variables y con un alto grado de posibilidad de ser estrellas RR Lyrae cerca de un 14 % de la muestra tanto para la exploración realizada en la banda fotométrica I como para la banda V. Este porcentaje se reduce aún mas con el siguiente análisis basados en sus curvas de luz.

4.1. Cálculo de Períodos

Los períodos de las estrellas variables candidatas a estrellas RR Lyrae se calcularon con el algoritmo de Lafler & Kinman (1965), que consiste en hacer pruebas de períodos en el intervalo de 0,15 días a 0,9 días, como se describe en Vivas et al. (2004). Para cada valor de período de prueba, las observaciones son ordenadas en fase creciente con el fin de calcular el parámetro Θ . Este parámetro mide la distancia (en magnitud) entre dos puntos consecutivos del arreglo de observaciones. El valor correcto del período es aquel en el que la suma de las distancias entre dos puntos consecutivo sea el mínimo. Tanto la fase (ϕ) de las observaciones como el parámetro Θ , se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$\phi = \left[\frac{HJD}{P} \right] - \text{int} \left[\frac{HJD}{P} \right] \quad (4.2)$$

donde HJD es la fecha juliana heliocéntrica de cada observación y P es el período de prueba.

$$\Theta = \frac{\sum_i (m_i - m_{i+1})^2}{\sum_i (m_i - \langle m \rangle)^2} \quad (4.3)$$

En nuestra muestra inicial de estrellas variables puede haber estrellas no-periódicas o estrellas con períodos fuera del rango indicado por lo que no se espera que la curva de luz dada por el Θ_{minimo} produzca una curva suave en esos casos. Para eliminar esos casos se calcula un nuevo parámetro (Λ) definido en Lafler & Kinman (1965). Este consiste en la razón del promedio de Θ ($\langle \Theta \rangle$) sobre el Θ_{minimo} , que presumiblemente es el período correcto:

$$\Lambda = \frac{\langle \Theta \rangle}{\Theta_{minimo}} \quad (4.4)$$

Para una curva de luz suave el valor de Θ_{minimo} será pequeño y eso implica un valor grande de Λ . Para el presente trabajo se exigió que $\Lambda > 2,5$ basados en trabajos previos de búsquedas de estrellas RR Lyrae (Vivas et al. 2004). En la Figura 4.1 se muestran las curvas de luz en fase, para 3 valores diferentes de períodos de prueba. La curva de luz correcta es la del cuadrante (a), que muestra una curva suave y una forma muy similar a una estrella RR Lyrae tipo-ab. El criterio Λ ayuda a eliminar objetos que claramente no son periódicos en el rango de períodos mencionados. Sin embargo, muchas estrellas pueden tener Λ alto y aun así no muestran curvas de luz suave, como deberían tener las estrellas RR Lyrae. Por esta razón es indispensable hacer una inspección visual de todas las estrellas candidatas. El criterio de Λ elimina el 70 % de las estrellas variables, así la inspección visual se hizo sobre el 30 % de las estrellas restantes. Debido a la posibilidad de la presencia de períodos espúrios (alias) se inspeccionaron los tres mejores períodos de cada estrella (3 mínimos de Θ , Figura 4.1).

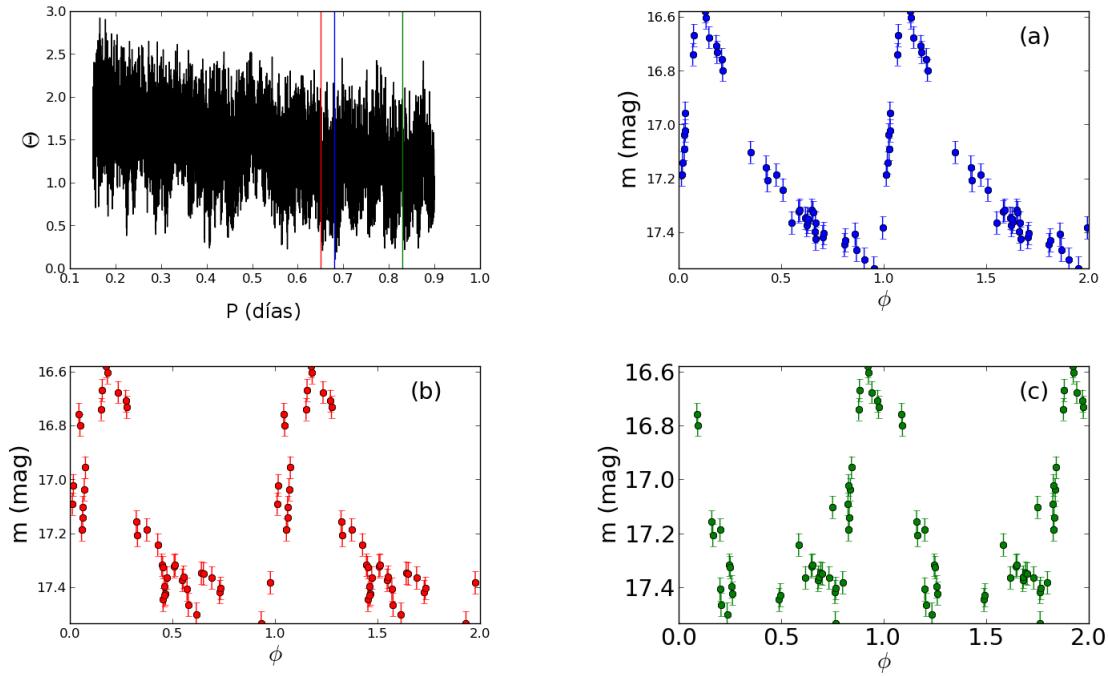


Figura 4.1: El panel superior izquierdo muestra Θ como función del período de prueba. Los períodos en los cuales se consiguen los tres mínimos principales de Θ (líneas de colores) se muestran en los paneles a, b y c y corresponden a períodos de: (a) $P = 0,682721$ días y $\Lambda = 13,02$; (b) $P = 0,654734$ días y $\Lambda = 6,52$; (c) $P = 0,835085$ días y $\Lambda = 6,35$. El color de cada curva de luz, corresponde al período de prueba usado para obtener el parámetro Θ e indicadas con líneas de colores en la figura del primer cuadrante. La mejor curva es la (a) que posee un Λ grande y un período de prueba que produce la curva de luz mas suave.

Los programas empleados para el cálculo de los períodos fueron levemente modificados por el autor del presente trabajo, y desarrollados originalmente en el CIDA por la Dra. Kathy Vivas. Es el mismo procedimiento usado para el sondeo QUEST (ver más detalles en Vivas et al. 2004).

Siguiendo este procedimiento se identificaron 47 estrellas RR Lyrae, cuyas propiedades se analizaran en el Capítulo 5. La búsqueda de RR Lyrae es mas eficiente en las zonas que mejor fueron observadas (Figura 3.7). Mientras mas bajo sea el numero de observaciones, mas difícil es recuperar el período de las estrellas. Por

lo tanto, muchas estrellas RR Lyrae pueden escaparse de ser detectadas en este sondeo. Vivas et al. 2004 estimó, basado en simulaciones, que la completitud es menor al 40 % para las tipo RRc y al 70 % para las tipo RRab para $N = 15$ (N representa el número de observaciones). Por lo tanto es de esperarse que la completitud en las zonas de nuestro sondeo que fueron pobremente observadas ($N = 10 - 12$) sea muy baja.

4.2. Zona de baja completitud

Una parte de nuestro sondeo no logró ser observada un número de veces grandes, para detectar estrellas RR Lyrae. En la Figura 3.7, esta zona pobremente observada, que cubre unos 33 grados cuadrados, está fuera del polígono de color negro. En esta región detectamos 26 candidatas a RR Lyrae pero que no podemos confirmar hasta no obtener curvas de luz mejor muestreadas. Esto se realizará en un trabajo futuro. Las curvas de luz de esas estrellas muestran una forma similar al de las estrellas RR Lyrae, pero dado que el 85 % de estas candidatas fueron clasificadas preliminarmente como estrellas tipo RRc, su confiabilidad dependerá de futuras observaciones. En el Apéndice A de este libro, se muestra una lista de estas estrellas candidatas (Tabla A.1) y sus curvas de luz (Figuras 1.1 y 1.2).

4.3. Distancia a las Estrellas RR Lyrae

El siguiente paso consiste en obtener las distancias asociadas a las estrellas seleccionadas como estrellas RR Lyrae, para determinar su distribución en la región explorada del sondeo alrededor de Omega Centauri. Este tipo de estrellas son buenos indicadores de distancias (ver detalles en el Capítulo 2). Para el cálculo de sus distancias se debe determinar la magnitud absoluta de cada estrella RR Lyrae. Usamos las relaciones proporcionadas por Catelan et al. (2004):

$$M_I = 0,47 - 1,132 \log(P) + 0,205 \log(Z) \quad (4.5)$$

$$M_V = 2,288 + 0,882 \log(Z) + 0,108 (\log Z)^2 \quad (4.6)$$

donde M_I y M_V corresponden a la magnitud absoluta de las estrellas RR Lyrae observadas en los filtros I y V, y Z es la metalicidad en fracción de masa, la cual se estimó de la ecuación tomada de Pancino et al. (2002).

$$\log(Z) = [Fe/H] + \log(0,638 \times 10^{[\alpha/Fe]} + 0,362) - 1,765 \quad (4.7)$$

donde $[Fe/H] = (-1,60 \pm 0,20)$ y $[\alpha/H] = (0,29 \pm 0,01)$ corresponden a la metalicidad y abundancia de elementos α asociados al cúmulo globular Omega Centauri. Ambos valores son tomados de Pancino et al. (2002) y fueron usados en trabajos previos (Fernández 2011).

Finalmente las distancias son obtenidas usando la siguiente ecuación:

$$D_{\odot}(kpc) = 10^{(\langle m_{\lambda} \rangle - M_{\lambda} - A_{\lambda} + 5)/5} \times 10^{-3} \quad (4.8)$$

donde el subíndice λ corresponde al filtro en el que fue observada cada estrella y A_{λ} es la extinción en la banda fotométrica correspondiente. Esta última variable es importante, dado que el enrojecimiento (E_{B-V}) en la zona explorada presenta un fuerte gradiente (ver Figura 4.2). El método para determinar el A_{λ} de las estrellas consiste en hacer uso de los mapas de Schlegel et al. (1998), calculando la extinción promedio en cada filtro dentro de 20 arcsec centrado en cada estrella.

Las extinciones A_V y A_I se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$A_V = 3,240 \times E_{B-V} \quad (4.9)$$

$$A_I = 0,48 \times 3,240 \times E_{B-V} \quad (4.10)$$

Los mapas de enrojecimiento fueron realizados haciendo uso de la base de datos de la NASA/IPAC Infrared Science Archive¹ (IRAS).

¹<http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

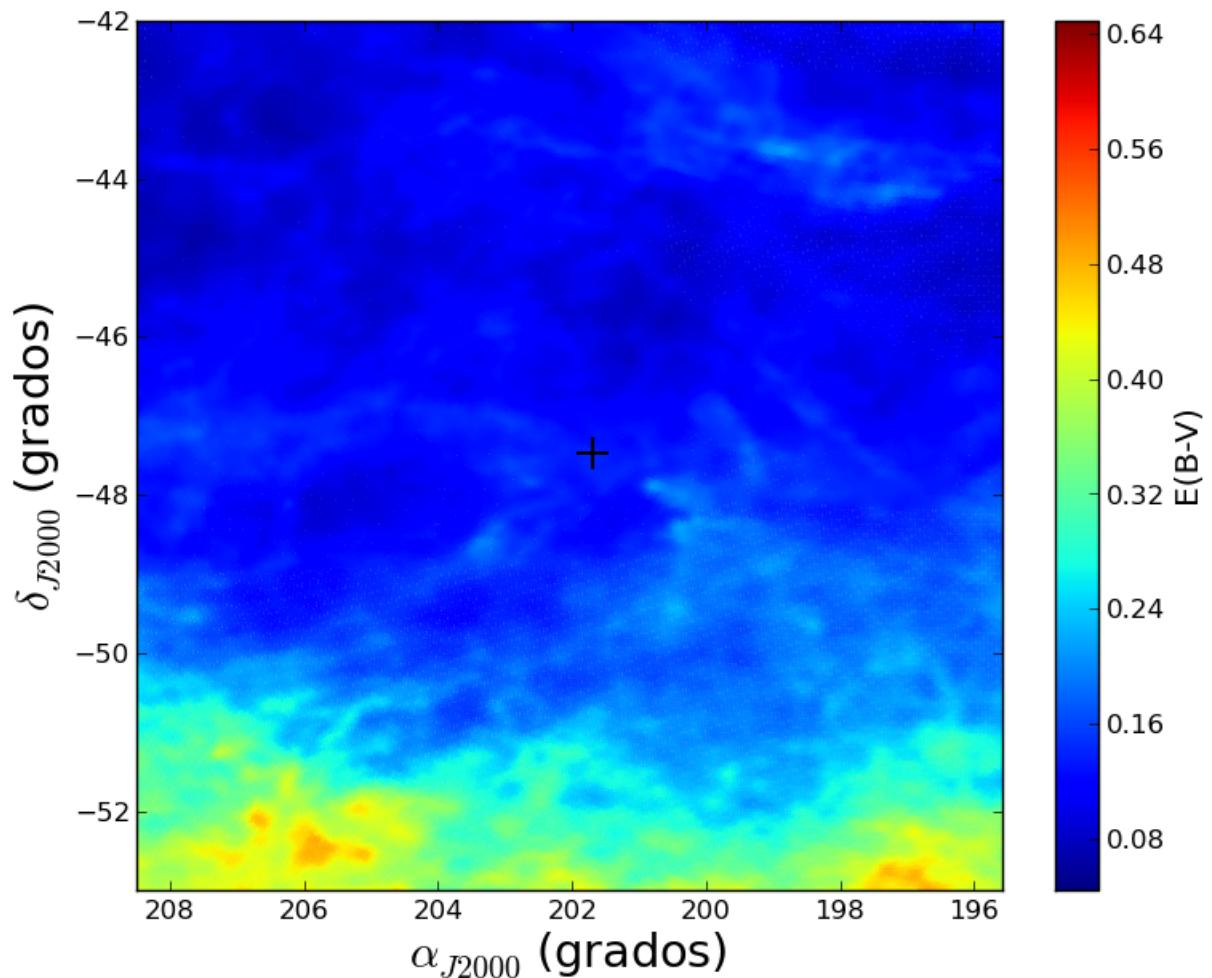


Figura 4.2: Mapa de enrojecimiento (E_{B-V}) de toda la región explorada alrededor del cúmulo globular Omega Centauri, cuyo centro es indicado con una cruz.

Capítulo 5

Resultados y Análisis

5.1. Nuevos descubrimientos

En el presente trabajo fotométrico se detectaron 49 estrellas variables en un área de 83 grados cuadros alrededor del cúmulo globular Omega Centauri. De estas 49 estrellas variables, 47 resultaron ser estrellas RR Lyrae y 2 δ Scuti. Sus propiedades generales son mostradas en la Tabla 5.1 y sus curvas de luz son presentadas en las Figuras 5.1 y 5.2.

La selección final de estrellas RR Lyrae como posibles miembros del cúmulo globular Omega Centauri, se realizó basados en sus distancias, brillos intrínsecos y colores característicos al cúmulo (como se indica en la sección 4). La distribución de estas estrellas bajo estos criterios en los diagramas color magnitud (V, V-I) y (I, I-J), se muestran en la Figura 5.3. La distribución en el cielo de las estrellas encontradas en este sondeo puede verse en la Figura 5.4. Como puede verse, no solo se encontraron estrellas dentro del radio de marea del cúmulo. Mas interesante aún, varias estrellas se ubican alrededor del cúmulo, hasta distancias angulares de ~ 10 grados del centro del mismo.

En nuestro sondeo fotométrico se recuperaron 10 estrellas RR Lyrae ya conocidas

Tabla 5.1: Parámetros fotométricos de estrellas variables alrededor de Omega Centauri.

ID	α_{J2000} (°)	δ_{J2000} (°)	N _{obs}	Tipo	Período (días)	Amplitud (mag)	V (mag)	I (mag)	E(B-V) (mag)	D _⊙ (kpc)	V _r (km s ⁻¹)
V4761	203.595047	-45.412022	25	RRab	0.674653	0.80	15.39±0.02	14.80±0.17	0.106	7.82±1.15	-
V5231	206.900879	-44.874550	40	RRc	0.295032	0.16	15.76±0.07	15.15±0.07	0.136	8.00±0.49	-
V1697	204.841980	-44.595249	24	RRab	0.500547	1.17	15.35±0.25	-	0.093	7.83 ±1.97	-
V1549	204.134323	-47.825080	35	RRc	0.260308	0.25	-	13.55±0.02	0.109	3.80 ±0.14	-
V3187	206.920060	-45.611590	37	RRc	0.242091	0.21	-	13.18±0.07	0.111	3.14 ±0.19	-
V3523	202.612198	-49.464680	17	RRab	0.786493	0.45	-	15.03±0.03	0.140	9.43 ±0.40	-
V3671	205.394684	-44.946030	24	RRc	0.349526	0.16	13.02±0.06	-	0.097	2.66 ±0.44	-
V3244	208.954620	-43.912720	36	RRc	0.210828	0.17	-	14.41±0.07	0.135	5.28±0.32	-
V1046	207.469147	-44.640949	39	RRab	0.829705	0.62	-	15.08±0.19	0.117	9.93±1.14	-
V1667	207.786301	-44.555771	21	RRc	0.327533	0.23	-	15.72±0.08	0.120	10.78±0.69	-
V203	208.065308	-44.707298	22	RRc	0.200486	0.16	-	14.95±0.06	0.120	6.76±0.37	-
V3550	209.022217	-44.495121	34	RRc	0.299608	0.24	-	16.42±0.08	0.124	14.54±0.94	-
V4396	208.628021	-44.437511	23	RRab	0.591176	0.63	-	15.77±0.18	0.121	12.60±1.39	-
V5595	208.886917	-44.338421	23	RRc	0.265498	0.39	-	15.44±0.15	0.127	8.99±0.87	-
V5711	208.780243	-44.331718	24	RRc	0.238185	0.21	-	14.52±0.08	0.125	5.75±0.37	-
V3609	202.869476	-45.028179	21	RRc	0.278624	0.34	-	16.04±0.14	0.163	11.67±1.11	-
V2139	207.820847	-45.195740	23	RRc	0.373321	0.26	-	16.29±0.10	0.128	14.35±1.06	-
V4309	206.357758	-46.170818	31	RRab	0.526507	0.56	-	16.40±0.15	0.176	15.77±1.59	-
V1962	203.317429	-47.129040	16	RRc	0.300839	0.26	-	14.45±0.10	0.212	5.51±0.44	-
V3847	203.950912	-47.023251	21	RRc	0.197171	0.18	-	15.27±0.08	0.209	7.33±0.52	-
V1561	204.212128	-47.226200	25	RRab	0.563370	0.45	-	15.26±0.16	0.199	9.32±1.00	-
V2427	204.017181	-48.265869	19	RRab	0.649832	0.64	-	15.36±0.17	0.181	10.21±1.12	-
V4239	203.707916	-48.628139	21	RRab	0.591264	0.78	-	15.25±0.23	0.220	9.23±1.30	-
V644	207.397919	-44.107670	21	RRab	0.526511	0.60	-	15.14±0.18	0.145	9.02±1.01	-
V1234	208.413483	-44.092201	36	RRab	0.846444	0.70	-	13.62±0.20	0.125	5.06±0.61	-
V3328	209.140732	-43.904320	30	RRc	0.268641	0.31	-	15.05±0.12	0.140	7.46±0.63	-
V2267	204.482224	-43.218788	17	RRab	0.560341	0.91	17.35±0.29	-	0.178	24.73±4.08	-
V2533	203.579575	-45.693771	25	RRc	0.266724	0.41	17.38±0.15	-	0.179	21.18±2.13	-
V2929	204.164261	-45.651611	32	RRab	0.640865	0.93	17.23±0.23	-	0.172	24.23±3.32	-
V2485	200.289261	-47.016312	17	RRab	0.866811	0.58	16.66±0.16	-	0.195	19.63±2.09	-
V3422	202.682480	-45.576481	27	RRab	0.571225	0.84	16.26±0.04	-	0.111	11.59±1.82	-
V831	202.625580	-44.600670	25	RRab	0.603767	0.80	16.05±0.03	-	0.114	10.48±1.60	-
V1742	203.715485	-45.770672	27	RRc	0.229667	0.31	14.94±0.02	-	0.116	6.27 ±0.93	-63±10
V1865	199.855804	-47.084390	24	RRab	0.634248	1.07	15.11±0.02	-	0.146	6.48 ±0.99	293±20
V2160	199.787506	-49.502250	22	RRab	0.608076	1.15	15.06±0.02	-	0.181	6.01 ±0.95	114±19
V4427	200.793121	-45.596910	21	RRc	0.381746	0.46	14.37±0.04	-	0.085	5.05 ±0.77	116±10
V4187	202.643875	-45.994461	17	δ Scuti	0.415299	0.25	14.02±0.04	-	0.116	4.10 ±0.65	-
V5451	206.151932	-44.192210	22	δ Scuti	0.327592	0.19	-	14.18±0.02	0.095	5.40 ±0.19	-
V516	200.595367	-48.317890	40	RRc	0.316126	0.45	13.22±0.03	-	0.161	2.65 ±0.42	-
V8418	201.979340	-47.077370	38	RRab	0.696551	0.91	14.60±0.19	-	0.191	5.18 ±0.88	-
V5601	201.886887	-47.228650	41	RRab	0.682731	0.97	14.33±0.03	-	0.128	4.65 ±0.72	216±19
V2020	201.597946	-47.313370	25	RRab	0.772868	0.63	14.42±0.03	-	0.130	4.83 ±0.75	-
V2038	201.619019	-47.313110	25	RRab	0.564440	0.95	14.68±0.03	-	0.130	5.44 ±0.85	-
V4036	201.887589	-47.272960	41	RRc	0.384521	0.48	14.50±0.03	-	0.129	5.02 ±0.78	-
V6054	201.400330	-47.208930	25	RRc	0.221975	0.46	14.52±0.03	-	0.126	5.09 ±0.79	-
V2113	201.832062	-47.313049	37	RRc	0.422079	0.33	14.43±0.14	-	0.203	5.94±0.58	-
V2930	201.792587	-47.258259	35	RRc	0.380004	0.51	14.46±0.17	-	0.200	5.89±0.66	-
V5438	201.754318	-47.233349	25	RRab	0.713030	0.97	14.42±0.27	-	0.199	6.67±1.05	-
V4051	201.473541	-47.269600	25	RRab	0.575179	1.00	14.49±0.03	-	0.128	5.00 ±0.78	280±53

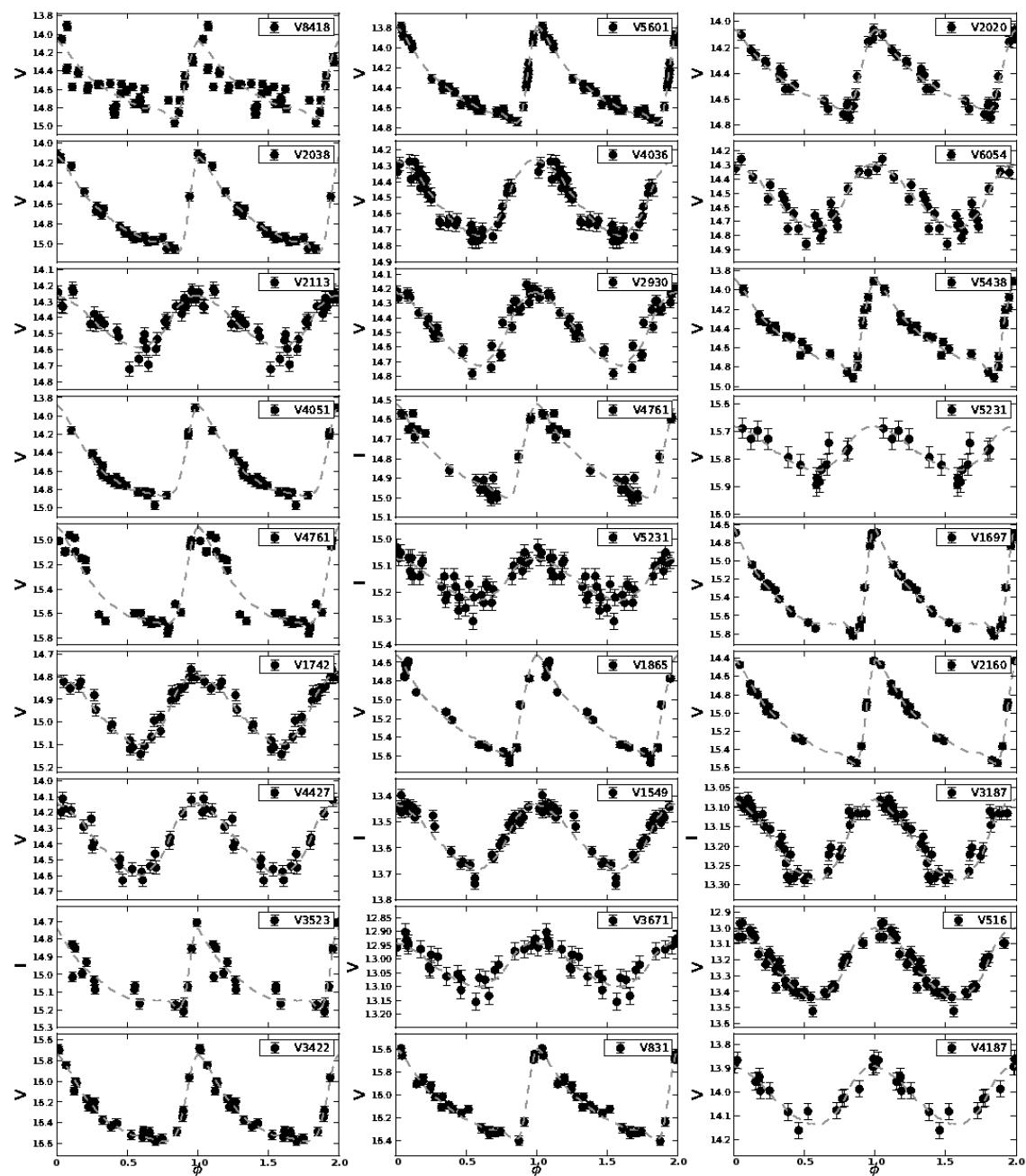


Figura 5.1: Curvas de luz de estrellas variables.

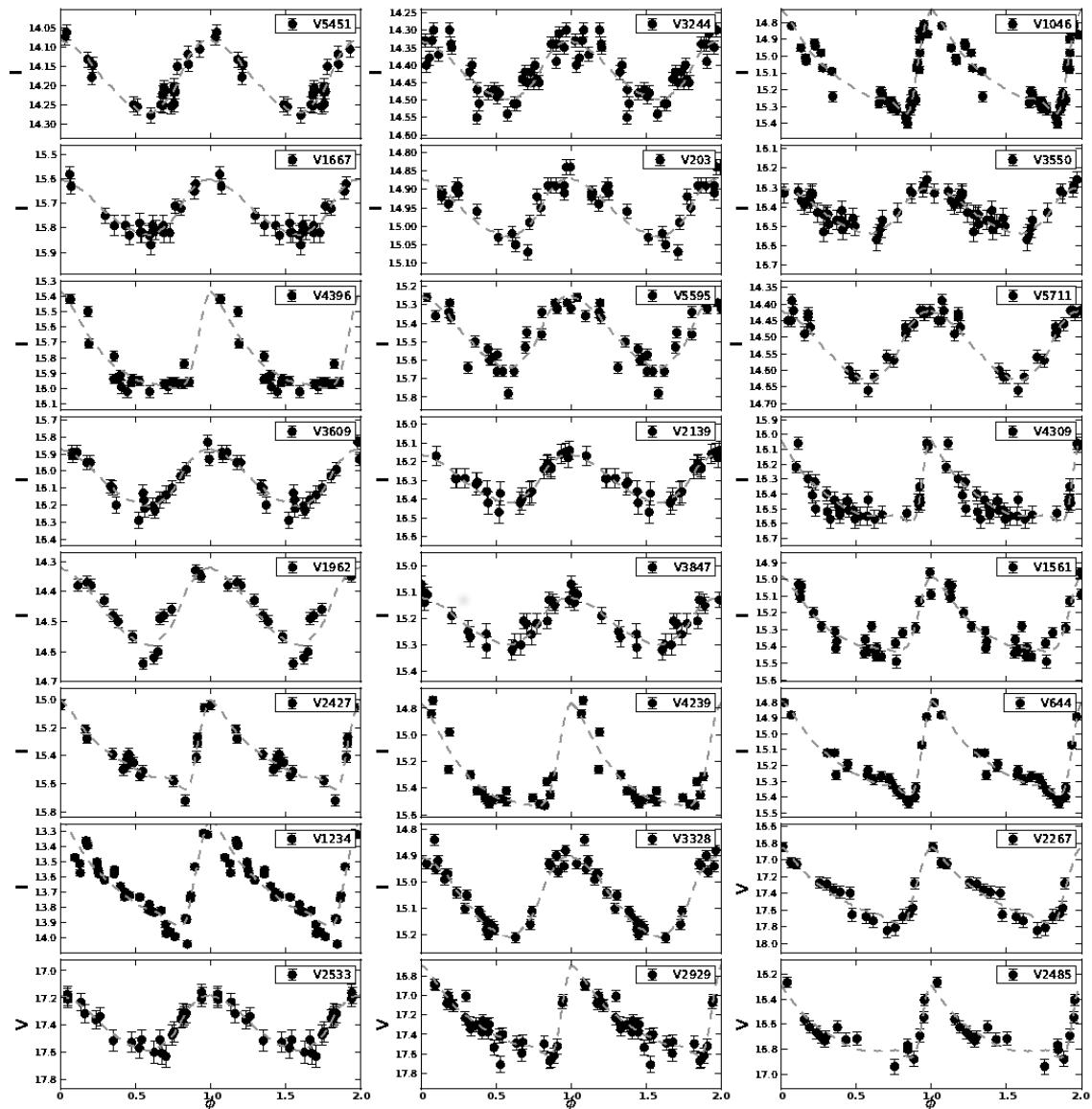


Figura 5.2: Continuación de la Figura 5.1.

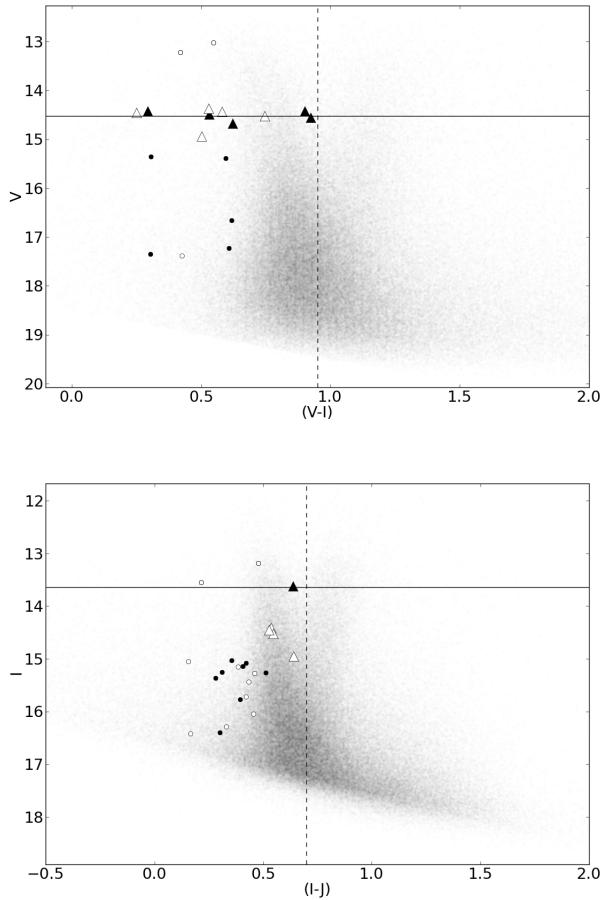


Figura 5.3: Diagramas color-magnitud. **Superior:** Plano $(V, V-I)$, la línea horizontal corresponde a la magnitud de la rama horizontal en la banda V ($V_H = 14,5$ mag) del cúmulo globular Omega Centauri y la línea vertical corresponde al límite rojo empleado para seleccionar las candidatas a estrellas RR Lyraes como miembros del cúmulo ($V - I \leq 0,95$). **Inferior:** Plano $(I, I-J)$, la línea horizontal corresponde a la magnitud de la rama horizontal en la banda I ($I_H = 15,0$ mag) del cúmulo globular Omega Centauri. Los símbolos abiertos y sólidos corresponden a estrellas RR Lyrae tipo-c y tipo-ab respectivamente y la forma de triángulo y círculo correponde a estrellas a la misma distancia de Omega Centauri y estrellas de campo, respectivamente.

dentro del radio de marea ($11 \text{ arcmin} < r_t < 57 \text{ arcmin}$)¹ del cúmulo globular Omega Centauri que han sido reportadas en trabajos previos. Kaluzny et al. (2004) presentan un catálogo fotométrico de estrellas variables en el campo de Omega Centauri, sobre un área de 644 minutos de arco cuadrados, detectando sobre ésta un total de 117 estrellas variables, de las cuales 17 son de tipo RR Lyrae en las bandas fotométricas B y V. Esas observaciones fueron realizadas en el telescopio Swope de 1 m en el observatorio de las Campanas. Por otra parte, Weldrake et al. (2007) también compilaron un catálogo de 187 estrellas variables dentro de Omega Centauri y distribuidas en un área de 0,75 grados cuadrados centrados en el cúmulo. De estas estrellas variables, 69 son estrellas RR Lyrae. Esas estrellas variables fueron detectadas con un telescopio de 1 m (el Australian National University 40 inch) del observatorio Siding Spring. Finalmente Van Loon et al. (2007) presenta un atlas espectral de la población Post-Secuencia Principal de Omega Centauri, compilando 1500 estrellas inicialmente clasificadas como miembros del cúmulo a partir de los movimientos propios. Una de esas estrellas coincide con nuestra V4051.

Las propiedades de períodos, amplitudes y brillos obtenidas para estas estrellas, son consistentes con los obtenidos por otros autores, validando los métodos empleados en el presente trabajo. La comparación entre los parámetros obtenidos para las 10 estrellas RR Lyrae en común con otros sondeos, se muestran en la Tabla 5.2. El promedio de la diferencias de las magnitudes entre ambos sondeos esta dada por $\Delta m = \langle m - m_{\text{Kaluzny}} \rangle = 0,047 \text{ mag}$ y $\Delta m = \langle m - m_{\text{Weldrake}} \rangle = 0,189 \text{ mag}$; donde m es la magnitud intrínseca y corresponde a las magnitudes obtenidas en el presente trabajo. Estas diferencias se encuentran dentro del orden de los errores fotométricos reportados en la Tabla 5.1 y la Figura 3.5, lo cual valida la calibración fotométrica reportada en nuestro son-

¹No se hizo fotometría interior a un radio menor a 11 arcmin

Tabla 5.2: Comparación de los parámetros de estrellas RR Lyrae con otros sondeos en Omega Centauri.

This work			Kalutzny et al. (2004)			Weldrake et al. (2007)		
ID	$\langle V \rangle mag$	Period (days)	ID	$\langle V \rangle mag$	Period (days)	ID	$\langle V \rangle mag$	Period (days)
V8418	14.60	0.696551	-	-	-	V18	14.43	0.738000
V5601	14.33	0.682731	V149	14.380	0.682728	V12	14.62	0.683000
V2020	14.42	0.772868	V54	14.419	0.772915	V171	14.45	0.773000
V2038	14.68	0.564440	V67	14.681	0.564451	V170	14.95	0.564000
V4036	14.50	0.384521	V72	14.480	0.384522	-	-	-
V6054	14.52	0.221975	-	-	-	-	-	-
V2113	14.43	0.422079	V75	14.476	0.422174	-	-	-
V2930	14.46	0.380004	V36	14.550	0.379846	-	-	-
V5438	14.42	0.713030	V7	14.590	0.713000	-	-	-
V4051	14.49	0.575179	V73	14.490	0.575215	-	-	-

deo. El promedio de las diferencias de los períodos entre ambos sondeos son:

$\Delta P = \langle P - P_{Kalutzny} \rangle = 4,76 \times 10^{-5}$ días y $\Delta P = \langle P - P_{Weldrake} \rangle = 0,01 \times 10^{-5}$ días. Estas diferencias son muy pequeñas y validan nuestros métodos para calcular períodos.

La distancia del cúmulo globular Omega Centauri fue obtenida a partir del promedio de las distancias de 10 estrellas RR Lyrae, detectadas dentro del radio de marea del cúmulo (Tabla 5.2). La distancia obtenida es de 5,37 kpc ($\sigma = 0,59$ kpc). Este valor es similar a la distancia de $5,36 \pm 0,30$ kpc reportada por Thompson et al. (2001) basados en observaciones de binarias eclipsantes.

Luego de hacer una búsqueda en la base de datos SIMBAD² confirmamos que las estrella restantes (37 RR Lyraes) corresponden a nuevos descubrimientos. La proyección de estas estrellas en el cielo indica que todas ellas se encuentran fuera del radio de marea de Omega Centauri, y son así candidatas de posibles estructuras externas asociadas al mismo.

²<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

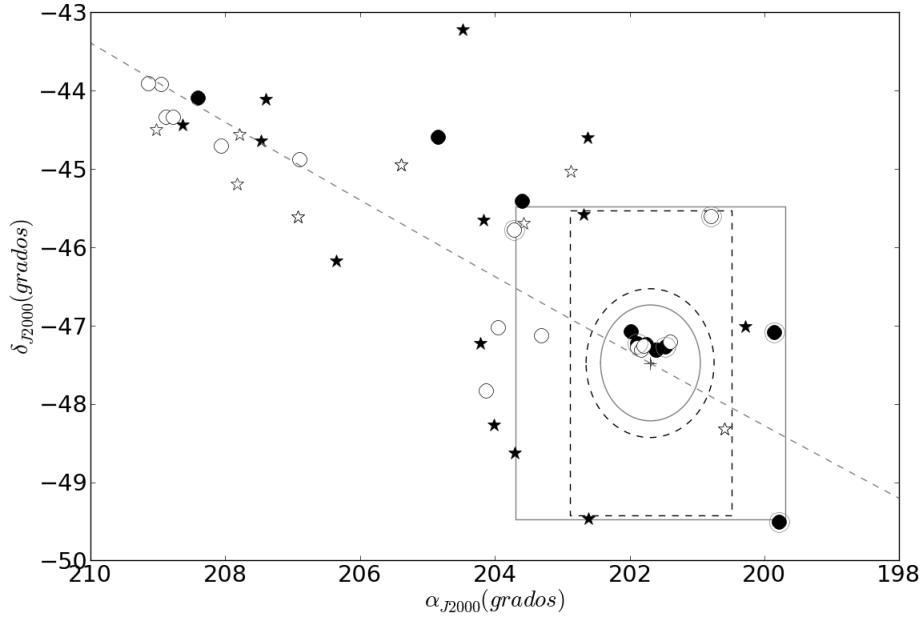


Figura 5.4: Distribución espacial de todas la estrellas RR Lyrae detectadas en el presente trabajo. La línea discontinua correponde a una fracción de la órbita del cúmulo que se calculó a partir de sus movimientos propios (Dinescu et al. 1999). Los polígonos de líneas continuas y discontinuas, corresponden al área explorada por Leon et al. (2000) y Da Costa & Coleman (2008), respectivamente y los radios de marea asumidos por ambos autores ($r_t = 57$ arcmin y $r_t = 44,4$ arcmin, respectivamente). Los símbolos abiertos y llenos corresponden a estrellas RR Lyrae tipo-c y tipo-ab, respectivamente. Los círculos son estrellas RR Lyrae con distancia similar a la del cúmulo ($3,5 \text{ kpc} \leq D_\odot \leq 9,0 \text{ kpc}$) mientras que las estrellas corresponden a objetos en el campo de visión por delante ($D_\odot < 3,5 \text{ kpc}$) o por detrás del cúmulo ($D_\odot > 9,0 \text{ kpc}$). Los símbolos encerrados dentro de un círculo grande corresponde a las estrellas RR Lyrae a las cuales se les pudo hacer espectroscopía ver la sección 5.3.

5.1.1. Distribución de distancias

Un histograma de las distancias a la que se encuentran las 47 estrellas RR Lyrae se muestra en la Figura 5.5. Es claro que hay un pico a la misma distancia que Omega Centauri (indicado por la línea vertical). En ese pico se encuentran no solo las 10 estrellas dentro del radio de marea pero adicionalmente a 16 estrellas RR Lyrae a una distancia similar a Omega Centauri. Estas estrellas son las principales candidatas a ser parte de posibles colas de marea dejadas por una galaxia destruida. Sin embargo, aunque estas estrellas pudieran haber sido arrancadas del cúmulo por las fuerzas de marea de la Vía Láctea, existe la posibilidad que sean estrella de campo.

Como el objetivo de este trabajo es investigar si pudieran existir estrellas asociadas a Omega Centauri pero fuera de su radio de marea, seleccionamos esas 16 estrellas como posibles candidatas. La 16 estrellas se encuentran en el rango de distancia entre entre 3,5 kpc y 9,0 kpc, que cubre aproximadamente el ancho del pico de la distribución de distancias de la Figura 5.5. Las estrellas RR Lyrae fuera de estos límites probablemente estan asociadas con el disco grueso y/o con el halo de la Vía Látea.

La Figura 5.5 se superpuso a la distribución de distancias de todas las estrellas RR Lyrae, una nueva distribución para las estrellas RR Lyrae tipo-c. El objetivo de esto es verificar que tan importantes es la contribución de este tipo de estrellas al pico observado en la distribución de distancias. La muestra de estrellas RRc podría estar contaminadas por otras estrellas variables como las δ Scuti, W UMa, SX Phoenicis y Cefeidas de tipo II, dado que estas tienen amplitudes y períodos similares a las RRc (Mateu et al. 2009, Vivas et al. 2004). La Figura 5.2 muestra que las RRc contribuyen significativamente al pico observado, poniendo en duda así que exista un exceso real de estrellas RR Lyrae a la misma distancia

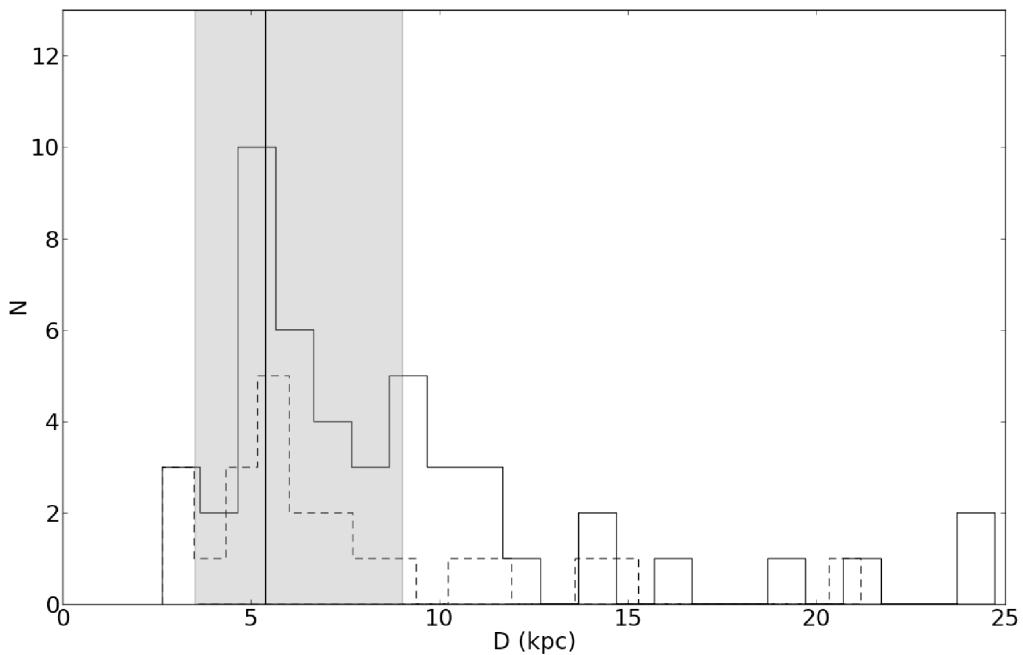


Figura 5.5: Distribución de distancias de 47 estrellas RR Lyrae alrededor de Omega Centauri. La banda de color gris, corresponde a los límites entre 3,5 kpc a 9,0 kpc, empleados para definir estrellas RR Lyrae que sean potenciales miembros a Omega Centauri. La distribución de líneas continua corresponde a todas las estrellas RR Lyrae (RRab y RRc), la distribución de línea discontinua correponde solo a estrellas RRc. La linea sólida vertical señala la distancia a Omega Centauri de 5,37 kpc.

de Omega Centauri.

5.2. Número esperado de estrellas RR Lyrae alrededor de Omega Centauri

Un análisis complementario consiste en estudiar el número esperado de estrellas RR Lyrae en la región explorada alrededor del cúmulo globular Omega Centauri. Para este análisis se excluyó la zona de baja completitud (sección 4.2) y por tanto el área efectiva del sondeo es de 50 grados cuadrados. El número esperado de estrellas RR Lyrae se obtiene a partir de los perfiles de densidad de estrellas de este tipo del Halo y del Disco Grueso:

Para el Halo asumimos un modelo con achatamiento variable (Preston et al. 1991, Vivas & Zinn 2006):

$$\rho_{halo} = \rho_{\odot}^{RR} \left(\frac{1}{R} \sqrt{x^2 + y^2 + \left(\frac{z}{c/a} \right)^2} \right)^n \quad (5.1)$$

donde $n = -3,1 \pm 0,1$, $\rho_{\odot}^{RR} = 4,2_{-0,4}^{+0,5}$ kpc $^{-3}$. Estos valores son tomados de la tabla 4 de Vivas & Zinn 2006. El achatamiento (c/a) viene dado por:

$$c/a = \begin{cases} (c/a)_0 + [1 - (c/a)_0](a/a_u), & a < a_u, \\ 1, & a > a_u, \end{cases}$$

donde $(c/a)_0 = 0,5$ y $a_u = 20$ kpc (Preston et al. 1991).

Para el Disco Grueso el perfil de densidad se expresa como:

$$\rho_{disc} = \rho_{\odot}^{RR} \exp\left(-\frac{R_{gal} - D}{h_R}\right) \exp\left(-\frac{|z|}{h_z}\right) \quad (5.2)$$

donde $h_R = 0,51$ y $h_z = 2,20$ (Carollo et al. 2010) y $D = 8$ kpc es la distancia del Sol al centro de la Galaxia (Reid 1993).

El número total de estrellas RR Lyrae dentro de un ángulo sólido w se obtiene integrando las siguientes ecuaciones:

$$N_{RRLS}^{halo} = \int_{D_{\odot}} \int_b \int_l \rho_{halo}(D_{\odot}, l, b) dD_{\odot} \cos(b) db dl \quad (5.3)$$

$$N_{RRLS}^{disc} = \int_{D_{\odot}} \int_b \int_l \rho_{disc}(D_{\odot}, l, b) dD_{\odot} \cos(b) db dl \quad (5.4)$$

El número total de estrellas RR Lyrae de ambas componentes Galácticas es:

$$N_{RRLS}^{survey} = N_{RRLS}^{halo} + N_{RRLS}^{disc} \quad (5.5)$$

El método empleado para resolver las integrales 5.3 y 5.4 consiste en la resolución numérica por la técnica de Rechazo de Von Neumann (Binder et al. 1997). Para este calculo se usaron los mismos programas desarrollados en Mateu 2011.

El área del sondeo correspondiente a los 50 grados cuadrados, se dividió en sub-campos como se muestran en la Figura 5.6. El área de cada uno de estos sub-campos, así como sus límites son indicados en la Tabla 5.3. El resultado de integrar los perfiles de densidad entre 3,5 kpc y 9,0 kpc, en estos sub-campos son:

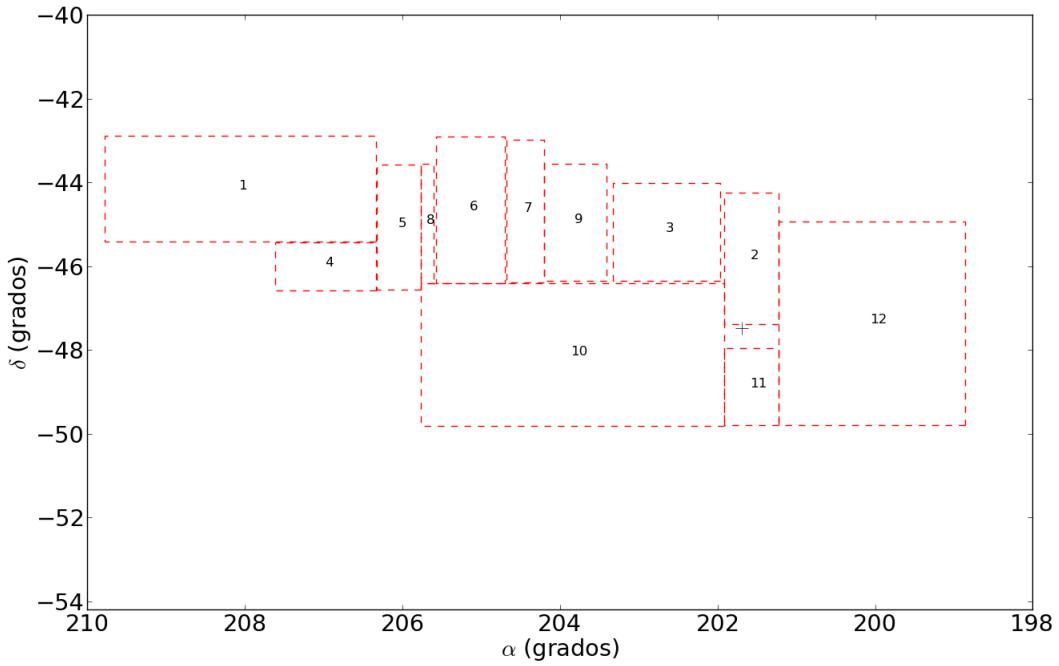


Figura 5.6: Sub-campos alrededor de Omega Centauri usadas para estimar el número esperado de estrellas RR Lyrae tanto del Halo como del Disco Grueso. El centro del cúmulo es representado con una cruz.

1. El disco, $N_{RRLS}^{disc} = 2,1 \pm 1,4$
2. El halo, $N_{RRLS}^{halo} = 16,8 \pm 4,1$
3. Total, $N_{RRLS} = 18,9 \pm 4,3$

donde se han asumido errores de Poisson. El número esperado de RR Lyraes es consistente con las 16 estrellas RR Lyrae conseguidas fuera del radio de marea en el presente trabajo sobre los mismos límites, por lo tanto, no es evidente una sobredensidad de estrellas RR Lyrae a la misma distancia de Omega Centauri.

Tabla 5.3: Sub-campos de la región del sondeo alrededor de Omega Centauri

Sub-campo	Límites en α	Límites en δ	Área
	(grados)	(grados)	(grados cuadrados)
1	206,33919;209,78503	-45,41674;-42,88296	8,73
2	201,23000;201,91997	-47,38135;-44,25290	2,16
3	201,96608;203,33163	-46,35720;-44,00550	3,21
4	206,33925;207,61534	-46,57225;-45,42851	1,46
5	205,76602;206,32301	-46,56528;-43,56678	1,67
6	204,69737;205,57195	-46,41387;-42,898	3,07
7	204,20502;204,6819	-46,38599;-42,98666	1,62
8	205,60272;205,76595	-46,41424;-43,55035	0,47
9	203,40846;204,20529	-46,35695;-43,55	2,24
10	201,92023;205,76746	-49,81297;-46,4153	13,07
11	201,22908;201,91994	-49,78813;-47,96404	1,26
12	198,8623 ;201,22948	-49,78867;-44,93449	11,49

5.3. Espectroscopía

El paso final en el análisis de los datos consiste en hacer un estudio de la cinemática de estas estrellas RR Lyrae seleccionadas como candidatos a ser restos de la galaxia progenitora de Omega Centauri. Los espectros de las estrellas permiten medir las velocidades de las mismas y así poder encontrar relación con la cinemática de Omega Centauri.

Ocho espectros de resolución media fueron analizados basados en observaciones en modo servicio, obtenidas con el espectrografo R-C, instalado en el Telescopio de 1,5 m del consorcio SMARTS, Observatorio Inter-Americano de Cerro Tololo, Chile, entre Diciembre 2012 a Febrero 2013. Los espectros fueron obtenidos con una señal a ruido $S/N > 30$ y se emplearon tiempos de exposición de 900s para cada estrella. Estos tiempos de exposición fueron administrados en 3 secuencias, cada secuencia de 300 segundos de exposición. Al combinar estas imágenes con la mediana es posible eliminar rayos cósmicos de la imagen.

5.3.1. Reducción de los espectros

Los datos fueron reducidos usando un conjunto de programas en Python desarrollados por el autor, que a su vez hacen uso de las tareas internas del programa IRAF, por medio de un módulo en Python que lleva por nombre PyIRAF. Con este software los espectros fueron corregidos por Bias y Flatfield, procedimiento similar al explicado en la subsección 3.1.3, con la excepción del mapa de sensibilidad el cual tuvo que ser corregido por la respuesta espectral de la lámpara usada.

Posteriormente al proceso de reducción básica, los espectros deben pasar por un proceso de extracción que consiste en transformar el espectro de dos dimen-

siones en un espectro longitudinal de una dimensión. Es decir, sobre el detector se proyecta un banda de luz (espectro de la estrella). Esta banda de luz cubre un área rectangular sobre el CCD (el espectro es generado en 2-Dimensiones), siendo la base del rectangulo proyectada sobre las columnas de píxeles del CCD la dirección espectral, y la altura del rectangulo proyectada sobre las filas de píxeles del detector la dirección espacial (ver la línea gruesa de color blanco en el panel superior de la Figura 5.7). El proceso de extracción del espectro, consiste en detectar el pico de la distribución de cuentas sobre cada columna de píxeles, y fijar una apertura rectangular cuyo ancho es de 2 a 3 FWHM. Previamente a la extracción se fijan dos aperturas paralelas al espectro, y en ambos sentidos, con el fin de medir el fondo del cielo que posteriormente es sustraído de todo el espectro. Una vez idenfificado los picos de la distribución de cuentas de cada columna, se realiza un ajuste polinomial sobre todas las filas, hasta modelar la posición del espectro a lo largo de toda la imagen. El resultado es el producto de extraer el número de cuentas a lo largo del modelo ajustado, y es el espectro en una dimensión (ver Figura 5.7). Finalmente, el paso siguiente consiste en asignar a cada columna de píxeles la longitud de onda correspondiente. Para esto se usa el espectro de emisión de una lampara de comparación (de Argón y Helio) cuya imagen es generada con el mismo instrumento y en la misma posición del telescopio con que fue observada la estrella. Los espectros resultantes de las 8 estrellas son mostrados en la Figura 5.8 y corresponden a las estrellas con círculos concéntricos de la Figura 5.4. En la Figura 5.8 se observan las características principales de las estrellas RR Lyrae, entre las que se encuentran las líneas de Hidrógeno de Balmer en absorción (empezando en H_β y las líneas de Calcio II, H y K a 3934 Å y 3968 Å respectivamente).

De la inspección visual de estos espectros se encontró que dos de ellos correspondían a estrellas de tipo espectral muy tardío para estrellas RRc. Es muy posible que esas estrellas sean en realidad δ Scuti las cuales pueden

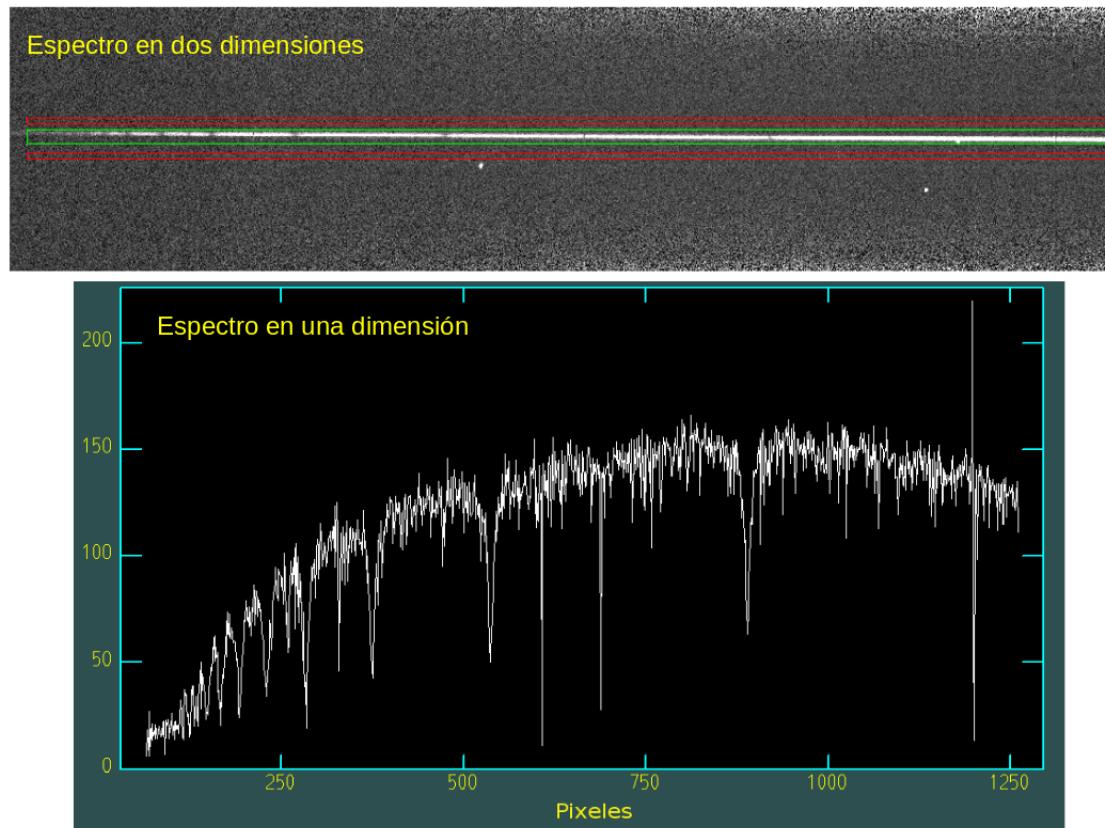


Figura 5.7: **Panel Superior:** Espectro en dos dimensiones encerrado en la apertura rectangular de color verde, la otras dos aperturas rectangulares de color rojo corresponden a la zona definida para medir el fondo del cielo. **Panel Inferior:** Espectro en una dimensión antes de la calibración en longitud de onda. Este espectro corresponde a la estrella RR Lyrae V1865.

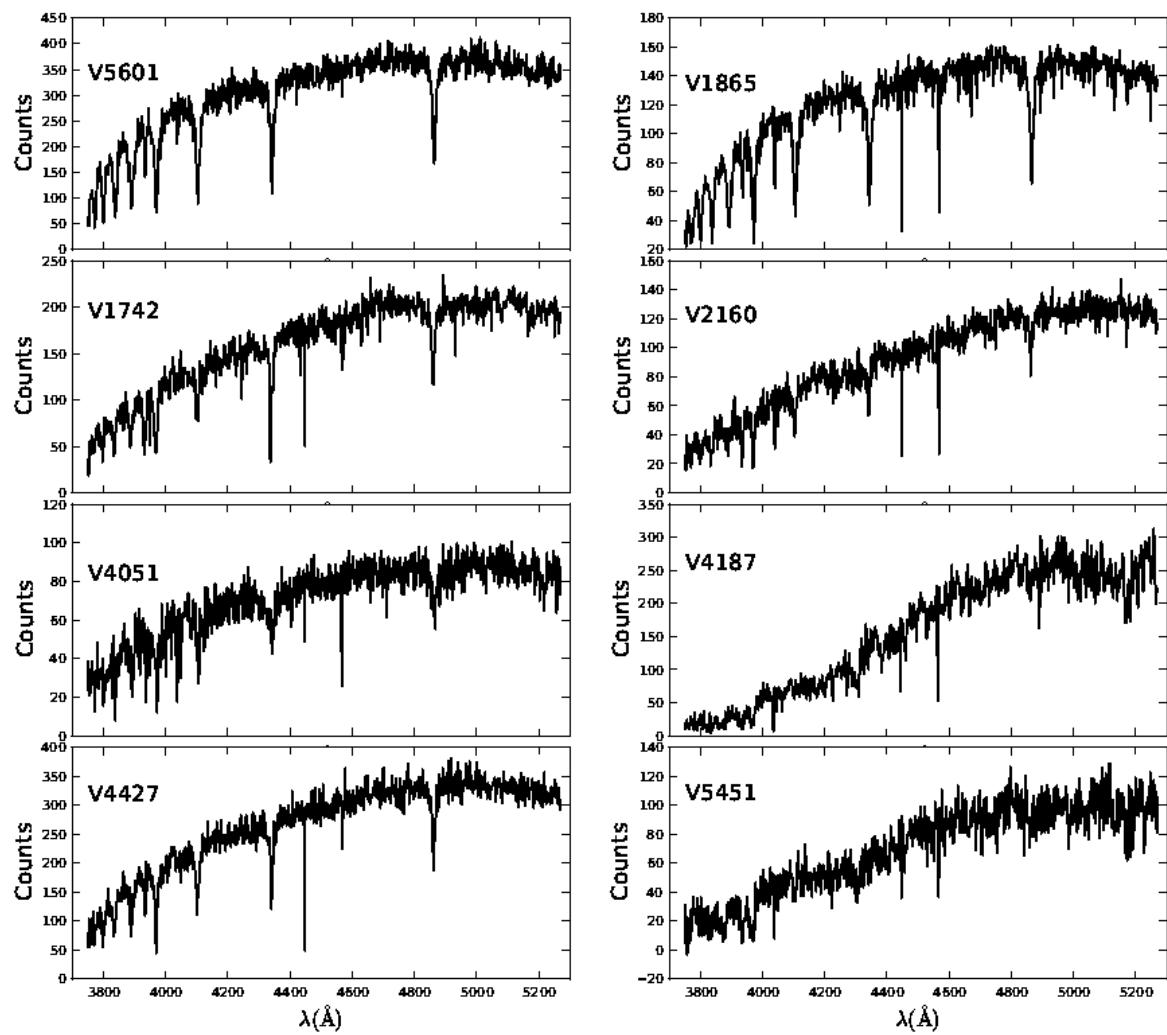


Figura 5.8: Espectros de las 8 estrellas variables RR Lyraes estudiadas.

tener curvas de luz similares a las RRc pero temperaturas ligeramente mas frías. De esta manera las estrellas V4187 y V5451 de la Tabla 5.1 fueron reclasificadas como δ Scuti. Esto confirma lo expuesto en la sección 5.1 donde se sugiere que el pico observado en la Figura 5.5 puede estar afectado por contaminación por otro tipo de estrellas entre las RRc.

5.3.2. Velocidades radiales de estrellas RR Lyrae

Las velocidades radiales fueron calculadas para 6 estrellas RR Lyrae usando la técnica de correlación cruzada con la rutina *fxcor* de IRAF. Esta técnica consiste en tomar todo el rango espectral de la estrella y compararlo por medio de una transformada de Fourier, con el mismo rango espectral de una estrella estándar de velocidad radial observada con el mismo instrumento. El rango espectral usado para obtener las velocidades de las estrellas RR Lyrae va de 3700 Å a 5300 Å (ver Figura 5.8), una región espectral que abarca un número fuerte de características tales como el doblete de Calcio (línea K de Ca II y línea H de Ca II), y las líneas de Balmer (H_α , H_γ y H_β). Durante las observaciones se obtuvieron los espectro de 5 estrellas estándares de velocidad (ver tabla 5.4). Las velocidades radiales de estas estrellas fueron obtenidas de la base de datos SIMBAD.

La velocidad radial de la estrella se consigue a partir del desplazamiento en longitud de onda entre el espectro problema y el espectro de la estrella estándar, usando el efecto Doppler. El resultado final se obtiene a partir de un promedio pesado por el error de la velocidades obtenidas con cada una de las estrellas estándares.

Tabla 5.4: Estrellas estándares de velocidad

Estrella estándar	Velocidad (km s ⁻¹)	N-espectros
HD65925	-8,2	3
HD74000	206,01	3
HD74438	20,4	3
HD76483	5,40	3
HD78791	22,50	3

$$\langle V_{RRRLS} \rangle = \frac{\sum_i V_i w_i}{\sum_i w_i} \quad (5.6)$$

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (5.7)$$

donde el subíndice i representa el número total de espectros de las estrellas de velocidad; $\langle V_{RRRLS} \rangle$ es la velocidad promedio de cada estrella RR Lyrae; V_i es la velocidad heliocéntrica obtenida en cada correlación con cada una de las estrellas de velocidad, y σ_i^2 es la incertidumbre de la correlación.

Dado que las estrellas RR Lyrae son estrellas pulsantes, la velocidad obtenida de los espectros no corresponde a la velocidad radial de la estrella en el cielo. Esta velocidad calculada en la ecuación 5.6 es una composición de velocidades entre la velocidad radial de pulsación de la estrella y la velocidad sistemática de la estrella en el cielo. Para aislar la componente sistemática seguimos el procedimiento Vivas et al. (2005) el cual consiste en usar plantilla de la curva de velocidad radial de estrella X Ari (para estrellas RR Lyrae tipo-ab) y T Sex y DH Peg (para estrellas RR Lyrae tipo-c), como las mostradas en la Figura 5.9. Para las estrellas RR Lyrae tipo-ab la curva de velocidad radial se modela con dos segmentos con pendientes $m_1 = 119,48$ para $\phi = (0; 0, 77)$ y $m_2 = -16,67$ para $\phi = (0, 77; 1, 0)$

Tabla 5.5: Velocidades radiales de las 6 estrellas RR Lyrae.

Estrellas RR Lyrae	Tipo	$V_r \pm 20$ (km s $^{-1}$)	N-espectros	Tiempo exposición (s)	r_t (arcmin)
V2160	RRab	114,0	1	900 ^a	> 57 ^b
V1865	RRab	293,0	1	900	> 57
V4051	RRab	280,0	2	900	> 57
V5601	RRab	216,0	1	900	< 57 ^c
V1742	RRc	-63,0	2	900	> 57
V4427	RRc	116,0	2	900	< 57

^aes el tiempo de exposición por espectro

^bfuera del radio de marea del cúmulo

^cdentro del radio de marea del cúmulo

(ver Vivas et al. 2008). Estas pendientes deben ajustar los puntos observados ($\langle V_{RRLS} \rangle$). La velocidad final (V_r) de la estrella corresponde a la interpolación de la pendiente en fase $\phi = 0, 5$. Para las estrellas RR Lyrae tipo-c, el procedimiento es similar, salvo que este tipo de estrellas poseen una curva de velocidad radial simétrica, y su ajuste debe coincidir con los puntos observados, al igual que el caso anterior. Los ajustes de las curvas de velocidad radial se pueden ver en la Figura 5.9. La Tabla 5.5 muestra las velocidades sistémicas heliocéntricas de las 6 estrellas RR Lyrae estudiadas. Dos de ellas se ubican dentro del radio de marea de Omega Centauri, y una de esas dos estrellas, tiene velocidad radial igual a la del cúmulo.

En la Figura 5.10 se muestra la distribución de velocidades radiales obtenidas para las 6 estrellas RR Lyraes. Este grafico incluye la distribución de velocidades radiales de estrellas de campo del disco y del halo a lo largo de la misma línea de visión. Estas últimas fueron obtenidas de las simulaciones de los modelo de

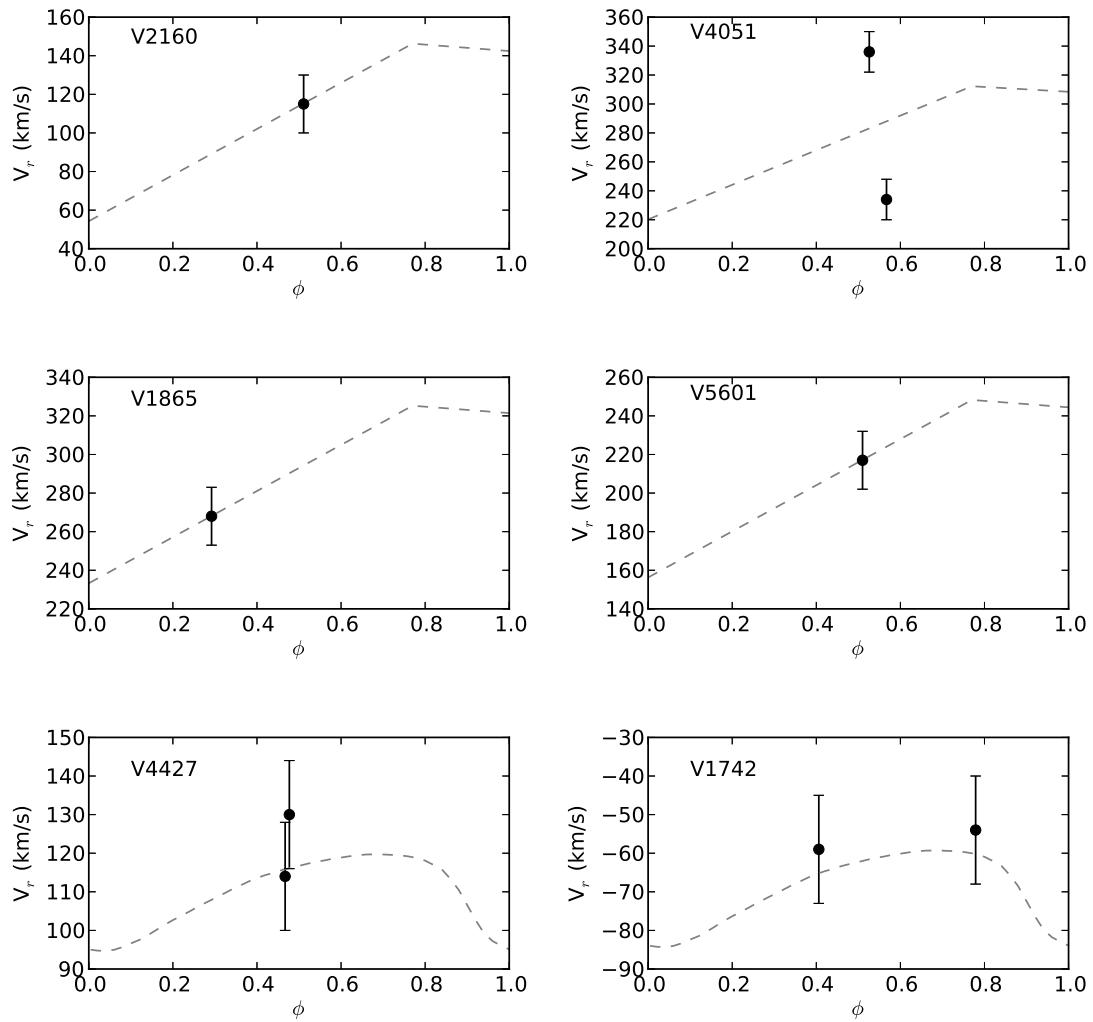


Figura 5.9: Curvas de velocidades radiales de estrellas RR Lyrae. Las curvas con líneas discontinuas representan las plantillas de curva de velocidad radial de estrella X Ari (para estrellas RRab) y T Sex y DH Peg (para estrellas RRc).

la Galaxia de Besançon³ (Robin et al. 2003).

En este gráfico se puede observar que las estrellas RR Lyrae observadas no tienen velocidad similar al cúmulo Omega Centauri (línea sólida vertical), con lo cual se hace difícil que puedan haber estado relacionadas con el mismo. Mas aún, las velocidades de estas estrellas están perfectamente de acuerdo con las velocidades de estrellas del disco grueso y/o halo de la Galaxia. Esto reafirma el resultado de la sección anterior, que parece indicar que las estrella encontradas son simplemente de la población de campo encontradas en la Galaxia.

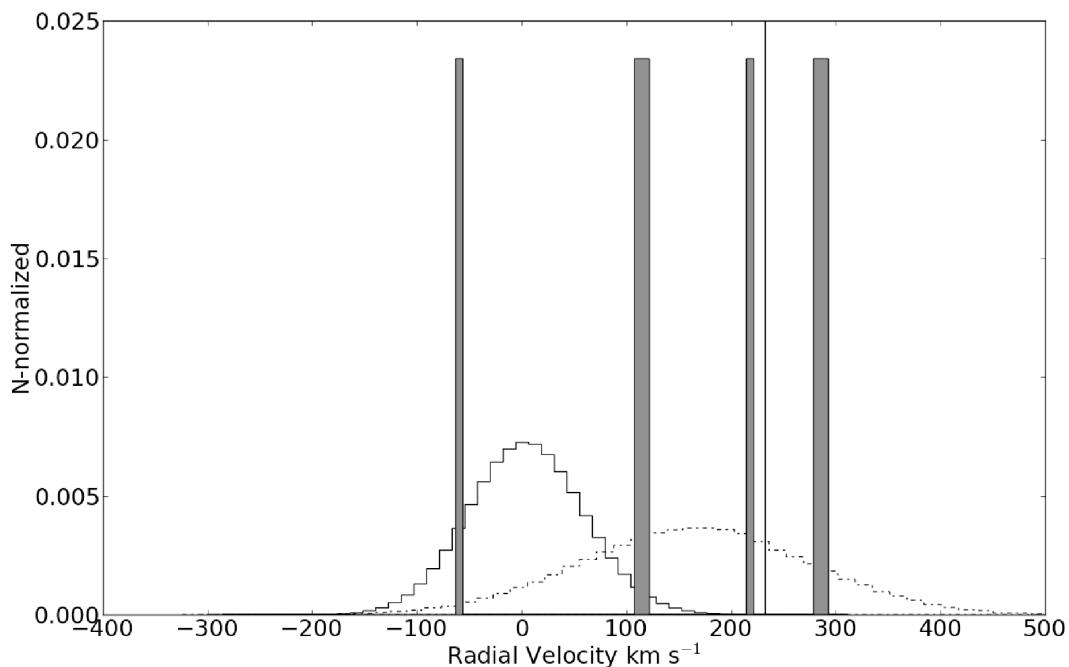


Figura 5.10: Distribución de velocidades radiales, para las 6 estrellas RR Lyrae son representadas con barras de color gris, la línea vertical delgada corresponde a la velocidad radial del cúmulo globular Omega Centauri [$V_r = 232, 2 \pm 0, 7 \text{ km s}^{-1}$; Dinescu et al. (1999)]; el histograma de línea continua representa la distribución de velocidades de estrellas del Disco, y el histograma con líneas discontinuas representa la distribución de velocidades de estrellas del Halo.

³<http://model.obs-besancon.fr/>

5.4. Movimientos Propios por SPM4

El cúmulo globular Omega Centauri posee un movimiento particular en el espacio fase. Este cúmulo se mueve en un órbita retrógrada respecto a la rotación de la Galaxia por lo que varias han sido las corrientes estelares en el Halo de la Galaxia, que han sido candidatas haber sido parte de este cúmulo, como es el caso de las corrientes de estrellas gigantes rojas detectadas por Wylie-de Boer et al. (2010), Majewski et al. (2012) y Schuster et al. (2012). En virtud a estas propiedades, en el presente trabajo se exploró la información cinemática de todas las estrellas RR Lyrae reportadas, con el objetivo de identificar conexiones en el espacio de fase entre el cúmulo y estas estrellas. Para tal fin, se realizó una correlación cruzada con una tolerancia de 5 arcsec entre las estrellas del SPM4 (Girard et al. 2011) y las estrellas RR Lyrae. De preferencia fue usado el catálogo SPM4 en contra parte del UCAC4, que cubre la misma región del cielo, dado que la precisión de los movimientos propios que logra el SPM4 es menor a 1 mas/yr comparada con el UCAC4, que logra una precisión en movimientos propios entre 1 a 3 mas/yr. Otra de las ventajas del SPM4 comparado con el UCAC4 es que el primero logra resolver y medir estrellas dentro del cúmulo globular Omega Centauri. Esto no es logrado por UCAC4.

En la Figura 5.11 se grafican los movimientos propios obtenidos del SPM4, para las 47 estrellas RR Lyrae. Los círculos de mayor tamaño representan las estrellas RR Lyrae localizadas dentro del cúmulo globular. La mayoría de estas estrellas tienen movimientos propios muy similares a las del cúmulo, como era de esperarse. Sin embargo, una de ellas se desvía de la media de este grupo (ver punto en $\mu_\alpha \cos(\delta) = 20$ y $\mu_\delta = -22$). Aunque es posible que este punto desviado pueda tener un origen físico (por ejemplo interacción con sistemas binarios), es necesario evaluar detalladamente las incertidumbres asociadas a las medidas del movimiento propio en sistemas densos como un cúmulo globular. Esto está fuera

del alcance de este trabajo. Los círculos de menor tamaño corresponden a las 16 estrellas RR Lyrae en el rango de distancia entre 3,5 kpc a 9,0 kpc. En este caso también se puede observar que todas las estrellas siguen aproximadamente el mismo movimiento propio de Omega Centauri. En realidad, lo mismo ocurre con las estrellas de campo. De esto se deduce que los movimientos propios no permite separar las estrellas de Omega Centauri de las estrellas de otras componentes Galácticas. Sin embargo, los movimientos propios son útiles para estimar la órbita de las estrellas, como se explica en la sección siguiente.

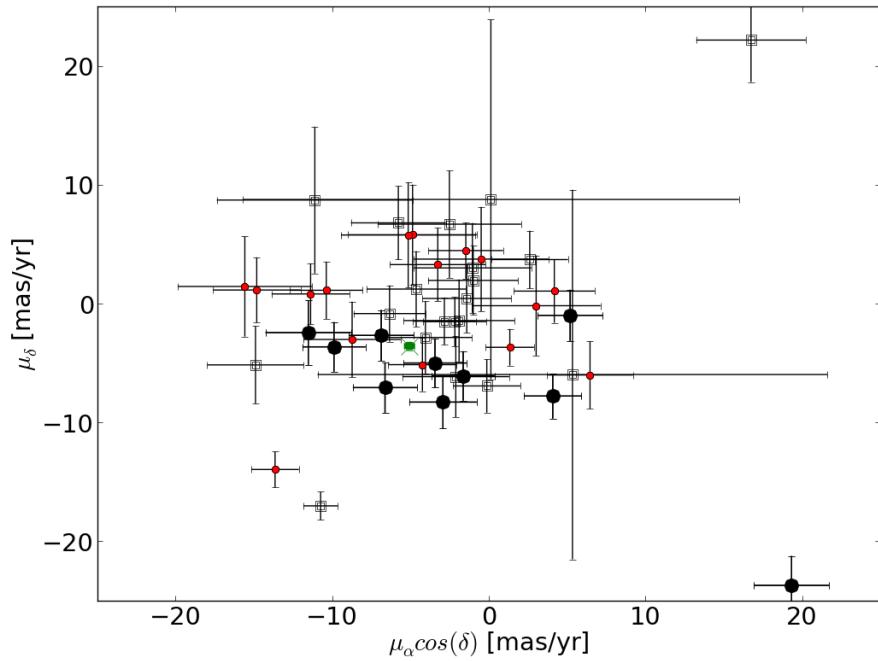


Figura 5.11: Movimientos propios con sus respectivas barras de errores, tomados del SPM4 para las 47 estrellas RR Lyrae detectadas en el presente trabajo. Círculos de mayor tamaño corresponden a estrellas RR Lyrae miembros del cúmulo ($r_t < 57$ arcmin), círculos de color rojo corresponden a las 16 estrellas RR Lyrae candidatas de formar estructuras externas ($r_t > 57$ arcmin). Los cuadrados, corresponden a estrellas RR Lyrae de campo y el cuadrado de color verde representa el movimiento propio [$\mu_\alpha \cos(\delta) = -5,08$ mas/año y $\mu_\delta = -3,57$ mas/año ; Dinescu et al. (1999)] del cúmulo globular Omega Centauri.

5.5. Simulaciones de órbitas

Finalmente, usando un modelo axisimétrico detallado de la Vía Láctea, se computaron 10^6 pares de órbitas del cúmulo globular Omega Centauri, para las 4 estrellas RR Lyrae con velocidades radiales y localizadas fuera del radio de marea ($r_t > 57$ arcmin) del cúmulo. La idea de este tipo de simulaciones consiste en buscar posibles encuentros en el pasado del cúmulo y las 4 estrellas RR Lyrae, para de esta manera investigar si la posición y cinemática actual de la RR Lyrae coincide con algun momento pasado de Omega Centauri en su trayectoria alrededor de la Galaxia.

Para esto se usa un modelo de potencial axisimétrico de la Galaxia que consiste de un potencial para el disco y el bulbo similar al propuesto por Miyamoto & Nagai (1975), y un halo esférico supermasivo. Este modelo en conjunto es propuesto por Allen & Santillan (1991), con una masa total de $9,0 \times 10^{11} M_\odot$. Los valores explícitos de las constantes de cada uno de los potenciales pueden verse en la Tabla 2 de Pichardo et al. (2012) la cual es reproducida en la Tabla 5.7. Las expresiones analíticas de la densidad y los potenciales son expresados en el mismo artículo (más detalles del modelo pueden ser encontrados en Pichardo et al. 2012). Las simulaciones fueron realizadas en el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México durante una pasantía de investigación realizada durante el 26 de Agosto al 26 de Noviembre del 2013, en colaboración con la Dra. Barbara Pichardo, el Dr. Edmundo Moreno y el Dr. Octavio Valenzuela. El tiempo de computo empleado para la simulación fue de tres semanas y media. Los parámetros de entradas necesarios para la simulación para las 4 estrellas RR Lyrae, pueden ser encontrados en la Tabla 5.6. Todos los parámetros de este estudio provienen de las medidas del presente trabajo, salvo los movimientos propios, que fueron obtenidos del SPM4.

Tabla 5.6: Parámetros de entrada en la simulación para 4 estrellas RR Lyrae

Estrellas	α	δ	V_r	$\mu_\alpha \cos(\delta)$ ^a	μ_δ	D_\odot
RR Lyrae	grados	grados	km s ⁻¹	mas/año ^b	mas/yr	kpc
V1865	199.855804	-47.08439	293.0±20.0	-18.6±2.4	3.3±2.6	6.48±0.99
V1742	203.715485	-45.77067	-63.0±10.0	-11.1±2.9	6.8±2.9	6.27±0.93
V2160	199.787506	-49.50225	114.0±19.0	8.5±2.8	-8.4±2.8	6.01±0.95
V4427	200.793121	-45.59691	116.0±10.0	-11.9±1.6	-0.6±1.6	5.05±0.77

^aMovimientos propios tomados del SPM4^bUnidades en inglés, mas/año=mili segundo de arco por año

Tabla 5.7: Parámetros generales de la simulación de órbitas, valores suministrado por Pichardo et al. (2012).

Parámetros	Valores	Referencias
R_0	8.3±0.23 kpc	Brunthaler et al. (2011)
Θ_0	239±7 km/s	Brunthaler et al. (2011)
Brazos espirales		
Ángulo de inclinación (i)	15.5±3.5°	Drimmel et al. (2000)
Escala de longitud (H_*)	3.9±0.6 kpc ($R_0 = 8.5$ kpc)	Benjamin et al. (2005)
$M_{\text{arms}}/M_{\text{disk}}$	0.04±0.01	
Masa	$2.7 - 5.4 \times 10^9 M_\odot$	
Velocidad patrón (Ω_S)	24±6	Gerhard 2011
Barra Alargada		
Semi eje mayor	3.13 kpc ($R_0 = 8.5$ kpc)	Freudenreich 1998
Escala de longitud	1.7, 0.54 kpc ($R_0 = 8.5$ kpc)	Freudenreich 1998
Relación axial	0.54/1.7	
Masa	$1.5 - 1.8 \times 10^{10} M_\odot$	
Angulo entre el eje mayor y la línea Sun-GC	20°	Gerhard 2002
Velocidad patrón (Ω_B)	55±5	Gerhard 2011

De los resultados de las simulaciones se obtuvieron las probabilidades de encuentro entre las estrellas RR Lyrae V1865, V1742, V2160 y V4427, y el cúmulo globular Omega Centauri dentro de un mínimo acercamiento de $d_{min} \leq 75$ pc, que corresponde aproximadamente el radio de marea del cúmulo en el pasado. La simulación fue integrada sobre un giga año en el pasado, usando un integrador de Runge-Kutta (Burden & Faires 2001), con el objetivo de aproximar las soluciones a las ecuaciones diferenciales. Cabe destacar que el código usado pertenece al grupo de investigación de la UNAM y en esta tesis solamente se suministraron los datos de entrada de la simulación y se analizaron los resultados.

La Figura 5.13 muestra un ejemplo de una de las 10^6 órbitas (último giga año) calculadas para las 4 estrellas RR Lyrae. Los paneles de la izquierda muestran la órbitas completas en escalas galácticas mientras que los paneles de la izquierda son un acercamiento cerca de la zona de Omega Centauri, el cual es mostrado con un símbolo de una estrella. En la Figura 5.12 se representa la probabilidad de los encuentros para las 10^6 órbitas y sus velocidades relativas en cada encuentro del par cúmulo-RR Lyrae. Los resultados indican que la probabilidad que las RR Lyraes hayan coincidido en posición con el cúmulo en algún momento en el pasado son extremadamente bajas (nótese la escala de los ejes verticales e los paneles de la izquierda en la Figura 5.12). Para las estrellas RR Lyrae V1742, V2160 y V4427 las simulación arroja una probabilidad muy baja (menor al 1%).

El caso de V1865 puede explorarse más profundamente aunque presenta una probabilidad relativamente alta de coincidencia espacial ($\sim 3\%$), las velocidades relativas en el momento del encuentro son muy altas ($V_{rel} \sim 199$ km s $^{-1}$). Esta velocidad es muy superior a la velocidad de escape de estrellas del cúmulo lo cual parece contradecir que V1865 realmente fue parte del cúmulo. Sin embargo, hay otros escenarios que se pueden explorar para explicar esta alta velocidad relativa. Estos escenarios se relacionan con procesos físicos en sistemas binarios

que se conocen que existen en Omega Centauri (Weldrake et al. 2007). Estos procesos son bien explicados en Pichardo et al. 2012 y se resumen a continuación: (a) Resonance Scattering: Una estrella binaria en el cúmulo puede capturar a otra estrella, formándose un sistema triple. Luego de un tiempo una de las estrellas es eyectada con una velocidad superior a la velocidad de escape [Hut & Bahcall (1983)]. (b) *flyby* : La estrella capturada es eyectada en la interacción, con una velocidad superior a la velocidad de escape [Hut & Bahcall (1983)].

En el presente trabajo, se calcularon estos dos posibles escenarios para la población de estrellas binarias presente en el cúmulo globular Omega Centauri, con el fin de explicar la velocidad relativa en la simulación para la estrella V1865. El modelo usado se muestra en la ecuación 5.8, tomado de Aarseth 2006:

$$V_{eje} \sim \left(\frac{G(m_1 + m_2)}{2a} \right)^{1/2} \quad (5.8)$$

donde G es la constante de gravitación, m_1 y m_2 son la masa de las estrellas en el sistema binario, y a es el semi eje mayor del sistema.

Para tener una idea de la velocidad de ejección típica en sistemas binarios EcB en Omega Centauri, estimamos a a partir de la Tercera Ley de Kepler para cada sistema binario reportado en el cúmulo por Weldrake et al. (2007). Para ello asumimos que cada componente del sistema binario tiene una masa del orden de $1 M_\odot$ (Pichardo et al. 2012). El valor del período usado es el reportado en la Tabla 2 de Weldrake et al. 2007 para cada uno de estos sistemas. Las estrellas EcB son estrellas eclipsantes cuyas componentes no se encuentran en contacto, y en Omega Centauri hay reportada alrededor de 45 sistemas binarios de este tipo. Finalmente la velocidad de ejección de estrellas del cúmulo, se estimó como el promedio de las velocidades de ejección calculado para cada sistema binario y se obtiene un valor de $\langle V_{ejec} \rangle = 259,7 \text{ km s}^{-1}$ ($\sigma = 33,4 \text{ km s}^{-1}$). Como puede

verse esa velocidad no es muy diferente a la velocidad de la estrella V1865 con lo cual el escenario de un sistema binario es plausible para explicar la velocidad de esta estrella.

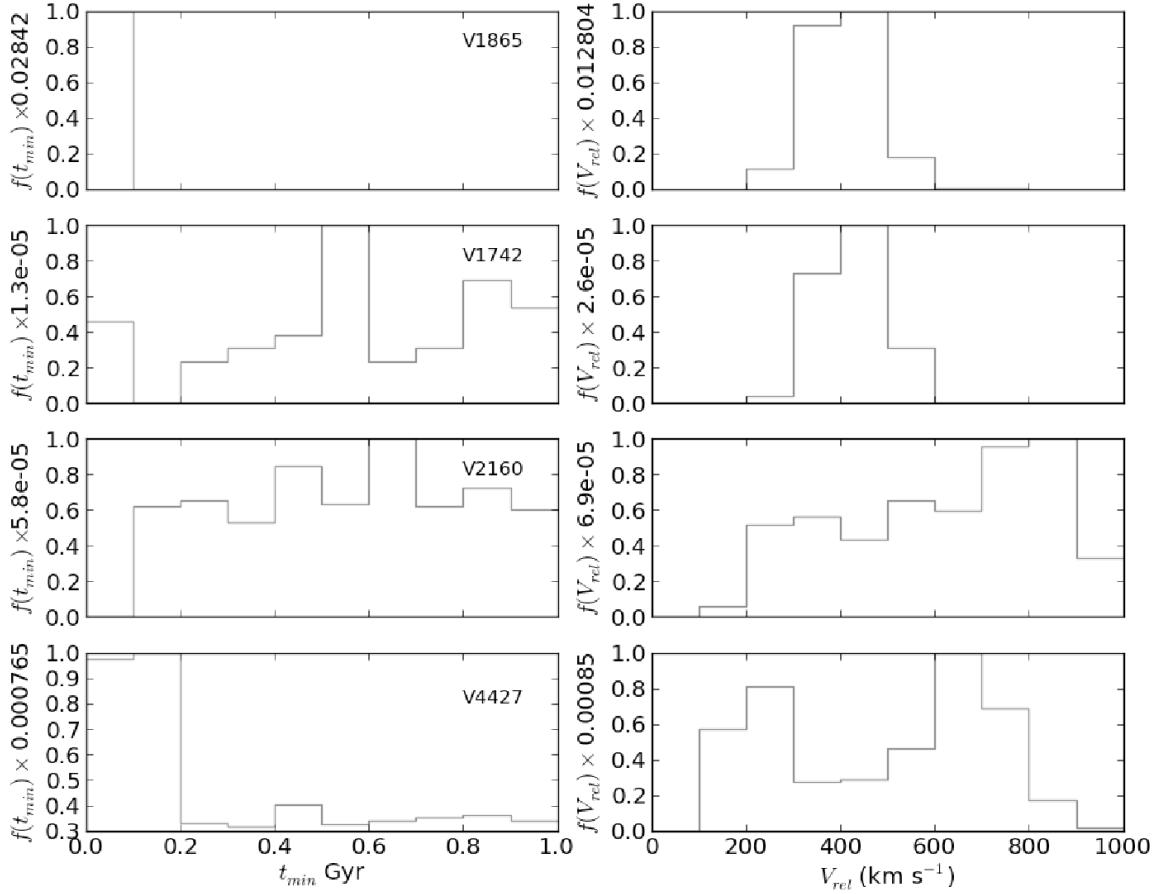


Figura 5.12: Distribución de los encuentros de los pares RR Lyrae-Omega Centauri. **Izquierdo:** Se respresenta la probabilidad de encuentros ($d_{min} \leq 75\text{pc}$) en intervalos de 0,1 Giga años. **Derecha:** Se representa la frecuencia observada de la velocidad en el encuentro, en intervalos de 100 km s^{-1} .

5.6. Posibles estrellas RR Lyrae asociadas a NGC5286

No lejos de Omega Centauri se encuentra ubicado otro cúmulo globular NGC5286, este cúmulo tiene coordenadas ($\alpha = 206,61171$ grados y $\delta = -51,37425$ grados).

En el presente sondeo se detectaron 4 nuevas estrellas RR Lyrae (V3422, V1667, V4396 y V3609) a distancias similares a las de ese cúmulo globular. Este cúmulo globular está localizado a una distancia de 11,7 kpc de acuerdo a Harris et al. (2010). Estas 4 estrellas RR Lyrae están aproximadamente a 7,2 grados desde el centro del cúmulo. Por su coincidencia en distancia podrían ser una corriente estelar asociada al mismo. El rango de períodos ($P_{ab} = 0,656$ días y $P_c = 0,333$ días) son consistentes con otras estrellas RR Lyrae descubiertas dentro de este cúmulo (Zorotovic et al. 2010). En el presente trabajo sugerimos la posibilidad de que estas estrellas RR Lyrae estén asociadas en forma de posibles estructuras externas al cúmulo, pero un estudio más detallado similar al que realizamos aquí para Omega Centauri es necesario para confirmar esa suposición.

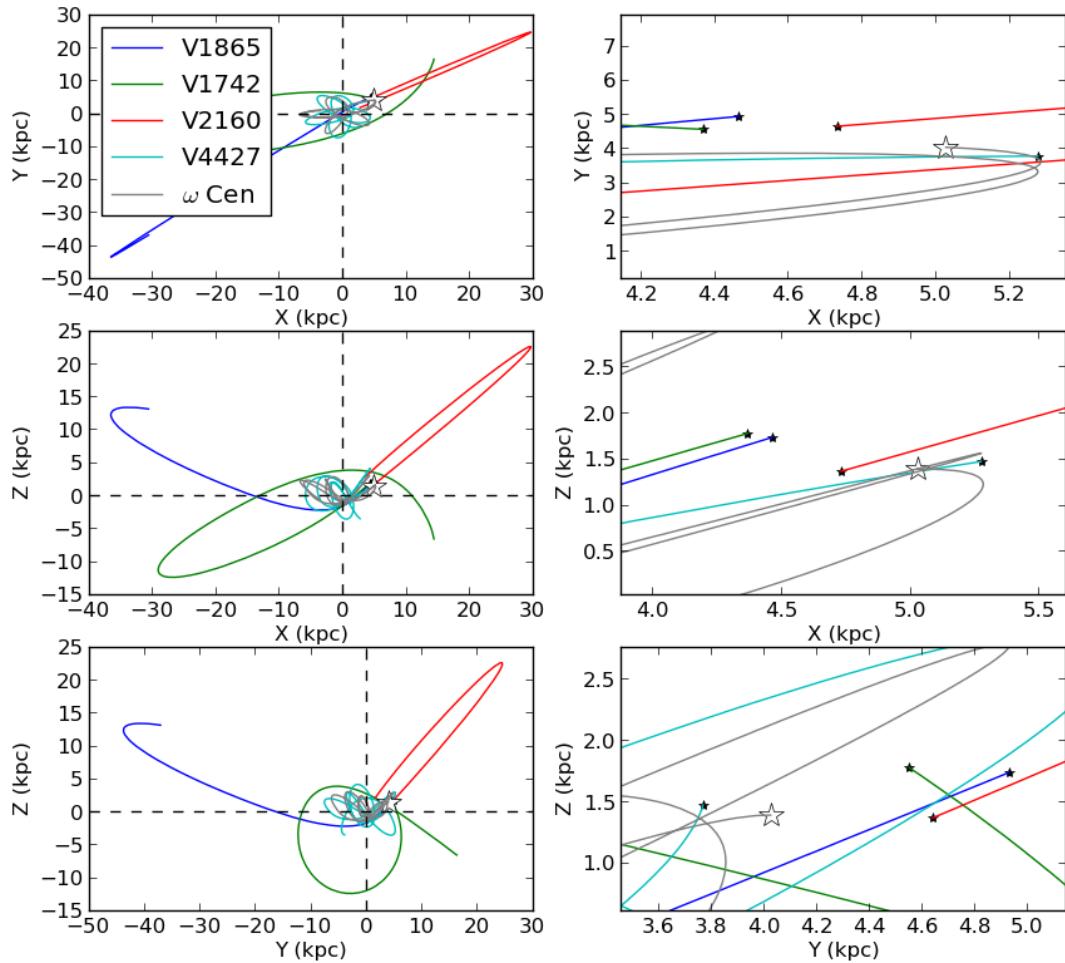


Figura 5.13: Ejemplo de una de las órbitas simuladas de las estrellas RR Lyrae (simbolos de estrella de color negro) y Omega Centauri (símbolo de estrella vacía). La segunda columna corresponde a zoom de la columna izquierda, justo del punto de partida de la simulación. La leyenda del primer gráfico es común para el resto de los gráficos.

Capítulo 6

Conclusiones

- En el presente trabajo realizamos un sondeo fotométrico en las bandas I y V sobre un área de 83 grados cuadrados alrededor del cúmulo globular Omega Centauri. Sin embargo el área efectiva en la que se pudo realizar la búsqueda de estrellas RR Lyrae es de 50 grados cuadrados. En esta se detectaron 45 estrellas RR Lyrae de las cuales 10 se encuentran localizadas dentro del radio de marea del cúmulo. Se realizó un análisis completo de la posibilidad de que las 35 estrellas restantes fueran parte de una estructura externa al cúmulo.
- No se encontraron estructuras externas asociadas al cúmulo globular Omega Centauri, formadas por estrellas RR Lyrae. Esta conclusión está basada en:
 1. El número esperado de estrellas RR Lyrae en los 50 grados cuadrados de cielo analizados alrededor del cúmulo globular Omega Centauri es consistente con el número de estrellas RR Lyrae detectadas. Por lo que no existe una sobredensidad de esas estrellas en esta zona del cielo.
 2. Las velocidades radiales analizadas para un sub-conjunto de las estrellas RR Lyrae en este trabajo no muestran una clara asociación con la cinemática del cúmulo, siendo estas consistentes con las velocidades

conocidas de otras componentes de la Galaxia en la región explorada.

3. Las simulaciones de las órbitas de las estrellas RR Lyrae muestran un probabilidad muy baja de que estas estrellas hallan sido arrancadas en un momento en el pasado del cúmulo, y las velocidades relativas calculadas en el encuentro son grandes, confirmando que no existe una fuerte asociación de estas estrellas con el cúmulo. El caso particular de V1865 podría ser una excepción porque presenta una probabilidad de encuentro del 3 %, aunque una velocidad relativa del encuentro alta. Esa estrella pudo haber sido eyectada del cúmulo por algún otro proceso físico.
-
- De existir estructuras externas en los alrededores de Omega Centauri, estas probablemente son de muy bajo brillo superficial para ser detectadas tan solo con estrellas RR Lyrae, que son estrellas raras. En trabajos futuros, la existencia de estructuras pudiera intentarse detectar realizando otros sondeos de estrellas más comunes (como estrellas de la secuencia principal).
 - Los resultados negativos de este trabajo sobre la existencia de estructuras externas ligadas al cúmulo ponen restricciones importantes en simulaciones de N-cuerpos que se hagan en el futuro. De confirmarse que Omega Centauri son los restos de una galaxia enana destruido las simulaciones deben predecir que en los momentos actuales las colas de marea cerca del cúmulo han sido diluidas completamente.

Capítulo 7

Resultados publicados

7.0.1. Publicaciones

- **Searching for RR Lyrae stars as tracers of stellar streams around of the Globular Cluster Omega Centauri**, (Fernandez et al. 2014; en preparación para ser publicado en el MNRAS¹)

7.0.2. Memorias en Congresos

- **Searching for RR Lyrae stars around Omega Centauri**, “Reading the book of globular clusters with the lens of stellar evolution”, Rome, Italia, 26-28 Noviembre 2012, (Fernández et al. 2013).
- **Detecting new stellar streams associated with Omega Centauri**, “XXV Congreso Nacional de Astronomía”, D. F. México, 29 de Octubre del 2013, (Fernández et al. 2013).
- **Restos de la galaxia enana asociada a Omega Centauri**, “Memorias del Primer Congreso Venezolano de Ciencia, Tecnología e Innovación en el Marco de la LOCTI y del PEII, 2012”, (Fernández et al. 2012).
- **Restos de la galaxia enana asociada a Omega Centauri**, “V Reunión Venezolana de Astronomía”, Mérida, Venezuela, 5-7 de Diciembre del

¹Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

2012, (Fernández et al. 2012).

- **Remains of the dwarf galaxy associated with Omega Centauri,**
“III Congreso Colombiano de Astronomía y Astrofísica”, Bucaramanga,
Colombia, 2012, (Fernández et al. 2012).

Apéndice A

Apéndices

A.1. Parámetros de las estrellas candidatas a RR Lyraes

Tabla A.1: Estrellas candidatas a RR Lyrae encontradas en la zona de baja compleitud.

ID	α_{J2000} (°)	δ_{J2000} (°)	tipo	Amplitud (mag)	Λ	Período (días)	N_{obs}	I (mag)	D_\odot (kpc)	E(B-V) (mag)
V1071172	202,47777	-42,65052	RRc	0,46	3,07	0,290227	21	13,46±0,17	3,76±0,39	0,097
V109307	202,93858	-44,07577	RRab	0,30	2,84	0,438500	15	13,56±0,07	4,26±0,25	0,119
V1101023	202,90109	-43,88122	RRc	0,34	2,50	0,576667	18	16,77±0,10	19,81±1,46	0,124
V110245	202,90706	-44,0901	RRc	0,20	4,64	0,221049	15	16,13±0,07	11,92±0,71	0,118
V110952	202,93639	-43,8946	RRc	0,24	3,90	0,208387	14	16,23±0,08	12,27±0,79	0,124
V114668	203,92827	-42,67741	RRab	0,37	2,69	0,651815	16	14,31±0,11	6,65±0,51	0,105
V15419	200,90565	-45,91859	RRc	0,22	2,51	0,202664	10	16,06±0,07	11,54±0,67	0,091
V416	201,05553	-52,16182	RRc	0,49	3,33	0,272850	14	14,56±0,18	5,38±0,66	0,286
V45835	199,97972	-51,98352	RRc	0,36	4,13	0,151500	10	15,25±0,12	6,62±0,61	0,255
V58567	196,02972	-52,00606	RRc	0,28	2,56	0,224649	14	13,96±0,08	3,74±0,30	0,346
V8658	197,68558	-44,13571	RRc	0,22	2,80	0,192100	18	15,12±0,06	7,03±0,41	0,162
V951084	199,63712	-42,60343	RRc	0,25	4,09	0,168246	21	15,76±0,08	9,34±0,61	0,135
V951518	200,28391	-42,40459	RRc	0,21	3,20	0,193537	12	16,09±0,07	11,17±0,68	0,142
V95403	200,19434	-42,81667	RRc	0,31	2,68	0,216730	22	16,40±0,08	13,16±0,87	0,148
V9542	200,00986	-42,93735	RRc	0,30	3,04	0,273369	17	16,09±0,07	12,07±0,74	0,143
V95957	200,07005	-42,65551	RRc	0,26	2,56	0,175852	17	16,03±0,07	10,52±0,66	0,156
V971891	199,54124	-43,69073	RRc	0,30	2,79	0,206381	10	16,15±0,11	11,71±0,93	0,134
ID	α_{J2000} (°)	δ_{J2000} (°)	tipo	Amplitud (mag)	Λ	Período (días)	N_{obs}	V (mag)	D_\odot (kpc)	E(B-V) (mag)
V1211	194,39420	-44,14279	RRc	0,36	3,01	0,229510	18	17,18±0,11	18,55±3,42	0,080
V1218	194,41617	-44,14156	RRc	0,42	2,06	0,175537	20	16,68±0,11	14,73±2,72	0,080
V127	194,27548	-44,14281	RRc	0,35	2,94	0,251493	12	16,97±0,12	16,81±3,18	0,081
V13499	195,65797	-42,03437	RRc	0,35	2,71	0,290947	18	15,16±0,10	6,80±1,27	0,129
V13558	196,08441	-42,0104	RRc	0,57	4,50	0,791206	23	14,65±0,21	5,31±1,27	0,137
V13562	195,62523	-41,99945	RRab	0,47	3,46	0,292266	14	15,26±0,15	7,11±1,50	0,130
V22138	200,27368	-43,51872	RRab	0,35	2,99	0,231387	22	16,44±0,08	11,99±2,16	0,144
V462095	197,60292	-46,85359	RRc	0,22	2,77	0,213308	10	16,49±0,07	12,96±2,21	0,107
V7605	192,93770	-43,88821	RRc	0,33	3,70	0,179532	10	16,76±0,11	15,24±2,82	0,082

1.2. Curvas de luz de las estrellas candidatas a RR Lyraes

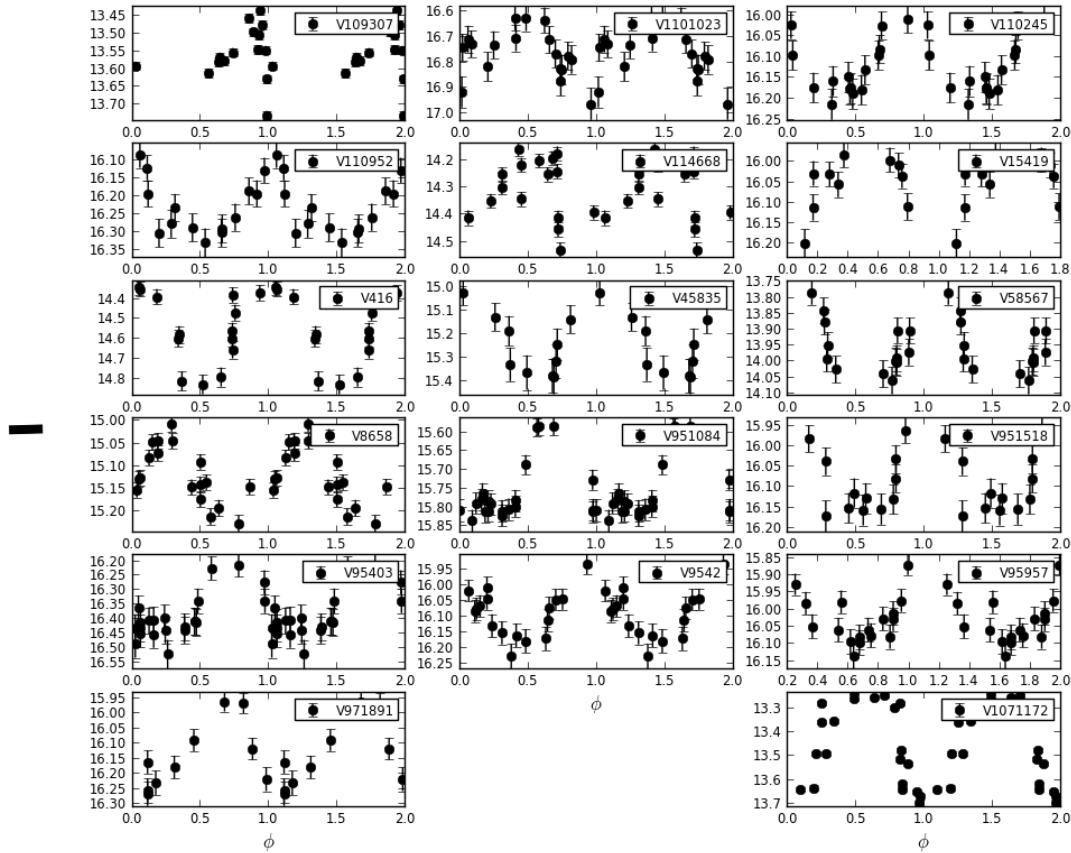


Figura 1.1: Curvas de Luz para 17 estrellas candidatas a RR Lyrae encontradas en la zona de baja completitud. El eje vertical de las curvas corresponde a las magnitudes en el filtro I.

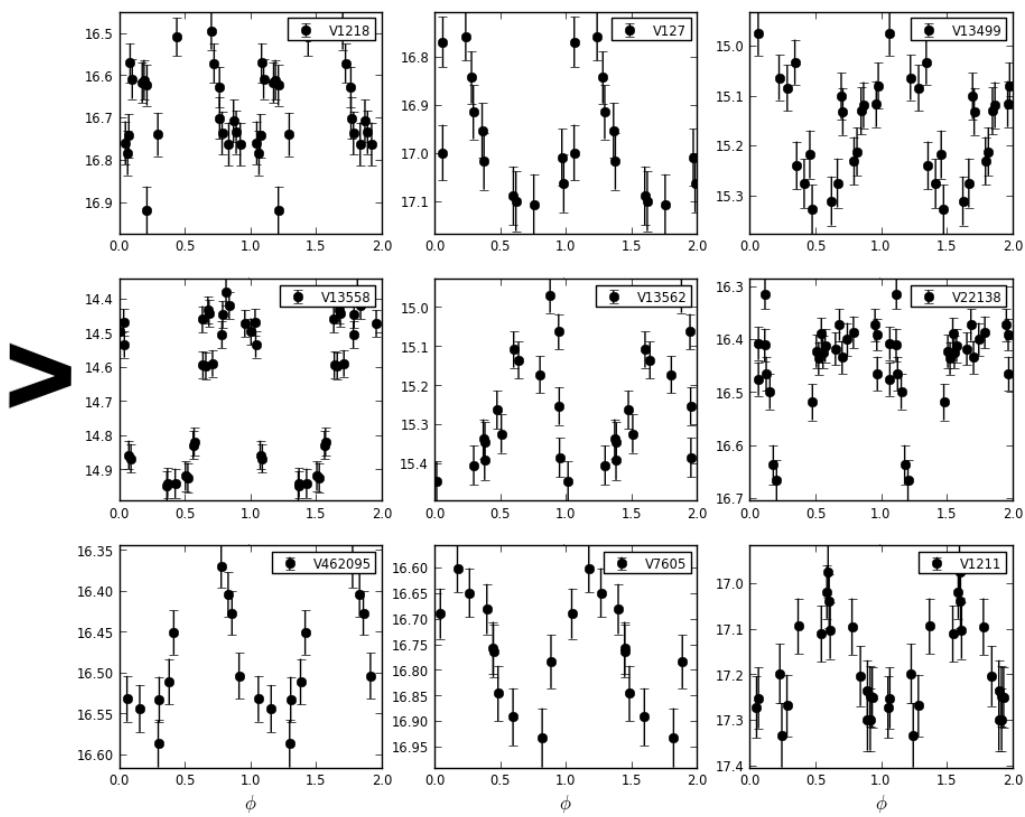


Figura 1.2: Curvas de Luz para 9 estrellas candidatas a RR Lyrae encontradas en la zona de baja complejitud. El eje vertical de las curvas corresponde a las magnitudes en el filtro V.

Bibliografía

- [1] AARSETH, S. *The Slingshot Revisited*. University of Turku, 2006, p. 1.
- [2] ALLEN, C., AND SANTILLAN, A. An improved model of the galactic mass distribution for orbit computations. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 22 (Oct. 1991), 255–263.
- [3] BAILEY, S. I. A discussion of variable stars in the cluster ω Centauri. *Harvard College Observatory Annual*, 38 (1902), 1.
- [4] BALTAY, C., SNYDER, J. A., ANDREWS, P., EMMET, W., SCHAEFER, B., SINNOTT, J., BAILYN, C., COPPI, P., OEMLER, A., SABBEY, C. N., SOFIA, S., VAN ALTENA, W., VIVAS, A. K., ABAD, C., BONGIOVANNI, A., BRICEÑO, C., BRUZUAL, G., DELLA PRUGNA, F., MAGRIS, G., SÁNCHEZ, G., SÁNCHEZ, G., SCHENNER, H., STOCK, J., ADAMS, B., GEBHARD, M., HONEYCUTT, R. K., MUSSER, J., RENGSTORF, A., FERRIN, I., FUENMAYOR, F., HERNANDEZ, J., NARANJO, O., ROSENZWEIG, P., HARRIS, F., AND GEARY, J. A Large-Area CCD Camera for the Schmidt Telescope at the Venezuelan National Astronomical Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 114 (July 2002), 780–794.
- [5] BEDIN, L. R., PIOTTO, G., ANDERSON, J., CASSISI, S., KING, I. R., MOMANY, Y., AND CARRARO, G. ω Centauri: The Population Puzzle Goes Deeper. *The Astrophysical Journal, Letters*, 605 (Apr. 2004), L125–L128.

- [6] BEKKI, K., AND FREEMAN, K. C. Formation of ω Centauri from an ancient nucleated dwarf galaxy in the young Galactic disc. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 346 (Dec. 2003), L11–L15.
- [7] BELLINI, A., BEDIN, L. R., PIOTTO, G., MILONE, A. P., MARINO, A. F., AND VILLANOVA, S. New Hubble Space Telescope WFC3/UVIS Observations Augment the Stellar-population Complexity of ω Centauri. *The Astronomical Journal*, 140 (Aug. 2010), 631–641.
- [8] BENJAMIN, R. A., CHURCHWELL, E., BABLER, B. L., INDEBETOUW, R., MEADE, M. R., WHITNEY, B. A., WATSON, C., WOLFIRE, M. G., WOLFF, M. J., IGNACE, R., BANIA, T. M., BRACKER, S., CLEMENS, D. P., CHOMIUK, L., COHEN, M., DICKEY, J. M., JACKSON, J. M., KOBULNICKY, H. A., MERCER, E. P., MATHIS, J. S., STOLOVY, S. R., AND UZPEN, B. First GLIMPSE Results on the Stellar Structure of the Galaxy. *The Astrophysical Journal, Letters*, 630 (Sept. 2005), L149–L152.
- [9] BINDER, K., AND HEERMANN, D. W. *Monte Carlo simulation in statistical physics : an introduction*. 1997.
- [10] BINNEY, J., AND TREMAINE, S. *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, 2008.
- [11] BRUNTHALER, A., REID, M. J., MENTEN, K. M., ZHENG, X.-W., BARTKIEWICZ, A., CHOI, Y. K., DAME, T., HACHISUKA, K., IMMER, K., MOELLENBROCK, G., MOSCADELLI, L., RYGL, K. L. J., SANNA, A., SATO, M., WU, Y., XU, Y., AND ZHANG, B. The Bar and Spiral Structure Legacy (BeSSeL) survey: Mapping the Milky Way with VLBI astrometry. *Astronomische Nachrichten*, 332 (June 2011), 461.
- [12] BURDEN, R. L., AND FAIRES, J. D. *Numerical analysis*. 2001.

- [13] CAROLLO, D., BEERS, T. C., CHIBA, M., NORRIS, J. E., FREEMAN, K. C., LEE, Y. S., IVEZIĆ, Ž., ROCKOSI, C. M., AND YANNY, B. Structure and Kinematics of the Stellar Halos and Thick Disks of the Milky Way Based on Calibration Stars from Sloan Digital Sky Survey DR7. *The Astrophysical Journal*, 712 (Mar. 2010), 692–727.
- [14] CARRETTA, E., BRAGAGLIA, A., GRATTON, R., AND LUCATELLO, S. Na-O anticorrelation and HB. VIII. Proton-capture elements and metallicities in 17 globular clusters from UVES spectra. *Astronomy and Astrophysics*, 505 (Oct. 2009), 139–155.
- [15] CARRETTA, E., BRAGAGLIA, A., GRATTON, R. G., LUCATELLO, S., BELLAZZINI, M., CATANZARO, G., LEONE, F., MOMANY, Y., PIOTTO, G., AND D’ORAZI, V. M54 + Sagittarius = ω Centauri. *The Astrophysical Journal, Letters*, 714 (May 2010), L7–L11.
- [16] CARRETTA, E., BRAGAGLIA, A., GRATTON, R. G., LUCATELLO, S., CATANZARO, G., LEONE, F., BELLAZZINI, M., CLAUDI, R., D’ORAZI, V., MOMANY, Y., ORTOLANI, S., PANCINO, E., PIOTTO, G., RECIO-BLANCO, A., AND SABBBI, E. Na-O anticorrelation and HB. VII. The chemical composition of first and second-generation stars in 15 globular clusters from GIRAFFE spectra. *Astronomy and Astrophysics*, 505 (Oct. 2009), 117–138.
- [17] CASEY, A. R., KELLER, S., ALVES-BRITO, A., FREBEL, A., DA COSTA, G., KARAKAS, A., YONG, D., SCHLAUFMAN, K., JACOBSON, H. R., YU, Q., AND FISHLOCK, C. The Aquarius Co-Moving Group is Not a Disrupted Classical Globular Cluster. *ArXiv e-prints*, (Sept. 2013).
- [18] CATELAN, M., PRITZL, B. J., AND SMITH, H. A. The RR Lyrae Period-Luminosity Relation. I. Theoretical Calibration. *The Astrophysical Journal, Supplement*, 154 (Oct. 2004), 633–649.

- [19] DA COSTA, G. S., AND COLEMAN, M. G. A Spectroscopic Survey for ω Centauri Members at and beyond the Cluster Tidal Radius. *The Astronomical Journal*, **136** (July 2008), 506–517.
- [20] DINESCU, D. I., VAN ALTEA, W. F., GIRARD, T. M., AND LÓPEZ, C. E. Space Velocities of Southern Globular Clusters. II. New Results for 10 Clusters. *The Astronomical Journal*, **117** (Jan. 1999), 277–285.
- [21] D’ORAZI, V., GRATTON, R. G., PANCINO, E., BRAGAGLIA, A., CARRETTA, E., LUCATELLO, S., AND SNEDEN, C. Chemical enrichment mechanisms in ω Centauri: clues from neutron-capture elements. *Astronomy and Astrophysics*, **534** (Oct. 2011), A29.
- [22] DRIMMEL, R. Evidence for a two-armed spiral in the Milky Way. *Astronomy and Astrophysics*, **358** (June 2000), L13–L16.
- [23] FERNÁNDEZ, J. G. *Búsqueda de estrellas RR Lyraes en los alrededores de Omega Centauri (NGC5139)*. Tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela, 2011.
- [24] FERNÁNDEZ TRINCADO, J. G., VIVAS, A. K., MATEU, C. E., AND ZINN, R. Searching for RR Lyrae stars around omega Centauri (NGC5139). *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, **84** (2013), 265.
- [25] FREUDENREICH, H. T. A COBE Model of the Galactic Bar and Disk. *The Astrophysical Journal*, **492** (Jan. 1998), 495.
- [26] GERHARD, O. The Galactic Bar. In *The Dynamics, Structure History of Galaxies: A Workshop in Honour of Professor Ken Freeman* (2002), G. S. Da Costa, E. M. Sadler, and H. Jerjen, Eds., vol. 273 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*,, p. 73.
- [27] GERHARD, O. Pattern speeds in the Milky Way. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, **18** (2011), 185.

- [28] GIRARD, T. M., VAN ALTEA, W. F., ZACHARIAS, N., VIEIRA, K., CASETTI-DINESCU, D. I., CASTILLO, D., HERRERA, D., LEE, Y. S., BEERS, T. C., MONET, D. G., AND LÓPEZ, C. E. The Southern Proper Motion Program. IV. The SPM4 Catalog. *The Astronomical Journal*, 142 (July 2011), 15.
- [29] GRATTON, R. G., CARRETTA, E., AND BRAGAGLIA, A. Multiple populations in globular clusters. Lessons learned from the Milky Way globular clusters. *Astronomy Astrophysics Reviews*, 20 (Feb. 2012), 50.
- [30] HAGGARD, D., COOL, A. M., HEINKE, C. O., VAN DER MAREL, R., COHN, H. N., LUGGER, P. M., AND ANDERSON, J. A Deep Chandra X-Ray Limit on the Putative IMBH in Omega Centauri. *The Astrophysical Journal, Letters*, 773 (Aug. 2013), L31.
- [31] HARRIS, W. The Most Massive Star Clusters: Supermassive Globular Clusters or Dwarf Galaxy Nuclei? In *HST Proposal* (July 2004), p. 10260.
- [32] HARRIS, W. E. A New Catalog of Globular Clusters in the Milky Way journal = ArXiv e-prints,, archiveprefix =.
- [33] HILKER, M., AND RICHTLER, T. ω Centauri - a former nucleus of a dissolved dwarf galaxy? New evidence from Strömgren photometry. *Astronomy and Astrophysics*, 362 (Oct. 2000), 895–909.
- [34] HILTNER, W. A. *ASTRONOMICAL TECHNIQUES*. Ed. The University of Chicago Press, 1962.
- [35] HUGHES, J., WALLERSTEIN, G., VAN LEEUWEN, F., AND HILKER, M. The Giant Branches of ω Centauri: Multiwavelength Observations of Evolved Stars. *The Astronomical Journal*, 127 (Feb. 2004), 980–990.
- [36] HUT, P., AND BAHCALL, J. N. Binary-single star scattering. I - Numerical experiments for equal masses. *The Astrophysical Journal*, 268 (May 1983), 319–341.

- [37] IDETA, M., AND MAKINO, J. Formation of ω Centauri by Tidal Stripping of a Dwarf Galaxy. *The Astrophysical Journal, Letters*, 616 (Dec. 2004), L107–L110.
- [38] JALALI, B., BAUMGARDT, H., KISSLER-PATIG, M., GEBHARDT, K., NOYOLA, E., LÜTZGENDORF, N., AND DE ZEEUW, P. T. A Dynamical N-body model for the central region of ω Centauri. *Astronomy and Astrophysics*, 538 (Feb. 2012), A19.
- [39] JOHNSTON, K. V., ZHAO, H., SPERGEL, D. N., AND HERNQUIST, L. Tidal Streams as Probes of the Galactic Potential. *The Astrophysical Journal, Letters*, 512 (Feb. 1999), L109–L112.
- [40] JOO, S.-J., AND LEE, Y.-W. Star Formation Histories of Globular Clusters with Multiple Populations. I. ω CEN, M22, and NGC 1851. *The Astrophysical Journal*, 762 (Jan. 2013), 36.
- [41] KALUZNY, J., OLECH, A., THOMPSON, I. B., PYCH, W., KRZEMINSKI, W., AND SZCHWARZENBERG-CZERNY, A. Variable Stars in the field of {omega} Cen (Kaluzny+, 2004). *VizieR Online Data Catalog*, 342 (June 2004), 41101.
- [42] KING, I. R., BEDIN, L. R., CASSISI, S., MILONE, A. P., BELLINI, A., PIOTTO, G., ANDERSON, J., PIETRINFERNI, A., AND CORDIER, D. Hubble Space Telescope Observations of an Outer Field in Omega Centauri: A Definitive Helium Abundance. *The Astronomical Journal*, 144 (July 2012), 5.
- [43] LAFLER, J., AND KINMAN, T. D. An RR Lyrae Star Survey with The Lick 20-INCH Astrograph II. The Calculation of RR Lyrae Periods by Electronic Computer. *The Astrophysical Journal, Supplement*, 11 (June 1965), 216.
- [44] LEE, Y.-W., JOO, J.-M., SOHN, Y.-J., REY, S.-C., LEE, H.-C., AND WALKER, A. R. Multiple stellar populations in the globular cluster ω Centauri as tracers of a merger event. *Nature*, 402 (Nov. 1999), 55–57.

- [45] LEON, S., MEYLAN, G., AND COMBES, F. Tidal tails around 20 Galactic globular clusters. Observational evidence for gravitational disk/bulge shocking. *Astronomy and Astrophysics*, 359 (July 2000), 907–931.
- [46] LU, T.-N., AND KONG, A. K. H. Radio Continuum Observations of 47 Tucanae and ω Centauri: Hints for Intermediate-mass Black Holes? *The Astrophysical Journal, Letters*, 729 (Mar. 2011), L25.
- [47] MAJEWSKI, S. R., NIDEVER, D. L., SMITH, V. V., DAMKE, G. J., KUNKEL, W. E., PATTERSON, R. J., BIZYAEV, D., AND GARCÍA PÉREZ, A. E. Exploring Halo Substructure with Giant Stars: Substructure in the Local Halo as Seen in the Grid Giant Star Survey Including Extended Tidal Debris from ω Centauri. *The Astrophysical Journal, Letters*, 747 (Mar. 2012), L37.
- [48] MAJEWSKI, S. R., PATTERSON, R. J., DINESCU, D. I., JOHNSON, W. Y., OSTHEIMER, J. C., KUNKEL, W. E., AND PALMA, C. ω Centauri : Nucleus of a milky way dwarf spheroidal ? In *Liege International Astrophysical Colloquia* (2000), A. Noels, P. Magain, D. Caro, E. Jehin, G. Parmentier, and A. A. Thoul, Eds., vol. 35 of *Liege International Astrophysical Colloquia*, p. 619.
- [49] MARINO, A. F., VILLANOVA, S., PIOTTO, G., MILONE, A. P., MOMANY, Y., BEDIN, L. R., AND MEDLING, A. M. Spectroscopic and photometric evidence of two stellar populations in the Galactic globular cluster NGC 6121 (M 4). *Astronomy and Astrophysics*, 490 (Nov. 2008), 625–640.
- [50] MATEU, C. *CARACTERIZACIÓN DE LA POBLACIÓN DE RR LYRAE EN EL DISCO GRUESO DE LA VÍA LÁCTEA*. Tesis de Doctorado, Universidad Central de Venezuela, 2011.
- [51] MATEU, C., VIVAS, A. K., ZINN, R., MILLER, L. R., AND ABAD, C. No Excess of RR Lyrae Stars in the Canis Major Overdensity. *The Astronomical Journal*, 137 (May 2009), 4412–4423.

- [52] MERRITT, D., MEYLAN, G., AND MAYOR, M. The stellar dynamics of omega centauri. *The Astronomical Journal*, 114 (Sept. 1997), 1074–1086.
- [53] MEYLAN, G. Studies of dynamical properties of globular clusters. III - Anisotropy in Omega Centauri. *Astronomy and Astrophysics*, 184 (Oct. 1987), 144–154.
- [54] MEYLAN, G., AND MAYOR, M. Studies of dynamical properties of globular clusters. II - The rotation, velocity dispersion and mass of Omega Centauri and 47 Tucanae. *Astronomy and Astrophysics*, 166 (Sept. 1986), 122–142.
- [55] MEYLAN, G., MAYOR, M., DUQUENNOY, A., AND DUBATH, P. Central velocity dispersion in the globular cluster ω Centauri. *Astronomy and Astrophysics*, 303 (Nov. 1995), 761.
- [56] MINK, D. J. WCSTools 3.0: More Tools for Image Astrometry and Catalog Searching. In *Astronomical Data Analysis Software and Systems XI*, (2002), D. A. Bohlender, D. Durand, and T. H. Handley, Eds., vol. 281 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 169.
- [57] MIYAMOTO, M., AND NAGAI, R. Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 27 (1975), 533–543.
- [58] MONELLI, M., MILONE, A. P., STETSON, P. B., MARINO, A. F., CASSISI, S., DEL PINO MOLINA, A., SALARIS, M., APARICIO, A., ASPLUND, M., GRUNDAHL, F., PIOTTO, G., WEISS, A., CARRERA, R., CEBRIÁN, M., MURABITO, S., PIETRINFERNI, A., AND SBORDONE, L. The SUMO project I. A survey of multiple populations in globular clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431 (May 2013), 2126–2149.
- [59] NISSEN, P. E., AND SCHUSTER, W. J. Two distinct halo populations in the solar neighborhood. Evidence from stellar abundance ratios and kinematics. *Astronomy and Astrophysics*, 511 (Feb. 2010), L10.

- [60] NOYOLA, E., GEBHARDT, K., AND BERGMANN, M. Evidence for an Intermediate Mass Black Hole in Omega Centauri. In *New Horizons in Astronomy: Frank N. Bash Symposium*, (Sept. 2006), S. J. Kannappan, S. Redfield, J. E. Kessler-Silacci, M. Landriau, and N. Drory, Eds., vol. 352 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 269.
- [61] NOYOLA, E., GEBHARDT, K., AND BERGMANN, M. Gemini and Hubble Space Telescope Evidence for an Intermediate-Mass Black Hole in ω Centauri. *The Astrophysical Journal*, 676 (Apr. 2008), 1008–1015.
- [62] NOYOLA, E., GEBHARDT, K., KISSLER-PATIG, M., LÜTZGENDORF, N., JALALI, B., DE ZEEUW, P. T., AND BAUMGARDT, H. Very Large Telescope Kinematics for Omega Centauri: Further Support for a Central Black Hole. *The Astrophysical Journal, Letters*, 719 (Aug. 2010), L60–L64.
- [63] PANCINO, E., PASQUINI, L., HILL, V., FERRARO, F. R., AND BELLAZZINI, M. High-Resolution Spectroscopy of Metal-rich Giants in ω Centauri: First Indication of Type Ia Supernova Enrichment. *The Astrophysical Journal, Letters*, 568 (Apr. 2002), L101–L105.
- [64] PICHARDO, B., MORENO, E., ALLEN, C., BEDIN, L. R., BELLINI, A., AND PASQUINI, L. The Sun was Not Born in M67. *The Astronomical Journal*, 143 (Mar. 2012), 73.
- [65] PIOTTO, G. Multiple populations in globular clusters. *Highlights of Astronomy*, 14 (Aug. 2007), 434–435.
- [66] PRESTON, G. W., SHECTMAN, S. A., AND BEERS, T. C. Photoelectric UVB photometry of stars selected in the HK objective-prism survey. *The Astrophysical Journal, Supplement*, 76 (July 1991), 1001–1031.
- [67] REID, M. J. The distance to the center of the Galaxy. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 31 (1993), 345–372.

- [68] ROBIN, A. C., REYLÉ, C., DERRIÈRE, S., AND PICAUD, S. A synthetic view on structure and evolution of the Milky Way. *Astronomy and Astrophysics*, *409* (Oct. 2003), 523–540.
- [69] SCHLEGEL, D. J., FINKBEINER, D. P., AND DAVIS, M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *The Astrophysical Journal*, *500* (June 1998), 525.
- [70] SCHUSTER, W. J., MORENO, E., NISSEN, P. E., AND PICHARDO, B. Two distinct halo populations in the solar neighborhood. III. Evidence from stellar ages and orbital parameters. *Astronomy and Astrophysics*, *538* (Feb. 2012), A21.
- [71] SMITH, H. A. Books-Received - Rr-Lyrae Stars. *Science*, *270* (Nov. 1995), 1236.
- [72] SOLLIMA, A., BORISOVA, J., CATELAN, M., SMITH, H. A., MINNITI, D., CACCIARI, C., AND FERRARO, F. R. New Metallicities of RR Lyrae Stars in ω Centauri: Evidence for a Non-He-enhanced Metal-intermediate Population. *The Astrophysical Journal, Letters*, *640* (Mar. 2006), L43–L46.
- [73] SOLLIMA, A., FERRARO, F. R., BELLAZZINI, M., ORIGLIA, L., STRANIERO, O., AND PANCINO, E. Deep FORS1 Observations of the Double Main Sequence of ω Centauri. *The Astrophysical Journal*, *654* (Jan. 2007), 915–922.
- [74] SOLLIMA, A., FERRARO, F. R., ORIGLIA, L., PANCINO, E., AND BELLAZZINI, M. IR photometric properties of Red Giants in ω Cen. *Astronomy and Astrophysics*, *420* (June 2004), 173–181.
- [75] SOLLIMA, A., FERRARO, F. R., PANCINO, E., AND BELLAZZINI, M. On the discrete nature of the red giant branch of ω Centauri. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *357* (Feb. 2005), 265–274.
- [76] THOMPSON, I. B., KALUZNY, J., PYCH, W., BURLEY, G., KRZEMINSKI, W., PACZYŃSKI, B., PERSSON, S. E., AND PRESTON, G. W. Cluster AgeS Experiment: The Age and Distance of the Globular Cluster ω Centauri Determined from

- Observations of the Eclipsing Binary OGLEGC 17. *The Astronomical Journal*, 121 (June 2001), 3089–3099.
- [77] TRENTI, M., AND VAN DER MAREL, R. No energy equipartition in globular clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, (Sept. 2013).
- [78] TSUCHIYA, T., KORCHAGIN, V. I., AND DINESCU, D. I. Disruption of a dwarf galaxy under strong shocking: the origin of ω Centauri. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 350 (May 2004), 1141–1151.
- [79] VALCARCE, A. A. R., AND CATELAN, M. Formation of multiple populations in globular clusters: another possible scenario. *Astronomy and Astrophysics*, 533 (Sept. 2011), A120.
- [80] VAN DER MAREL, R. P., AND ANDERSON, J. New Limits on an Intermediate-Mass Black Hole in Omega Centauri. II. Dynamical Models. *The Astrophysical Journal*, 710 (Feb. 2010), 1063–1088.
- [81] VAN LOON, J. T., VAN LEEUWEN, F., SMALLEY, B., SMITH, A. W., LYONS, N. A., McDONALD, I., AND BOYER, M. L. A spectral atlas of post-main-sequence stars in ω Centauri: kinematics, evolution, enrichment and interstellar medium. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382 (Dec. 2007), 1353–1374.
- [82] VILLANOVA, S., PIOTTO, G., KING, I. R., ANDERSON, J., BEDIN, L. R., GRATTON, R. G., CASSISI, S., MOMANY, Y., BELLINI, A., COOL, A. M., RECIO-BLANCO, A., AND RENZINI, A. The Multiplicity of the Subgiant Branch of ω Centauri: Evidence for Prolonged Star Formation. *The Astrophysical Journal*, 663 (July 2007), 296–314.
- [83] VIVAS, A. K., JAFFÉ, Y. L., ZINN, R., WINNICK, R., DUFFAU, S., AND MATEU, C. Spectroscopy of Bright Quest RR Lyrae Stars: Velocity Substructures Toward Virgo. *The Astronomical Journal*, 136 (Oct. 2008), 1645–1657.

- [84] VIVAS, A. K., AND ZINN, R. The QUEST RR Lyrae Survey. II. The Halo Overdensities in the First Catalog. *The Astronomical Journal*, **132** (Aug. 2006), 714–728.
- [85] VIVAS, A. K., ZINN, R., ABAD, C., ANDREWS, P., BAILYN, C., BALAY, C., BONGIOVANNI, A., BRICEÑO, C., BRUZUAL, G., COPPI, P., DELLA PRUGNA, F., ELLMAN, N., FERRÍN, I., GEBHARD, M., GIRARD, T., HERNANDEZ, J., HERRERA, D., HONEYCUTT, R., MAGRIS, G., MUFSON, S., MUSSER, J., NARANJO, O., RABINOWITZ, D., RENGSTORF, A., ROSENZWEIG, P., SÁNCHEZ, G., SÁNCHEZ, G., SCHAEFER, B., SCHENNER, H., SNYDER, J. A., SOFIA, S., STOCK, J., VAN ALTEA, W., VICENTE, B., AND VIEIRA, K. The QUEST RR Lyrae Survey. I. The First Catalog. *The Astronomical Journal*, **127** (Feb. 2004), 1158–1175.
- [86] VIVAS, A. K., ZINN, R., AND GALLART, C. VLT Spectroscopy of RR Lyrae Stars in the Sagittarius Tidal Stream. *The Astronomical Journal*, **129** (Jan. 2005), 189–200.
- [87] WELDRAKE, D. T. F., SACKETT, P. D., AND BRIDGES, T. J. A Deep Wide-Field Variable Star Catalog of ω Centauri. *The Astronomical Journal*, **133** (Apr. 2007), 1447–1469.
- [88] WHITE, R. E., AND SHAWL, S. J. Axial ratios and orientations for 100 Galactic globular star clusters. *The Astrophysical Journal*, **317** (June 1987), 246–263.
- [89] WYLIE-DE BOER, E., FREEMAN, K., AND WILLIAMS, M. Evidence of Tidal Debris from ω Cen in the Kapteyn Group. *The Astronomical Journal*, **139** (Feb. 2010), 636–645.
- [90] ZACHARIAS, N., FINCH, C. T., GIRARD, T. M., HENDEN, A., BARTLETT, J. L., MONET, D. G., AND ZACHARIAS, M. I. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4). *The Astronomical Journal*, **145** (Feb. 2013), 44.

- [91] ZOROTOVIC, M., CATELAN, M., SMITH, H. A., PRITZL, B. J., AGUIRRE, P., ANGULO, R. E., ARAVENA, M., ASSEF, R. J., CONTRERAS, C., CORTÉS, C., DE MARTINI, G., ESCOBAR, M. E., GONZÁLEZ, D., JOFRÉ, P., LACERNA, I., NAVARRO, C., PALMA, O., PRIETO, G. E., RECABARREN, E., TRIVIÑO, J., AND VIDAL, E. Erratum: "The Globular Cluster NGC 5286. II. Variable Stars". *The Astronomical Journal*, 140 (Sept. 2010), 912.