



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
DIRECCIÓN DE POSTGRADOS Y POSTÍTULOS

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO ASTRONOMÍA

**Caracterización Astrométrica a la red de
telescopios FALCON**

Tesis presentada para optar al Grado Académico de Magíster en Astronomía.
--

AUTOR: PABLO VERA ALFARO

LA SERENA, CHILE, ABRIL 2024

CONSTANCIA

Don

HACE CONSTAR:

Que el trabajo correspondiente a la presente Tesis de Magíster, titulada “Caracterización Astrométrica a la red de telescopios FALCON”, ha sido realizada por Pablo Enrique Vera Alfaro, bajo mi dirección.

Para que conste y en cumplimiento de las normativas vigentes de la Universidad de la Serena, Chile, firmo el presente documento en La Serena, Chile, Abril del 2024.

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN ASTRO-
NOMÍA**

TÍTULO : CARACTERIZACIÓN ASTROMETRICA A LA
RED DE TELESCOPIOS FALCON.

PRESENTADA POR : PABLO ENRIQUE VERA ALFARO

DIRECTOR DE TESIS : JOSÉ LUIS NILO CASTELLÓN

TRIBUNAL CALIFICADOR

El tribunal de tesis, conformado por:

PRESIDENTE :

MIEMBROS DEL TRIBUNAL: *

*

*

ACUERDAN OTORGARLE LA CALIFICACIÓN DE:

La Serena, Chile, **Abril de 2024**

El Universo, eso es suficiente...

Tener la dicha que con su gracia y belleza me ha abrazado tan estrechamente a él durante largas noches, eso es suficiente.

Suficiente la felicidad de conocerlo a través de un lente, reverenciando todos los fenómenos cósmicos, hasta el punto de querer olfatearlos y hasta degustarlos.

No quiero que las galaxias estén mas cerca, están bien donde están o estuvieron... Solo quiero vivir un poco más para descubrir por qué estoy donde estoy, y no dónde están ellas.

¿El observar el cielo será suficiente?, bueno para algunos no, para otros quizás, pero para mi es como escuchar una narrativa continua, una historia en la que cada estrella y cada galaxia, me habla sobre nuestro pasado, me deslumbra en el presente y me guía hacia el futuro.

Pablo V.

AGRADECIMIENTOS

Dedico este pequeño párrafo para reconocer el apoyo y las buenas intenciones que me ha brindado mi círculo cercano en esta etapa de mi carrera, a la gente que creyó en mí y me dio la oportunidad de hacer un posgrado en un tema poco ortodoxo, en un tiempo de virus incontrolables y cuando las relaciones interpersonales se limitaban a una pantalla. Agradezco, primeramente, a Pablo del pasado por no tener miedo nunca y no rendirse cuando las cosas no iban tan bien. A mi familia, Roxana, Paula y Valentina, que siempre han confiado en mí, me han apoyado incondicionalmente desde siempre. A mis amigos de toda la vida que, pese al poco tiempo dedicado a ellos, entienden el ritmo frenético de un científico. A mi gran amigo Jacob Zepeda por darme trabajo cuando más lo necesité y enseñarme matices de la vida. A mis compañeros de licenciatura y posgrado por ayudar desinteresadamente y ser un apoyo cuando las cosas se salían de las manos, especialmente a esos compañeros que quisieron acompañarme a sentir frío en las observaciones invernales solo con las estrellas como techo protector. A mi gran amigo y compañero Andrés, el barbón Almeida (Universidad de Virginia) y a su familia, por confiar ciegamente en mí, cambiar mi vida y enseñarme el camino en este lindo mundo de la observación astronómica. A mis compañeros y compañeras de Sloan Digital Sky Survey y del Observatorio Las Campanas por darme un empujón durante las noches de observación y hacer de un trabajo pesado algo ameno y entretenido. Quiero agradecer a Guillermo Damke (NOIRLab) por ayudarme desinteresadamente cuando los polinomios no modelaban nada y a Marcelo Jaque (ULS) por escucharme y darme buenos consejos en cada avance de tesis. También quiero agradecer especialmente a René Méndez (U de Chile) y Katherine Vieira (U de Atacama) por enseñarme esta ciencia oscura y selecta que es la astrometría y dejarme volar dentro de un telescopio. Por supuesto, a Francis Chun de la Academia de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos por darme la confianza y entregarme su red mundial de telescopios para jugar un rato.

Finalmente, me gustaría agradecer a José Luis Nilo Castellón por darme la confianza y la oportunidad para tomar este desafío cuando varios cerraban las puertas. También por no tener miedo a salir de lo establecido y tomar riesgos con un estudiante que tenía una segunda vida y responsabilidades detrás de los cumplimientos de la academia.

Por darme la libertad de elegir siempre, por ser más que un director, un compañero de aprendizaje y un amigo. Les deseo una buena vida a todos los que se sienten aludidos en este párrafo. Por cierto, esta tesis está realizada con mucho cariño y, buena disposición, porque la idea es disfrutar este proceso que se vive una vez. Me dejaron volar en un ambiente extremadamente grato y familiar para mí. Trabajar en una montaña plagada de estrellas fue una constante en este proyecto. Espero que todos los que lean este trabajo no se dejen llevar por la inercia y elijan lo que realmente quieran hacer en sus vidas. Que sus trabajos, educación o estatus, no cambien su verdadera esencia. Para los amigos científicos, dedíquense a lo que realmente les motive y preocúpense que sus proyectos no se pierdan en estantes llenos de polvo, que sean útiles!!. Escribanlo como una historia. Siéntanse orgullosos de presentarlo a la gente, porque bien o mal calificado es una obra propia, un sello de su personalidad y un registro que quedará para siempre.

Dedico esta tesis a mi hijo Santiago, no creo que haya que verbalizar el por qué.

Resumen

En el presente trabajo de tesis, se expusieron los resultados relativos al estudio titulado “Aplicaciones de soluciones astrométricas a la red de telescopios FALCON”. Este proyecto se materializó a través de una colaboración que se remonta al año 2015 entre la Universidad de La Serena (ULS) y la Academia de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAFA), contando, asimismo, con valiosos aportes de instituciones académicas chilenas, entre las que se destacan la Universidad de Atacama (UDA) y la Universidad de Chile (UCh).

FALCON Telescope Network, desarrollado por el Centro para la Investigación de la Conciencia de la Situación Espacial del Departamento de Física de la Academia de la Fuerza Aérea estadounidense, constituye una red de telescopios comerciales de pequeña apertura (Chun et al. (2018)), con espejos de 20 pulgadas, distribuidos globalmente en diversas zonas geográficas que abarcan desde Australia y África hasta Alemania, Chile, EEUU, entre otras localidades, cubriendo posiciones estratégicas en ambos hemisferios con el objetivo principal de permitir que los telescopios trabajen de manera conjunta para realizar observaciones simultáneas y/o continuas de un solo objeto celeste. Esta capacidad facilita la observación de satélites artificiales desde diversas ubicaciones terrestres y en una amplia gama de órbitas, la obtención continua de datos de fuentes astronómicas variables y observaciones de fenómenos transitorios que demandan un seguimiento inmediato, sin soslayar el estudio del Universo cercano.

Además, la red de telescopios FALCON cuenta con la capacidad de operar las unidades tanto de manera presencial como remota, brindando facilidades para la

observación desde cualquier parte del mundo. Esto es posible gracias a que todas las unidades (8 operativas hasta ahora) son idénticas, tanto en software como en hardware, y, por lo tanto, son operables de la misma manera.

No obstante, una de las principales deficiencias en este proyecto de envergadura reside en la falta de un estudio detallado de las capacidades intrínsecas de las unidades, que abarca desde hardware, óptica, sensores, resolución, hasta las influencias climáticas y atmosféricas del lugar donde fueron instaladas. En resumen, se evidencia una carencia de caracterización de los telescopios, principalmente en cuanto a la caracterización óptica y astrométrica, las cuales desempeñan un papel fundamental para los objetivos principales de la red nombrados anteriormente.

Con la intención de aportar significativamente a esta colaboración científica, se asumió la tarea de desarrollar un código que proporcione soluciones astrométricas suficientemente precisas para los objetivos del proyecto. El procedimiento que se presenta en este trabajo opera sobre datos astronómicos tomados con las unidades FALCON-ULS (Vicuña, Chile) y FALCON-CMU (Colorado, EEUU) de la red FALCON durante los inviernos del año 2022 y 2023. Este código combina herramientas de reducción astronómica, sistemas de transformación de coordenadas, detección y análisis de fuentes, modelos de refracción atmosférica, modelamiento de datos en el plano focal, funciones de minimización polinomial, mapas de distorsión y modelos estadísticos basados en Python. Además, se utilizaron softwares astronómicos como TopCat (Taylor (2011)) para el manejo de catálogos, y SExtractor (Bertin & Arnouts (1996)) para la detección y creación de catálogos.

Como resultado de esta colaboración, se logró el objetivo de caracterizar astrométricamente el sistema óptico, específicamente en referencia a distorsiones derivadas del sensor que corresponden al plano focal de dos de las unidades de la red FALCON, una ubicada en cada hemisferio. La caracterización astrométrica, basada en el modelado de los planos focales y sus respectivos residuos, proporcionó información sobre errores sistemáticos correspondientes a distintos factores como el “zero point”, escala (factor de escala), tilt y OFAD (Distorsión Angular

del Campo Óptico). Asimismo, el código creado tiene el potencial y la precisión para mitigar diferentes efectos atmosféricos y ópticos relacionados a las posiciones de objetos celestes. Además se presentó como resultado del trabajo una máscara correctora los efectos estudiados en esta tesis. Se espera que el empleo de este código sea un factor determinante e influyente en el desarrollo de la red.

Summary

In the present thesis work, the results related to the study entitled *Applications of Astrometric Solutions to the FALCON Telescope Network* are presented. This project materialized through a collaboration dating back to 2015 between the University of La Serena (ULS) and the United States Air Force Academy (USAFA), also counting on valuable contributions from Chilean academic institutions, among which are the University of Atacama (UDA) and the University of Chile (UCh) stand out.

The FALCON Telescope Network, developed by the Center for Space Situational Awareness Research at the Physics Department of the United States Air Force Academy, constitutes a network of small-aperture commercial telescopes Chun et al. (2018), with 20-inch mirrors, distributed globally across various geographical areas ranging from Australia and Africa to Germany, Chile, the USA, among other locations, covering strategic positions in both hemispheres with the main goal of allowing the telescopes to work together to carry out simultaneous and/or continuous observations of a single celestial object. This capability facilitates the observation of artificial satellites from various terrestrial locations and in a wide range of orbits, the continuous gathering of data from variable astronomical sources, and observations of transient phenomena that demand immediate follow-up, without neglecting the study of the nearby Universe.

Moreover, the FALCON telescope network has the ability to operate units both in-person and remotely, providing facilities for observation from anywhere in the world. This is possible because all units (8 operational so far) are identical,

both in software and hardware, and, therefore, can be operated in exactly the same way.

However, one of the main deficiencies in this significant project lies in the lack of a detailed study of the intrinsic capabilities of the units, covering everything from hardware, optics, sensors, resolution, to the climatic and atmospheric influences of the location where they were installed. In summary, there is a lack of characterization of the telescopes, mainly in terms of optical and astrometric characterization, which play a fundamental role in the main objectives of the network.

With the intention of significantly contributing to this scientific collaboration, the task of developing a code that provides sufficiently precise astrometric solutions for the project's objectives has been undertaken. The code presented in this work operates on astronomical data taken with the FALCON-ULS (Vicuña, Chile) and FALCON-CMU (Colorado, USA) units of the FALCON network during the winters of 2022 and 2023. This code combines tools of astronomical reduction, coordinate transformation systems, source detection and analysis, atmospheric refraction models, focal plane data modeling, polynomial minimization functions, distortion maps, and statistical models based on Python. Furthermore, astronomical software such as TOPCAT for catalog management, and SExtractor for the detection and creation of catalogs are used.

As a result of this collaboration, the objective of astrometrically characterizing the optical system, specifically in reference to sensor-related distortions corresponding to the focal plane of two of the FALCON network units, one located in each hemisphere, is achieved. The astrometric characterization, based on the modeling of the focal planes and their respective residuals, provides information about systematic errors corresponding to different factors such as the "zero point", scale, tilt, and OFAD (Optical Field Angular Distortion). Additionally, the code has the potential and precision to mitigate different atmospheric and optical effects related to the positions of celestial objects, and even artificial satellites. A corrective

mask to mitigate the effects studied in this thesis is also presented as a result of the work. The use of this code could be a determining and influential factor in the project's final results.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Una Búsqueda Infinita Desde El Comienzo	1
1.2	Renacimientos y Tecnología	5
1.3	Nuevas Fronteras	7
1.4	Tratamiento Astrométrico.	11
2	Objetivos	22
3	FALCON Telescope Network	27
3.1	Red Global de Telescopios Ópticos	27
3.1.1	Diseño Óptico, Estructura e Instrumentación	29
3.1.2	Sistema Óptico y Detectores	32
3.1.3	Distribución Geográfica de la red FALCON	37
4	Aplicaciones Astrométricas a FALCON-ULS.	44
4.1	Motivación	44
4.2	Puesta en marcha del proyecto	46
4.3	Interfaz gráfica de usuario y controladores	47
4.4	Tipos de datos y obtención de datos de prueba	48
4.5	Reducción de datos y análisis	50
4.6	Adquisición de datos	52
5	Modelamiento de datos	55
5.1	Preámbulo	55

5.2	Source Extractor - <i>SExtractor</i>	55
5.3	Astrometry.net - World Coordinate System	75
5.4	Catálogo Gaia y Crossmatch	76
5.5	Movimientos propios	80
5.6	Refracción atmosférica	84
5.7	Del cielo al plano focal	91
5.8	Distorsiones radiales y constantes de placa	96
5.8.1	Residuos	102
6	Resultados	107
6.1	Análisis FALCON-ULS	107
6.1.1	Modelo de distorsión radial	108
6.1.2	Modelo de ajuste de placa.	116
6.1.3	Resultado del modelado Falcon-ULS	125
6.2	Análisis FALCON-CMU	132
7	Conclusiones.	140

Índice de figuras

1.1	Disco de Nebra y Tablilla Uranología	2
1.2	Monumentos, mapas y huellas: Stonehenge y mapa estelar de la dinastía Tang.	3
1.3	Telescopio Refractor y Reflector.	5
1.4	Aberración Cromática.	7
1.5	Placas Fotográficas.	8
1.6	Defectos comunes en los sensores CCD.	9
1.7	Distorsiones geométricas de lentes o espejos.	11
1.8	Mapa de residuos de Robichon et al. (1995).	15
1.9	Mapa de residuos de la cámara OSIRIS de Keck I.	16
1.10	Mapas de residuos Freeman et al. (2023).	18
1.11	Observaciones astrométricas de Lacruz et al. (2018).	19
1.12	Patrón de distorsión del Survey CIDA.	20
2.1	Telescopio FALCON-ULS.	23
3.1	Localización Geográfica FTN.	28
3.2	Nodos Operativos.	29
3.3	Unidad FLC-FTN	31
3.4	Modelo de Cúpula.	32
3.5	Estructura FALCON-ULS.	33
3.6	Transmisión Filtros Sloan.	35
3.7	Transmisión Filtros Johnson.	36
3.8	Tránsito GJ1214b.	37
3.9	Vía Láctea cruzando Mamalluca.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

3.10	Campos de Visión de la red global FTN.	39
3.11	Localización de nodos.	40
3.12	Datos crudos tomados por FALCON-CRB.	41
4.1	Puesta en marcha y mantenimiento.	47
4.2	Interfáz gráfica The Sky X.	48
4.3	Datos tomados por FTN-ULS	50
4.4	Reducción Astronómica.	51
4.5	Cielo prístino en Mamalluca.	52
4.6	Comparativa de campo escogido para estudio.	53
4.7	Método por ajuste de bloques.	54
5.1	Diagrama de flujo SExtractor.	57
5.2	Mapa de Fondo.	59
5.3	Detecciones.	65
5.4	Comparación de residuos de centroide isofotal y de ventana.	67
5.5	Proceso de convolución.	69
5.6	Comparación de métricas filtro Gauss aplicado a los datos de Falcon-ULS. . .	71
5.7	Comparación de métricas filtro Mexhat.	72
5.8	Comparación de métricas filtro Tophat.	72
5.9	Estadísticas en filtros de convolución.	73
5.10	Comparativa de la distribución de elipticidad de objetos.	75
5.11	Resumen de Gaia DR3	78
5.12	Campo de búsqueda de objetos en TopCat.	79
5.13	Distribución de distancias angulares.	80
5.14	Movimientos propios de objetos encontrados en Gaia DR3	81
5.15	Movimientos propios aplicados a las coordenadas Gaia DR3.	83
5.16	Boxplot comparativo de variabilidad en RA y DEC con respecto a los movi- mientos propios.	84
5.17	Efectos de la refracción atmosférica.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

5.18	Distribución de la Refracción Atmosférica por Estrella.	88
5.19	Estrellas Corregidas por Refracción Atmosférica.	89
5.20	Distribución de la Refracción Diferencial por Estrella.	90
5.21	Gradiente de refracción en el plano focal.	91
5.22	Transformación píxeles a milímetros.	92
5.23	Proyección Gnomónica.	93
5.24	De líneas rectas a círculos máximos.	94
5.25	Comparación de Coordenadas: Proyección Gnómica vs. Placa Observada. . .	96
5.26	Defectos en CCD's.	101
5.27	Residuos Ajustados en X e Y Post Minimizacion Combinada.	103
5.28	Mapa de Residuos Radiales y Modelo de Placa	104
5.29	Dispersion y Histogramas de Residuos Ajustados	105
6.1	Visualización de las contribuciones de distorsión óptica en el sistema Falcon-ULS	110
6.2	Mapa de residuos en el plano focal	115
6.3	Deformación Inducida por la Escala en el Plano Focal	117
6.4	Rotación Sensor	118
6.5	Corrección Rotación	119
6.6	Punto Cero	120
6.7	Mapa Tilt	120
6.8	Distorsión en modelo placa	122
6.9	Distorsión placa campo	123
6.10	Mapa Residual Modelos	126
6.11	Mapa de residuos con descripción de ángulos de vectores.	128
6.12	Mapa residual contornos	129
6.13	Comparación de Histogramas de Residuos Originales y Ajustados en X e Y. .	130
6.14	Máscara de corrección.	132
6.15	Imagen FALCON-CMU.	133
6.16	Histograma de residuos FALCON-CMU.	136

6.17	Visualización detallada de los residuos astrométricos CMU-FALCON.	137
6.18	Mapa de distorsión con interpolaciones lineales en los puntos de residuos ajustados FALCON-CMU.	138

Índice de tablas

1.1	Términos de corrección para las constantes de placa.	13
3.1	Tabla SDSS.	34
3.2	Tabla Filtros Johnson-Cousins.	36
3.3	Especificaciones del nodo FALCON-ULS.	43
5.1	Términos de corrección para las constantes de placa.	100
6.1	Ajuste de parámetros de distorsiones radiales.	108
6.2	Correlaciones entre los parámetros del modelo de distorsión radial.	112
6.3	Ajuste de parámetros y métricas del modelo.	114
6.4	Ajuste de parámetros con cifras significativas.	124
6.5	Correlaciones entre parámetros del modelo de distorsión.	125
6.6	Ajuste de parámetros del modelo para FALCON-CMU.	138
6.7	Ajuste de parámetros de distorsiones radiales.	138

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Introducción

1.1. Una Búsqueda Infinita Desde El Comienzo

La relación entre la humanidad y el cosmos constituye un testimonio fascinante y cautivador de preguntas y respuestas a lo largo de la historia. Desde los albores de nuestra existencia, diversas civilizaciones han dirigido su mirada hacia el firmamento en un intento por comprender su lugar dentro del vasto universo. Esta profunda fascinación por los astros es evidente desde los orígenes de nuestra especie, momento en el cual, con el uso primigenio de nuestras manos y la capacidad de registrar eventos en formas incipientes, surgieron las primeras nociones de una conexión con esos puntos luminosos en el cielo. Esta sensación de pertenencia mutua se refleja en las pinturas rupestres que adornan las antiguas cavernas, donde nuestros ancestros no solo dejaron su huella física, sino también la evidencia de su asombro y reverencia hacia el cosmos. Las manifestaciones primitivas de interés astronómico no solo representan un intento por comprender los movimientos y ciclos celestes, sino que también revelan una búsqueda incesante de respuestas a las grandes preguntas de la existencia humana. Este vínculo profundo entre el ser humano y el cosmos ha sido un motor de inspiración a lo largo del tiempo, impulsando el desarrollo de la astronomía.

Desde los antiguos sumerios, babilonios y egipcios, quienes desarrollaron complejos sistemas para predecir eventos celestes, hasta los griegos, cuyos filósofos como Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.), Ptolomeo (100 d.C. - 170 d.C.) e Hiparco (190 a.C. - 120 a.C.), sentaron las bases de la astronomía occidental (Diolatzis & Pavlogeorgatos (2019)), la humanidad ha buscado incansablemente descifrar el

lenguaje escrito en las estrellas.

En este eterno diálogo, cada civilización, cada cultura, ha aportado su visión y ha aprendido a leer e interpretar sus mensajes, permitiéndonos avanzar en nuestra comprensión y conocimiento del cielo. Esta romántica contemplación ha encontrado no solo contestaciones científicas, sino también una fuente inagotable de inspiración poética y filosófica, un espejo en el que vemos reflejada nuestra propia esencia. La astronomía, por tanto, no es solo una ciencia; es también una narrativa continua, una historia en la que cada estrella, cada galaxia, nos habla de nuestro pasado y nos guía hacia nuestro futuro.



Figura 1.1: *Izquierda:* El disco celeste de Nebra es una de las representaciones más antiguas de fenómenos astronómicos. Ha sido estudiada durante años en artículos que intentan descifrar su contenido, aunque es clara la representación de la Luna y las Pleiades, algunos trabajos como el de Pizzone (2020) proponen que el objeto más brillante podría haberse tratado de una supernova que iluminó los cielos por ese entonces. La antigüedad de este hallazgo arqueológico data de unos 3600 años y fue encontrado en el año 1999 en el monte Mittelberg, Alemania. *Derecha:* Tablilla “Uranología” de la Colección Babilónica de Yale, escrita entre los siglos III y II a. C. en la ciudad de Uruk, en el sur de Irak, proporciona en el lado derecho una descripción de las constelaciones celestes y en el lado izquierdo la topografía de la ciudad de Uruk. (Crédito de la imagen: Klaus Wagensohnner - Yale)

El anhelo por comprender el cosmos, inicialmente manifestado en simples observaciones de un cielo nocturno sembrado de estrellas, se convirtió en un pilar fundamental para la agricultura y la navegación de las antiguas civilizaciones, teniendo una influencia crítica para la supervivencia y el desarrollo de las sociedades. Este deseo evolucionó gradualmente hacia un esfuerzo más sistemático y científico de medir las posiciones de las estrellas, encontrar patrones y ciclos estelares, mapear los cielos y desentrañar los secretos que guardaban los astros. En una suerte de batalla contra la oscuridad del universo, la humanidad se armó con

guerreros y armas para iluminar el camino del conocimiento.

Los primeros registros de esta batalla se pudieron encontrar expresados en monumentos megalíticos emblemáticos como Stonehenge en Inglaterra (ver Fig 1.2), la pirámide de Kukulkán en Chichén Itzá, el Disco de Nebra en Alemania (1600 AdC) (ver Fig 1.1), o La Tablilla Uranología en la ciudad de Uruk (siglo III AdC). Estos registros son testigos elocuentes de un conocimiento astronómico avanzado y desarrollado ya desde épocas primitivas (Ruggles (1999)).



Figura 1.2: Arriba: Stonehenge es un monumento prehistórico en la llanura de Salisbury en Wiltshire, Inglaterra. Consiste en un anillo exterior de piedras verticales sarsen que data entre el 3100 a. C. y el 2000 a. C. Los arqueólogos consideran que las funciones principales fueron como observatorio astronómico y como sitio religioso Ruggles (1999). Abajo: *Detalle del Mapa Estelar de la dinastía Tang que muestra la región del Polo Norte*. El mapa de Dunhuang o mapa estelar de Dunhuang es una de las primeras representaciones gráficas conocidas de estrellas de la antigua astronomía china, que data de la dinastía Tang (618–907). Todo el conjunto de mapas estelares contenía 1.300 estrellas.

Siglos hacia el futuro, la misma especie que sólo podía registrar escasamente lo que veía sobre sus cabezas en piedras, ha llevado el conocimiento humano a nuevas fronteras. Personajes como Eratóstenes, Aristarco, Ptolomeo e Hiparcos, realizaron avances significativos en cartografiados y mapas que incluían medicio-

nes precisas de la posición y movimientos de las estrellas, la precesión de los equinoccios, y sistemas coordenados (Chambers (1891), Gomes & Marques (2023)). Además, con nuevas herramientas físicas y matemáticas, indagaron en áreas como la óptica y la reflectancia de materiales, indispensables para la exploración del cosmos y la evolución de la astronomía occidental.

Los esfuerzos persistentes por alcanzar una mayor precisión en la medición de los astros, como se ilustra en la Figura 1.2, fueron el punto de partida para el surgimiento de una disciplina altamente especializada en el campo de la astronomía: la astrometría. Como rama crucial de la ciencia astronómica, la astrometría se dedica a la medición y análisis de la posición, el movimiento, y el paralaje de los cuerpos celestes. Su principal objetivo radica en determinar con precisión y detalle la ubicación exacta de las estrellas y otros objetos astronómicos en el cielo.

Este campo de estudio abarca una amplia gama de conceptos y técnicas, como describe Høg (2014), incluye el cálculo preciso de coordenadas celestes, la medición de distancias estelares utilizando métodos como la paralaje trigonométrica, la investigación de los movimientos propios de las estrellas a lo largo del tiempo, y la aplicación de correcciones en los sistemas ópticos para garantizar mediciones precisas. La astrometría desempeña un papel crucial en la creación de mapas celestes de alta precisión, proporcionando herramientas fundamentales para la navegación espacial, la exploración de la estructura de la Vía Láctea, y la comprensión de la evolución y dinámica del cosmos.

Es imperativo reconocer que la astrometría no solo es el fundamento sobre el cual se construye nuestra comprensión del universo, sino también una vía mediante la cual la humanidad continúa expandiendo los límites de su conocimiento. Con cada avance en la precisión de nuestras mediciones estelares, no solo refinamos nuestro mapa del cosmos, sino que también profundizamos en la comprensión de las leyes fundamentales que rigen el universo. La astrometría, por tanto, representa una puerta hacia el futuro de la exploración espacial y el entendimiento astronómico, recordándonos que cada punto de luz en el cielo nocturno es un misterio listo para ser descifrado. A medida que avanzamos en nuestra travesía científica, la astrometría es una brújula que guía nuestra incansable búsqueda de respuestas lo más precisas posibles en el vasto océano estelar.

1.2. Renacimientos y Tecnología

La era del Renacimiento marcó una época de profunda observación, análisis, transformación y descubrimientos. Este periodo fue testigo de una batalla encarnizada contra el dogma del geocentrismo, desafiado valientemente por grandes progresistas como Nicolás Copérnico (1473-1543), Tycho Brahe (1546-1601), Johannes Kepler (1571-1630), Galileo Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1643-1727). Estas figuras pioneras no solo reubicaron al Sol en el centro del sistema planetario, desafiando las concepciones de su tiempo y cambiando los paradigmas existentes, sino que también sentaron las bases para una nueva era en la observación astronómica. Mediante sus colaboraciones, lograron avances sin precedentes en diversas áreas, mapeando el cielo con una precisión nunca antes vista y sembrando las semillas de lo que eventualmente se conocerían como leyes universales.

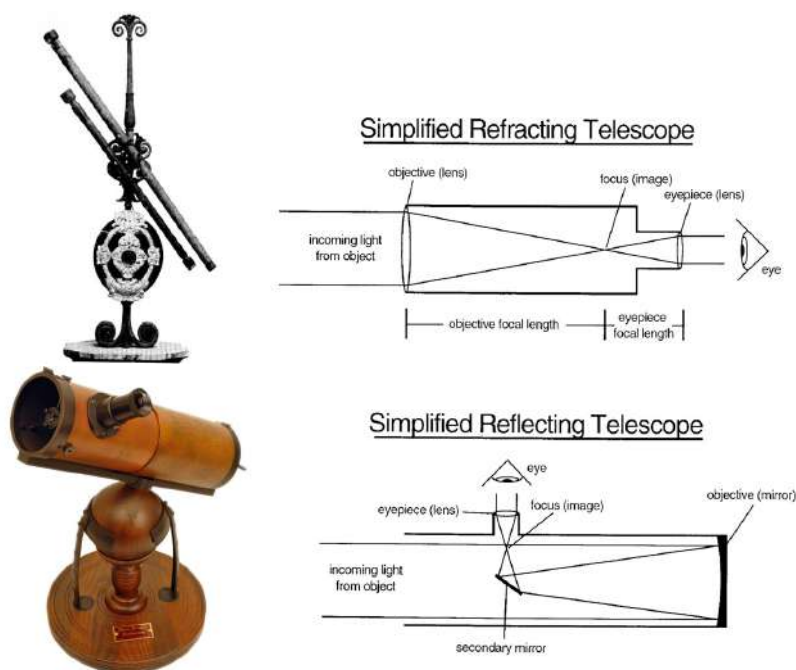


Figura 1.3: Arriba: Si bien Galilei no inventó el telescopio, construyó uno con gran éxito y lo utilizó para observaciones astronómicas. El telescopio que construyó Galileo en 1609 era un telescopio de refracción, con lente convexa delante y una lente ocular cóncava. Esta imagen muestra dos telescopios en su poder. *Créditos Imagen: mpg.de.*

Abajo: Réplica del segundo telescopio reflector que Newton presentó a la Royal Society en 1672 (el primero que hizo en 1668 fue prestado a un fabricante de instrumentos, pero no hay más registros de ello).

Este periodo también señala el comienzo de una era en la que, gracias al ingenio humano, se logró una visión del Universo sin precedentes. Se trató de una época caracterizada por avances tecnológicos significativos que revolucionaron la astronomía de manera irrevocable, siendo el telescopio (ver Figura 1.3) su símbolo más destacado.

Los telescopios refractores (ver Figura 1.3), compuestos por un arreglo básico de dos lentes de sílice dentro de un tubo de plomo, abrieron las puertas a un universo anteriormente inimaginable. Galileo Galilei, armado con uno de los primeros telescopios, emprendió una exploración celestial que desafiaría las nociones preconcebidas de espacio y tiempo. Sus descubrimientos documentados en la famosa obra *Sidereus Nuncius* (Galilei (1610)), incluían desde los cráteres lunares hasta los anillos de Saturno, no solo ofrecieron pruebas irrefutables del modelo heliocéntrico sino que también inauguraron la astronomía como una ciencia de precisión, subrayando el rol indispensable del telescopio en la investigación astronómica (Gingerich & van Helden (2003)).

Sin embargo, el camino hacia la comprensión del cosmos estuvo plagado de obstáculos técnicos, desde aberraciones (ver Figura 1.4) y distorsiones ópticas hasta limitaciones instrumentales. La aberración cromática fue uno de los primeros desafíos significativos, llevando a personajes como Kepler y Newton a idear soluciones innovadoras que superaron estas barreras, culminando con el desarrollo del telescopio reflector por Newton. Este invento no solo eliminó la aberración cromática sino que también permitió la creación de telescopios más compactos y eficientes, marcando un hito en la observación astronómica.

La resolución de estos desafíos técnicos abrió un nuevo capítulo en el estudio del universo. Figuras como James Bradley (1693-1762) y Friedrich Bessel (1784-1846) ampliaron los horizontes de la astrometría, empleando estrategias innovadoras para medir con una exactitud sin precedentes la posición y el movimiento de los cuerpos celestes. Sus esfuerzos, dedicados a comprender fenómenos como la aberración de la luz, los movimientos propios de las estrellas, errores instrumentales y la óptica de los telescopios, consolidaron a la astrometría como una disciplina fundamental en la astronomía moderna, permitiendo no solo describir sino también cuantificar el cosmos con una precisión y detalle nunca antes alcanzados (Chambers (1891)).

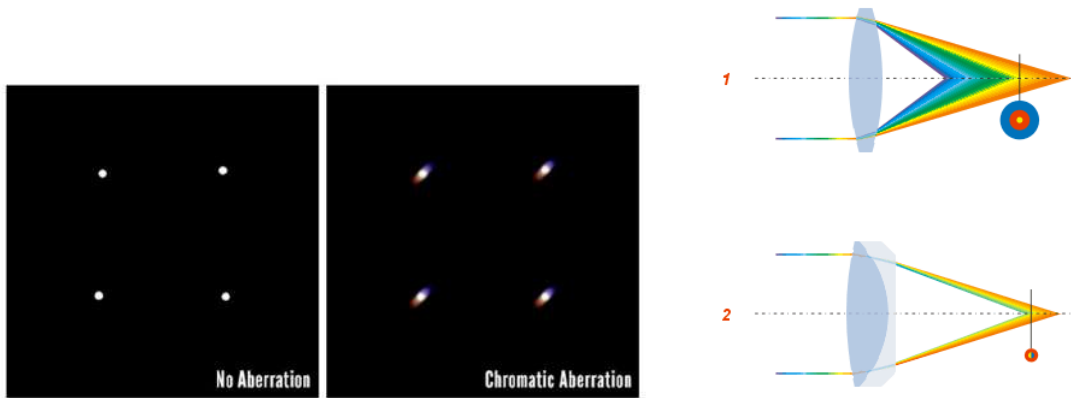


Figura 1.4: La aberración cromática ocurre cuando una lente no enfoca todos los colores de la luz en el mismo punto debido a diferencias en la refracción. Esto se debe a que el índice de refracción varía con la longitud de onda; la luz azul se refracta más que la roja. Para minimizar este efecto, se utilizan dobletes de cristales con dispersiones diferentes.

1.3. Nuevas Fronteras

Durante los siglos XIX al XXI, el desarrollo de la astronomía ha estado intrínsecamente ligado al progreso en los campos de la física y la tecnología. El diseño y construcción de telescopios de mayor tamaño, la llegada de la era espacial, así como la introducción de técnicas de observación y medición más avanzadas, han desempeñado un papel fundamental en el avance de nuestra comprensión del cosmos. Estos avances tecnológicos han permitido realizar observaciones más detalladas y precisas, lo que ha llevado a importantes descubrimientos y avances en el estudio de fenómenos astronómicos. Paralelamente, el desarrollo de la fotografía astronómica revolucionó la precisión de los catálogos estelares, permitiendo ya no solo mirar por un ocular y tomar notas, como se hizo durante muchas décadas, en las cuales la exactitud de los datos dependía del observador y del conductor del telescopio, sino también dejar un registro permanente y menos subjetivo de lo observado. Aunque trabajos monumentales como el relevamiento *Cordoba Durchmusterung* (Thome (1890)) se llevaron a cabo de esta manera, luego de la implementación de la fotografía, fue posible capturar los astros físicamente y registrar con fidelidad la posición de las estrellas (ver Figura 1.5). Esto permitió medir sobre un sustrato físico las características de los objetos, los cuales encontrarían una dependencia en su precisión y exactitud en la instrumentación astronómica, marcando una nueva era y permitiendo estudios más profundos y a largo plazo (Rosenberg et al. (2013)).



Figura 1.5: Placa fotográfica encontrada en el telescopio Irénée du Pont del Observatorio Las Campanas. Según los registros pertenece a una región de LMC (Large Magallanic Cloud) con coordenadas Ra: 05 24 04 Dec: -66 02 45. La placa fue tomada el 2 de Enero de 1985 con una emulsión especial tipo IIa0 y con un tiempo de exposición de 40 minutos. *Fotografía: Daniela Fernández Rosso (LCO), Pablo Vera (LCO).*

La invención del Dispositivo de Carga Acoplada (CCD) en el siglo XX, ha sido trascendental en la evolución de la astronomía moderna, revolucionando la forma en que capturamos, digitalizamos y manejamos las imágenes astronómicas. Esta tecnología ha permitido una medición y estudio mucho más precisos de las propiedades de los astros, y ha ampliado el potencial de los softwares astronómicos avanzados, facilitando exponencialmente el análisis del cielo nocturno.

A pesar de los avances significativos en la tecnología de sensores astronómicos, la implementación de CCD's presenta complejidades técnicas que pueden afectar profundamente la fidelidad de los datos capturados (Monet (1992)), como se ilustra en la Figura 1.6. Problemas como la desalineación del sensor CCD (o tilt) respecto al plano focal pueden inducir una perspectiva no uniforme, comprometiendo la resolución y la nitidez de las imágenes astronómicas. Esta variación focal puede resultar en zonas de la imagen con detalles precisos mientras otras permanecen desenfocadas, un fenómeno que distorsiona la interpretación visual y analítica de los datos.

Errores en la calibración del punto cero, el valor de referencia para la medición de la intensidad lumínica, pueden causar desviaciones significativas en la estimación de las magnitudes de las estrellas y otros cuerpos celestes. Estas magnitudes son fundamentales para la clasificación y el análisis posterior de los objetos, por lo que su precisión es esencial.

Además, inexactitudes en el tamaño del píxel del sensor por ejemplo impactan

directamente en la determinación exacta de posiciones y dimensiones angulares, mientras que errores de orientación pueden llevar a una representación espacial incorrecta en el mapeo celestial. Estos errores son especialmente críticos en la astrometría, donde la precisión en la medición de posiciones y movimientos de los cuerpos celestes es indispensable.

El reconocimiento y la corrección de estos factores son aspectos clave para mantener la calidad de los datos en la astronomía contemporánea, lo que requiere una atención detallada y una comprensión profunda de la instrumentación y la metodología de observación.

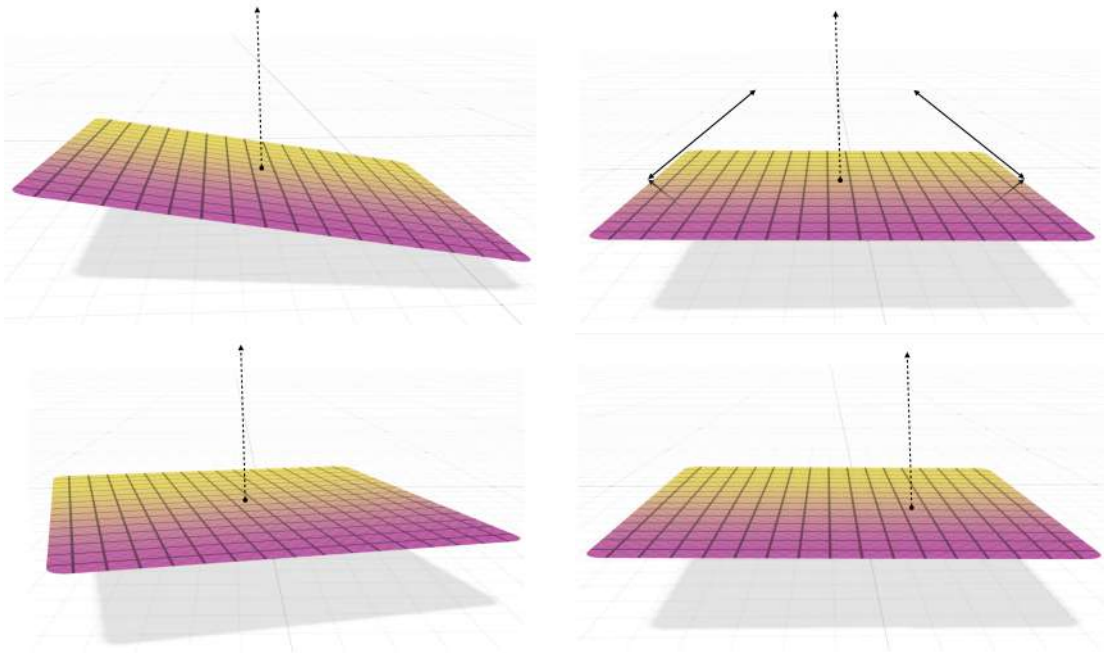


Figura 1.6: Defectos comunes en los CCDs: *Arriba Izquierda*: CCD con inclinación o *tilt* con respecto al eje óptico, *Arriba Derecha*: Representación de un CCD con problema de escala. *Abajo Izquierda*: CCD rotado en el eje horizontal con respecto a la alineación original, *Abajo Derecha*: CCD que presenta una traslación con respecto al centro que coincide con el eje óptico.

Por otro lado, los CCD no están exentos de fallas y limitaciones técnicas. Defectos individuales en los píxeles, por ejemplo, pueden inducir anomalías en la imagen final, afectando la interpretación de los datos. A estos defectos se suman interferencias como el ruido electrónico de lectura y térmico, el ruido de cuantificación inherente a la digitalización de señales análogas y el fenómeno de “blooming”, causado por la saturación de la señal en píxeles adyacentes a fuentes luminosas intensas.

No podemos pasar por alto las imágenes fantasmas y el “flare”, subproductos de reflexiones internas no deseadas dentro del sistema óptico, así como los artefactos producidos por impactos de rayos cósmicos, que pueden confundirse con fuentes astronómicas genuinas. Además, la transferencia de carga entre los píxeles de un CCD durante la lectura de la imagen no es siempre perfecta y puede degradarse con el tiempo, disminuyendo la calidad de las imágenes capturadas.

Aparte de las aberraciones ópticas derivadas de imperfecciones en la trayectoria de la luz, tales como la coma, el astigmatismo, las aberraciones esféricas y las curvaturas de campo, existen distorsiones que emanan de la geometría propia de la lente o del espejo, siempre asumiendo que la fabricación de la óptica es perfecta con respecto a la curva teórica deseada, habrá resultados que son inherentes a cada sistema óptico específico. El factor de amplificación en el sistema óptico es una función directa de la longitud focal. Por ende, variaciones en la longitud focal a través de diferentes zonas de la lente o del espejo resultarán en cambios en la amplificación. En escenarios donde las demás aberraciones son insignificantes, puede apreciarse que todos los elementos de la imagen se enfocan con claridad, aunque presenten una distorsión proporcional a la amplificación variante.

Cuando la amplificación aumenta con la distancia radial desde el centro óptico, la imagen experimenta una distorsión convexa, comúnmente conocida como distorsión de cojín (ver Figura 1.7). Por el contrario, una disminución en la amplificación hacia los bordes de la imagen produce una distorsión cóncava, referida como distorsión de barril. Estas distorsiones geométricas son críticas en la astrometría, ya que pueden influir significativamente en la precisión de la medición de posiciones y formas de los objetos astronómicos. La calibración cuidadosa del sistema óptico y la corrección post-procesamiento son, por tanto, esenciales para “contrarrestar” estos efectos y asegurar la validez de los datos astronómicos recabados.

La caracterización y tratamiento para la caracterización efectiva de estas distorsiones es crucial para asegurar la fidelidad de los datos recogidos. Una calibración rigurosa, que incluye la corrección de píxeles defectuosos y la compensación de ruidos, junto con técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes, son fundamentales para mitigar estos efectos adversos. Estas prácticas permiten maximizar el valor científico de las observaciones realizadas con CCD, asegurando que las propiedades astronómicas registradas sean un reflejo preciso y confiable de los

fenómenos celestes. En última instancia, la habilidad para abordar estos problemas técnicos no solo mejora la calidad de las imágenes astronómicas sino que también fortalece la integridad de la investigación.

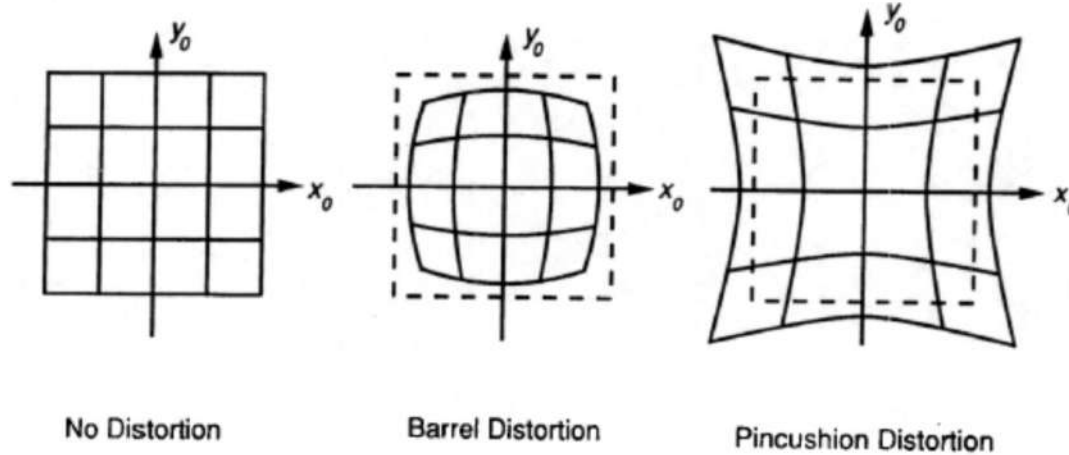


Figura 1.7: Distorsiones que se producen a partir de la geometría de la lente o espejo. La amplificación lineal es una función de la distancia focal, por lo que si la longitud focal es diferente para diferentes áreas de la lente, la amplificación cambiará. En este caso en forma de barril o cojín. (Imagen tomada de *ASTR 5110 Steve Majewski Lecture Notes - Universidad de Virginia.*)

1.4. Tratamiento Astrométrico.

La astrometría, la ciencia de medir posiciones y movimientos de cuerpos celestes, ha avanzado desde los primeros registros en paredes de cavernas hasta alcanzar la capacidad de detectar variaciones de milíarcosegundos ($1mas = 0.001''$) en la posición de estrellas y planetas. Este desarrollo no solo refleja un avance tecnológico sino también un profundo entendimiento de nuestro universo, facilitando la creación de mapas detallados del cosmos para una mejor comprensión de nuestra ubicación y movimiento en el espacio.

Un hito en este progreso es la misión Gaia de la Agencia Espacial Europea (Gaia Collaboration et al. (2023)), lanzada para elaborar el catálogo astrométrico más exacto de posiciones para mil millones de estrellas en nuestra galaxia. Este proyecto emblemático ha revolucionado la astrometría, ofreciendo posiciones de referencia con exactitudes en ordenes de milisegundos de arco y permitiendo un análisis detallado de las propiedades y movimientos de los cuerpos celestes. Gracias a Gaia, los astrónomos pueden discernir pequeñas oscilaciones en la posición de las

estrellas y medir distancias intragalácticas con una precisión sin precedentes (Gai et al. (2020)). La astrometría, enriquecida por estos datos, no solo mejora nuestra comprensión del universo sino que también nos prepara para futuros desafíos en la exploración espacial y la cosmología.

Para lograr el objetivo de obtener posiciones reales y precisas de los objetos en el cielo, es necesario llevar a cabo una serie de ajustes conocidos como reducciones astrométricas. Este proceso no solo transforma las observaciones “crudas” de cuerpos celestes en datos de posición y movimiento precisos, sino que también incorpora modelos matemáticos complejos para ajustar por una gama más amplia de factores la posición real de las estrellas en el plano focal. Estos modelos principalmente polinómicos de distinto orden son fundamentales para compensar distorsiones instrumentales (ligados al sistema óptico), desplazamientos del sensor, efectos atmosféricos y movimientos relativos a las estrellas, abarcando desde desviaciones ópticas hasta variaciones térmicas que pueden afectar la precisión de los datos. Estos factores son descritos en los modelos como constantes de placa y coeficientes de distorsión.

Uno de los planteamientos más comunes para modelar estas constantes son las ecuaciones no lineales (1.1) y (1.2), que describen una variedad de distorsiones ópticas presentes en el sistema. Estas transformaciones permiten corregir los efectos sistemáticos que surgen durante la conversión de coordenadas desde un sistema local (x, y) asociado con la imagen bidimensional capturada por el detector, hacia un sistema de referencia celeste global (ξ, η) alineado con las coordenadas celestes conocidas o de referencia (proyección plana de una zona del cielo curvo). Estas ecuaciones no solo modelan y compensan fenómenos como la orientación y escala del sensor, sino también efectos más complejos como la distorsión óptica y variaciones en la sensibilidad fotométrica (ver Tabla 1.1). Este planteamiento es fundamental para garantizar mediciones astronómicas de alta precisión y confiabilidad.

$$\begin{aligned}
\xi - x = & a_x x + b_x y + c_x + p_x x(x + y) + x(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2) \\
& + m_x \text{mag} + e_x \text{mag} \cdot x + f_x c_i + g_x x \cdot c_i \\
& + n_x \text{mask}(x, y),
\end{aligned} \tag{1.1}$$

$$\begin{aligned}
\eta - y = & b_y x + a_y y + c_y + q_y y(x + y) + y(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2) \\
& + m_y \text{mag} + e_y \text{mag} \cdot y + f_y c_i + g_y y \cdot c_i \\
& + n_y \text{mask}(x, y).
\end{aligned} \tag{1.2}$$

Parámetro	Término de Corrección	
	Eje X	Eje Y
Punto cero	c_x	c_y
Escala	$a_x x$	$a_y x$
Orientación	$b_x y$	$b_y x$
Inclinación de placa	$p_x \cdot x(x + y)$	$q_y \cdot y(x + y)$
OFAD	$x(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2)$	$y(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2)$
Ecuación de magnitud	$m_x \cdot \text{mag}$	$m_y \cdot \text{mag}$
Coma	$e_x \cdot \text{mag} \cdot x$	$e_y \cdot \text{mag} \cdot y$
Índice de color (ci)	$f_x \cdot ci$	$f_y \cdot ci$
Magnificación de color	$g_x \cdot x \cdot ci$	$g_y \cdot y \cdot ci$
Máscara	$\text{mask}_x(x, y)$	$\text{mask}_y(x, y)$

Tabla 1.1: Términos de corrección para las constantes de placa.

- $a_x, b_x, c_x, a_y, b_y, c_y$: Coeficientes de la transformación lineal, que incluyen escalas y rotaciones para alinear el sistema de coordenadas de la imagen con el sistema de referencia del catálogo.
- p_x, q_y : Correcciones para la inclinación del detector o placa fotográfica.
- d_1, d_2, d_3 : Coeficientes de las distorsiones de orden superior, conocidas como distorsiones ópticas de campo angular diferencial (OFAD).
- m_x, m_y : Términos de corrección por magnitud, si la detección es dependiente de la magnitud de las estrellas.
- e_x, e_y : Coeficientes que modelan la coma, una aberración óptica que resulta en imágenes asimétricas de estrellas.
- f_x, f_y : Correcciones para el índice de color, ajustando efectos de refracción cromática atmosférica.
- g_x, g_y : Términos de magnificación de color, para corregir la dispersión cromática diferencial en el detector.
- $\text{mask}_x(x, y), \text{mask}_y(x, y)$: Funciones de enmascaramiento aplicadas a regiones específicas del campo de visión.

Es importante mencionar que estas correcciones resultan insuficientes sin un punto de referencia preciso y fiable que nos proporcione la posición “real” de las estrellas. Este estándar de medición lo ofrecen los catálogos astronómicos, especialmente aquellos generados por telescopios espaciales como Hipparcos (Schuyler (1992)) o Gaia (Gaia Collaboration et al. (2023)). Operando en órbita, estos telescopios logran mitigar significativamente los efectos atmosféricos que pueden afectar las observaciones astronómicas, proporcionando datos de alta precisión que son esenciales para la validación y ajuste de nuestras mediciones terrestres. Por ejemplo, el trabajo realizado por Robichon et al. (1995) destaca por su labor en la reducción de mediciones de placas Schmidt (ver Fig 1.8). Utilizando datos preliminares de los satélites Hipparcos y Tycho, su objetivo principal fue establecer referencias astrométricas precisas. Como resultado de su trabajo, se logra alcanzar una mejora y precisión notable, con errores de aproximadamente 0.07 segundos de arco. Este estudio ejemplifica cómo una adecuada reducción astrométrica permite obtener resultados favorables dadas las limitaciones de un sistema óptico

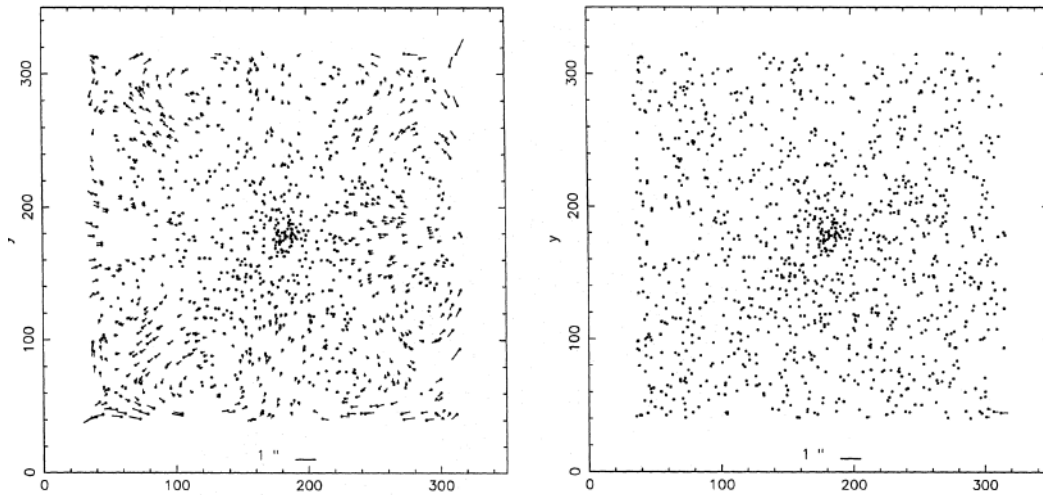


Figura 1.8: *Izquierda:* Vectores de diferencia entre los residuos obtenidos usando polinomios de órdenes 4 y 3 en el campo (NGC 2516), utilizando estrellas del catálogo Tycho como referencia. *Derecha:* Gráfico similar, pero para los órdenes 4 y 5. Las coordenadas x e y están expresadas en milímetros. El tamaño del vector residual de 1 segundo de arco se muestra para referencia. Imagen de un modelo astrométrico del trabajo de Robichon et al. (1995)

Una vez que se ha logrado modelar la óptica y las condiciones de observación para las estrellas de referencia, representadas en la placa sintética, la esencia de la reducción radica en contrastar las posiciones entre la placa modelada y la observada. Mediante la comparación punto a punto a través de distancias euclidianas de las coordenadas en un plano, será posible cuantificar con precisión los residuos de esta reducción. Estos residuos no son mas que las discrepancias entre las posiciones observadas y las posiciones predichas o corregidas. Representan el error residual después de que se ha hecho un ajuste. Los residuos indican cuánto difieren las posiciones medidas de las posiciones que el modelo o ajuste predice, proporcionando así un panorama detallado de cualquier desviación sistemática atribuible a la óptica del telescopio o a los procedimientos de observación, lo que a su vez facilita la calibración instrumental y el refinamiento de los métodos de observación. Es importante destacar que en ocasiones se encuentran errores sistemáticos sin modelar como es el caso de Robichon et al. (1995), donde aumenta el orden del polinomio para modelar algunos efectos residuales no contemplados (ver Fig 1.8).

La aplicación de métodos de reducción es de suma importancia para la determinación precisa de posiciones y trayectorias celestes, la compilación de catálogos estelares confiables y la predicción exacta de eventos astronómicos. Este proce-

so, reforzado por tecnologías avanzadas de detección, facilita una interpretación más integral y matizada de los datos astronómicos. La implementación de estas técnicas de reducción astrométrica afianza la posición de la astrometría como una disciplina fundamental tanto en la astronomía como en la instrumentación científica, subrayando su importancia en la mejora continua de la precisión en la observación del cosmos. Asimismo, es imperativo reconocer que, aunque las metodologías implementadas son altamente sofisticadas, la precisión lograda se encuentra condicionada por múltiples factores y sujeta a las limitaciones propias de los instrumentos empleados, como se evidencia en los desafíos asociados a los dispositivos CCD documentados en Mendez et al. (2017). Estas consideraciones subrayan la importancia de la evaluación continua y la calibración de nuestras herramientas de observación.

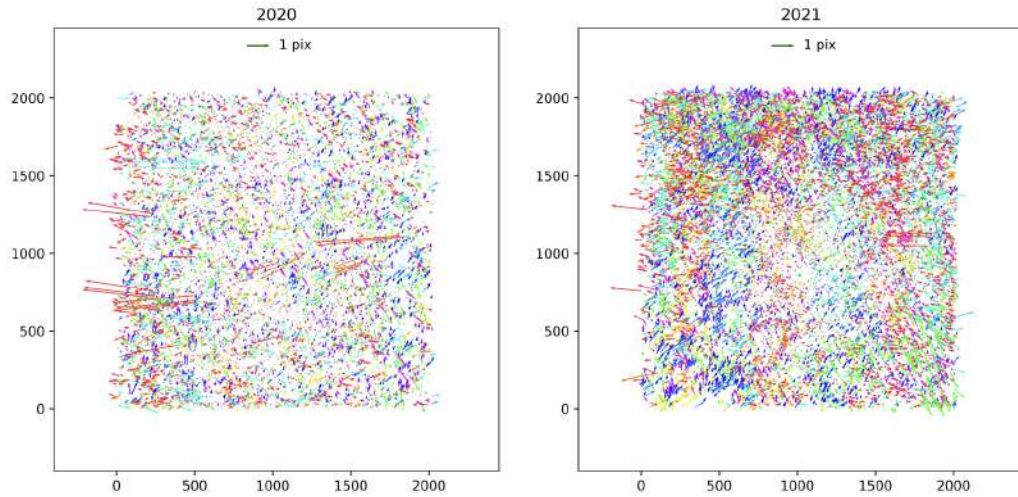


Figura 1.9: Residuos de las observaciones corregidas por distorsión en la cámara OSIRIS del Keck I. Las observaciones corresponden a las regiones de M15 y M92. Los colores corresponden al ángulo del vector Freeman et al. (2023).

Es imprescindible que todos los telescopios e instrumentos destinados a la observación astronómica implementen ajustes detallados de este tipo tanto en las fases iniciales como en las operaciones rutinarias. Los proyectos de gran envergadura que están por iniciarse, también consideran a la astrometría como un elemento crucial para el éxito de sus misiones. Un ejemplo destacado es el telescopio Vera Rubin, que con su espejo de 8,2 metros y un campo de visión de 9,6 grados cuadrados, realizará barridos continuos del cielo, mapeando objetos de manera constante. Según se explica en Casetti-Dinescu et al. (2018), este telesco-

pio enfrenta varios retos relacionados con la información astrométrica, incluidos el manejo de grandes volúmenes de datos y la necesidad de algoritmos precisos para determinar la posición de los objetos celestes. Además, el proyecto contempla movimientos del telescopio a altas velocidades, lo cual puede influir mecánica e instrumentalmente en la medición de los datos (Tyson & Angel (2001)).

Como se ha subrayado anteriormente, pequeñas variaciones en los sistemas pueden resultar en notables errores al observar el cielo y al calcular las posiciones de los objetos celestes. Esto se puede ver en la Figura 1.9, tomada del trabajo de Freeman et al. (2023) donde se ven pequeñas variaciones angulares en los vectores residuales, que aunque casi imperceptibles, pueden derivar en pequeñas pero sistemáticas fuentes de error. Varias investigaciones han esbozado metodologías para aplicar estas correcciones en distintos instrumentos alrededor del mundo. Investigadores de renombre han desarrollado múltiples “metodologías” para abordar estas necesidades y, en la actualidad, existen algoritmos automatizados y soluciones comerciales capaces de realizar reducciones con alta precisión (Shupe et al. (2012)). No obstante, dichos sistemas frecuentemente operan de manera que es difícil de reproducir, lo cual representa un desafío para su entendimiento y calibración detallada por parte de los usuarios.

Ante esta situación, se han valorado altamente los algoritmos fundamentados en estudios rigurosos y comprobados durante años. Investigaciones como las de Eichhorn (1985), Stock (1981), Cudworth & Rees (1991), y Abad (1993), que abordan las correcciones desde la perspectiva de la geometría esférica y emplean modelos polinómicos de diversos órdenes para definir los coeficientes que describen las distorsiones geométricas y ópticas asociadas tanto al sensor como al instrumento. La aplicación de métodos derivados de estos estudios fundamentales continúa en la actualidad, evidenciada por trabajos recientes como el de Anderson et al. (2006) o Freeman et al. (2023), que examina las correcciones ópticas al sensor de la cámara OSIRIS en el telescopio Keck I, demostrando la permanente relevancia y eficacia de estas técnicas (ver Fig 1.10).

La mayoría de los trabajos mencionados anteriormente se enfocan en correcciones diseñadas específicamente para observaciones de objetos astronómicos. Sin embargo, el uso de telescopios no se limita solo a la observación de estrellas y galaxias; existen proyectos a nivel global cuyo objetivo principal es la observación y monitoreo de fenómenos transitorios, asteroides o satélites artificiales. Entre

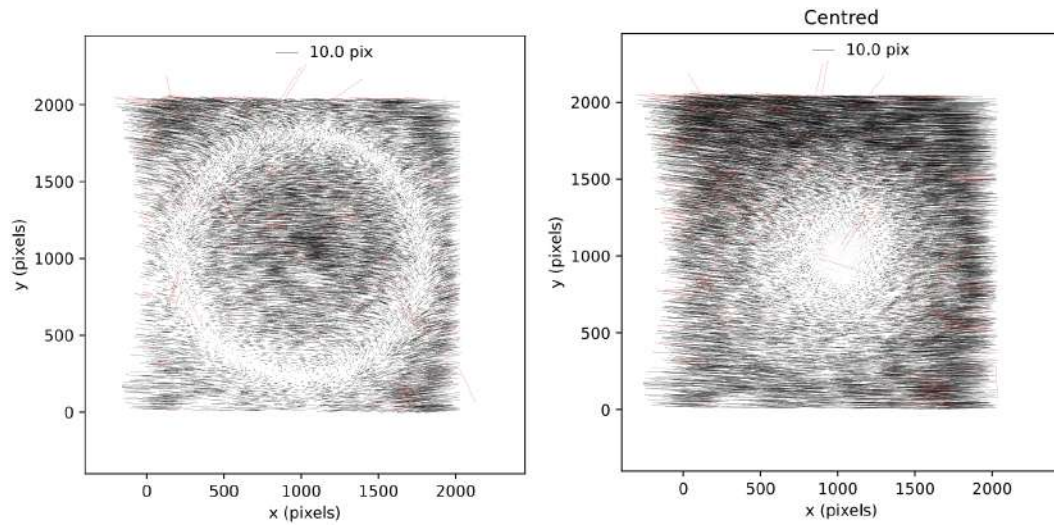


Figura 1.10: Comparación de mediciones de distorsión para observaciones de M15 obtenidas en 2021 utilizando el detector OSIRIS. Cada vector representa la medición de una estrella individual, con la base del vector indicando la posición de la fuente en el detector y la punta mostrando la diferencia posicional con respecto a las posiciones de referencia del Hubble. Los valores atípicos, marcados en rojo, han sido excluidos del ajuste de distorsión. En la imagen izquierda se muestran las mediciones de distorsión obtenidas directamente del procedimiento de ajuste, mientras que en la imagen derecha se han aplicado correcciones de traslación para centrar la distorsión media en cero, evidenciando el patrón intrínseco de distorsión de OSIRIS. Estas visualizaciones son clave para entender y corregir las distorsiones del sistema óptico y mejorar la precisión astrométrica en la observación astronómica. Freeman et al. (2023).

los diversos conjuntos globales de telescopios ópticos destacan la Red Global de Telescopios del Observatorio Las Cumbres (Brown et al. (2013)) y el proyecto FALCON Telescope Network (Chun et al. (2014), Chun et al. (2018)), entre otros que abordan materias de conciencia espacial.

En estos telescopios de pequeña apertura, la caracterización astrométrica es igualmente importante para alcanzar sus objetivos. En años recientes, trabajos como Lacruz & Abad (2015) han abordado directamente el estudio y seguimiento de satélites mediante la astrometría (ver Figura 1.11). Por otro lado, Lacruz et al. (2018), determinan errores del orden de 0.09 píxeles en una escala de placa de $0.5''/\text{píxeles}$ para un telescopio reflector de 1 m que forma parte del sondeo CIDA de satélites y escombros geoestacionarios, correcciones que adquieren gran importancia para conocer las posiciones exactas de objetos pequeños como satélites, o asteroides (ver Figura 1.12).

La comprensión detallada respecto a cómo la luz de los objetos astronómicos

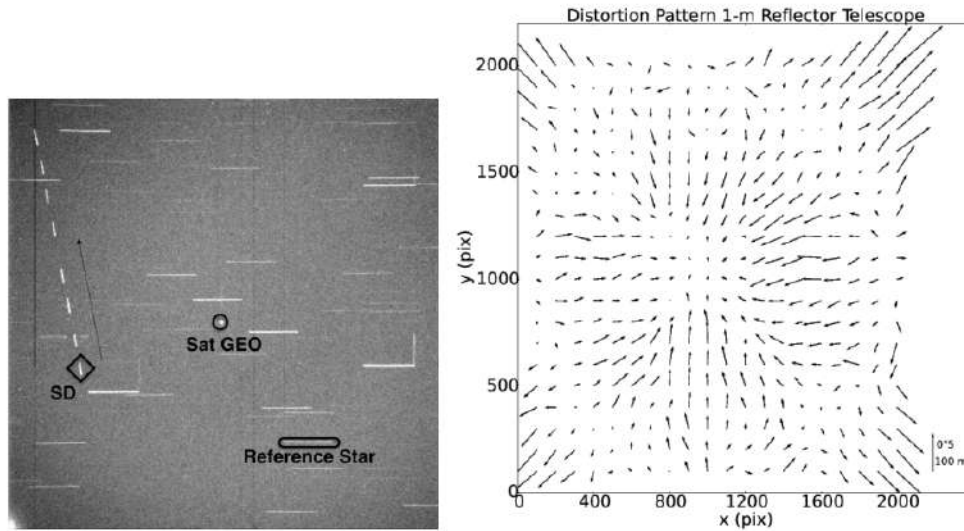


Figura 1.11: *Izquierda*: Observaciones astrométricas sobre las ventanas geocéntricas de operación 76° W. Los trazos representan fuentes de estrellas (rectángulo), las fuentes puntuales (círculos) representan satélites GEO (geoestacionarios) y candidatos SD (Space Debris). La raya inclinada (diamante) representa la posición de un satélite LEO; la dirección de su movimiento orbital relativo está indicado por la flecha negra. *Derecha*: Patrón de distorsión astrométrica para el telescopio reflector de 1 m en modo F/5 obtenido por el proceso de reducción utilizando un método de ajuste por bloques. Lacruz et al. (2018)

viaja por el sistema óptico, alcanza el plano focal y cómo este último a través del sensor capta la señal electromagnética de los objetos, son factores claves que podrían introducir errores sistemáticos o distorsiones durante la observación. Es por ello que el estudio de estos elementos es esencial para el éxito y la fiabilidad de cualquier proyecto. La astrometría no solo facilita la catalogación de estrellas y la elaboración de mapas estelares detallados, sino que también es clave para la navegación espacial y la determinación de órbitas de cuerpos celestes, tanto naturales como artificiales. Su relevancia se extiende más allá de la academia, influenciando campos como la instrumentación, la geodinámica, la mecánica orbital y la física fundamental. Es una ciencia que, al proporcionar una medida precisa de las posiciones y movimientos de los astros, permite profundizar en el conocimiento de las leyes que rigen el universo y en la dinámica de los objetos que lo pueblan.

En esta tesis se expondrá un detallado proceso de reducción astrométrica que contempla los diversos aspectos de la introducción previamente descrita. Se integrarán métodos de distintos investigadores, junto con ciertas funcionalidades de los softwares astronómicos contemporáneos, con el fin de desarrollar una caracte-

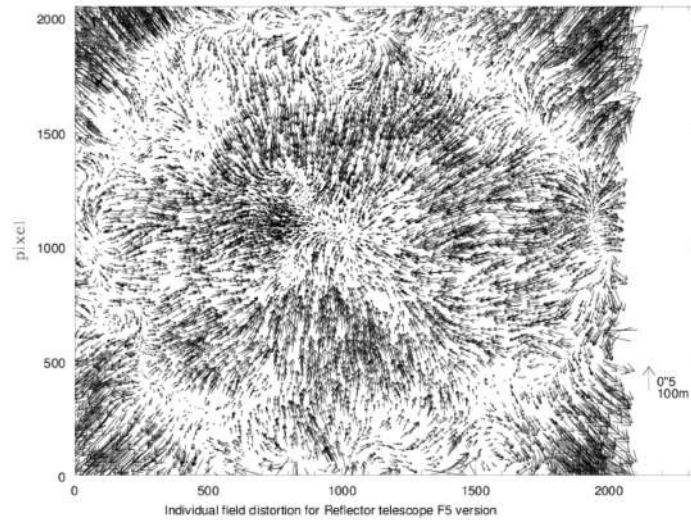


Figura 1.12: Patrón de distorsión del sistema de telescopio y cámara utilizado durante el sondeo CIDA del anillo GEO. La magnitud y dirección de cada flecha están determinadas por la composición de los residuos en x e y , en píxeles, respectivamente. La escala es de $0.5''/\text{píxel}$, que corresponde a 100 m en el anillo GEO Lacruz et al. (2018)

rización que enfrente los distintos tipos de distorsiones ópticas. Este tratamiento conllevará un avance en los sistemas ópticos y, consecuentemente, en la precisión de localización de objetos dentro de la red de telescopios FALCON. La metodología propuesta no solo refleja la sinergia entre las técnicas tradicionales y las herramientas modernas, sino que también es un paso adelante en la mejora continua de la infraestructura astrométrica para la observación astronómica en centros de investigación con telescopios de pequeña apertura.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se detallan los objetivos establecidos para llevar a cabo este trabajo a través de un organigrama. En el Capítulo 3 se describe la red de telescopios FALCON, los objetivos y la misión de este proyecto global, las características de los telescopios, incluyendo localización, modos de operaciones y sistemas ópticos. En el Capítulo 4 se presentan las motivaciones de esta tesis, la puesta en marcha del telescopio, los tipos de datos que se pueden obtener de la unidad, la obtención de datos para el trabajo de tesis, y un proceso de reducción de imágenes astronómicas basado en Astropy. Llegando al Capítulo 5 se detalla el modelamiento de datos, incluido los softwares que fueron usados en diferentes etapas del estudio, como SExtractor y TopCat, además se describe el catálogo Gaia, los ajustes por movimientos propios, el modelo de refracción atmosférica basado en ERFA (Essential Routines

for Fundamental Astronomy), y se describen las constantes de placa calculadas con el modelo central de esta tesis, junto con esto se presentan y describen los residuos calculados en el sistema. En el Capitulo 6 se dan a conocer los resultados de la tesis, primeramente para la unidad FALCON-ULS (Vicuña-Chile), y luego para la unidad FALCON-CMU (Colorado-EEUU). Finalmente en el Capitulo 7 se presentan las conclusiones, discusión y algunas ideas para el futuro.

Capítulo 2

Objetivos

Propósito de tesis.

El propósito de este estudio fue realizar una caracterización astrométrica de la red de telescopios FALCON, proporcionando así una herramienta analítica fundamental para el cálculo preciso de la posición de los objetos celestes. Esta tarea implica la implementación de modelos que contemplan una serie de factores determinantes, como movimientos propios de las estrellas, efectos de la refracción atmosférica y el modelamiento de las complejidades mecánicas y ópticas del sensor, incluyendo rotaciones, inclinaciones, desviaciones y distorsiones respecto al eje óptico. Además se examinan las variaciones en la escala de placa destacando su impacto en la precisión de las observaciones astronómicas.

En el desarrollo de este estudio, se realizaron observaciones *in-situ* utilizando el telescopio FALCON-ULS (ver Figura 2.1), una de las unidades de la red FALCON, ubicado en Vicuña, Chile. Los datos recolectados se sometieron a un proceso de reducción, análisis, y modelado astrométrico, fundamentado en algoritmos desarrollados en Python y apoyados por la funcionalidad avanzada del software SExtractor (Bertin & Arnouts (1996)), el cual fue esencial para la extracción y análisis detallado de las fuentes celestes. Como referencia para la precisión absoluta, se utilizaron las posiciones de los objetos del catálogo Gaia DR3 (Gaia Collaboration et al. (2023)), permitiendo así una comparación directa con las observaciones del FALCON-ULS.

Posteriormente, los objetos observados fueron procesados para convertir sus posiciones cartesianas, relativas al sensor, a coordenadas celestes. Para aquellos objetos que aparezcan en un catálogo de referencia, sus coordenadas celestes serán



Figura 2.1: Unidad FALCON-ULS, localizado en Mamalluca, Vicuña - Chile. Fotografía por Pablo Vera.

proyectadas en un plano tangencial al eje óptico, generando así una placa sintética para la comparación en el plano focal y el modelado astrométrico subsiguiente a través de polinomios de diversos órdenes. La resolución de estos polinomios proporcionará información crítica sobre las constantes de placa, revelando los errores sistemáticos inherentes al sistema óptico. Con esta información, será posible también describir el tipo de distorsión geométrica ligada al sistema óptico a través de coeficientes de distorsión radial. Todo esto nos servirá para cuantificar las diferencias y residuos entre la placa observada y la placa de referencia, modelando las distorsiones identificadas y aplicando análisis estadísticos para determinar la presencia de errores sistemáticos sin resolver. Esta orientación asegurará una comprensión profunda y un control preciso de las distorsiones astrométricas, fortaleciendo la fiabilidad de las observaciones realizadas por la red de telescopios FALCON.

Organigrama de trabajo.

En este estudio se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

1. Revisión post-pandemia del telescopio FALCON ULS:

- Evaluación de la calidad de datos generados post-pandemia, incluyendo limitaciones y análisis de sistemas mecánicos, meteorológicos y de conectividad remota.

2. Análisis de sistemas mecánicos del telescopio:

- Estudio detallado de los sistemas mecánicos, incluyendo análisis de apuntado (“pointing”), vibraciones de seguimiento y otros factores mecánicos relevantes.

3. Adquisición de campos estelares densos en bajas latitudes galácticas:

- Adquisición de campos estelares en bajas latitudes galácticas, con énfasis en la selección de filtros para la identificación precisa de objetos astronómicos y satélites.

4. Desarrollo del código de reducción astronómica:

- Creación de un código personalizado para la depuración y calibración de datos astronómicos, adaptado a las especificaciones del proyecto.

5. Estudio morfológico con software especializado:

- Utilización de herramientas avanzadas como Imexam (Tody (1986)) y SExtractor (Bertin & Arnouts (1996)) para el análisis morfológico de objetos puntuales.

6. Contribución a Colaboraciones Científicas:

- Adquisición de datos y realización de “microdesplazamiento del telescopio para exposiciones sucesivas” para apoyar colaboraciones científicas.

7. Extracción de Fuentes con SExtractor:

- Aplicación de SExtractor para una extracción precisa de fuentes astronómicas, incluyendo un análisis de la morfología y variabilidad de detecciones según el filtro de convolución y la métrica utilizada.

8. Transformación y Comparación de Coordenadas:

- Conversión de coordenadas cartesianas a celestes y comparación con el catálogo Gaia DR3 para validar la precisión astrométrica.

9. Actualización y Corrección de Coordenadas:

- Actualización de coordenadas astronómicas considerando movimientos propios de objetos, para mantener la precisión temporal de los datos.

10. Manejo de la Refracción Atmosférica:

- Implementación de una rutina personalizada basada en ERFA (Essential Routines for Fundamental Astronomy) para corregir la refracción atmosférica en las mediciones.

11. Generación de Placas Sintéticas:

- Creación de placas sintéticas mediante proyección gnomónica para estudios comparativos y de distorsión.

12. Conversión de Coordenadas a Plano Focal:

- Transformación de coordenadas de placas sintéticas y observadas a coordenadas de plano focal para análisis de distorsión.

13. Modelización de Distorsión Óptica:

- Uso de LMFIT (Non-Linear Least-Squares Minimization and Curve-Fitting for Python) para resolver polinomios de distintos órdenes, caracterizando el plano focal y sus distorsiones.

14. Análisis de Distorsión Óptica y Minimización de Errores:

- Evaluación de distorsión óptica, aplicando modelos polinomiales y técnicas de ajuste para reducir errores sistemáticos.

15. Evaluación de Residuos y Generación de Mapas de Distorsión:

- Cálculo de residuos y creación de mapas de distorsión, para una representación de las distorsiones del plano focal.

16. Creación de Máscara Correctora:

- Se genera a partir de los mapas de distorsión una máscara correctora para mitigar los efectos estudiados.

17. Aplicación del Modelo a la Unidad FALCON-CMU:

- Repetición de análisis y modelización para la unidad FALCON-CMU, asegurando la coherencia y validez de los métodos empleados.

Capítulo 3

FALCON Telescope Network

3.1. Red Global de Telescopios Ópticos

La USAFA (United State Air Force Academy), a través de su Departamento de Física, emprendió en 2012 la planificación de una red global de telescopios robóticos de pequeña apertura, enfocada en el estudio de satélites artificiales y la exploración astronómica del universo cercano. Esta iniciativa fue denominada FALCON Telescope Network (FTN) y estuvo bajo la dirección del Centro para la Investigación de la Conciencia de la Situación Espacial (CSSAR), con financiamiento principalmente proveniente de la USAFA y el Programa de Instrumentación de Investigación de la Universidad de Defensa (DURIP), perteneciente a la Oficina de Investigación Científica de la Fuerza Aérea (AFOSR).

El concepto fundamental del proyecto FTN como se describe en Chun et al. (2014), se concibió como una red de telescopios capaz de llevar a cabo observaciones simultáneas de un objeto desde distintas ubicaciones alrededor del mundo. Esto incluyó la capacidad de control remoto desde cualquier ubicación o la programación para un funcionamiento autónomo en todas las etapas de adquisición de datos mediante una plataforma web privada. Así, se consideró esencial contar con al menos un telescopio en cada continente para asegurar la homogeneidad en la recopilación de datos. Con el objetivo de simplificar el escenario logístico asociado al desarrollo de una red global de telescopios, se tomó la determinación de que todos los telescopios fueran réplicas exactas en términos de hardware y software. En consecuencia, se estableció como prioridad la utilización exclusiva de equipos disponibles comercialmente para la construcción de la red de telescopios .

La F'TN, es una red compuesta por 11 telescopios o nodos distribuidos en Norteamérica, Sudamérica, Europa, Australia y África. De estos nodos (telescopios), ocho se encuentran actualmente operativos, otros tres están en fase de construcción y el último se halla en el proceso inicial de desarrollo, (ver Figura 3.1).

Education Institute	City	State	Country	Longitude (east)	Latitude	Elevation (meters)
Colorado Mesa University	Grand Junction	CO	USA	251.45	39.08	1380
Fort Lewis College	Durango	CO	USA	251.93	37.23	1969
Northeastern Junior College	Sterling	CO	USA	256.80	40.65	1177
Otero Junior College	La Junta	CO	USA	256.46	37.97	1221
Penn State University	State College	PA	USA	289.17	40.86	347
Mamalluca Observatory	Vicuna		Chile	289.32	-29.99	1139
University of New South Wales and EOS	Canberra	ACT	Australia	149.17	-35.29	606
Gravity Discovery Centre and Catholic Education Office of Western Australia	Perth	WA	Australia	115.86	-31.95	0
Kauai Community College (TBD)	Lihue	HI	USA	TBD	TBD	TBD
University of Cape Town (TBD)	Cape Town		South Africa	TBD	TBD	TBD
Technical University of Braunschweig (TBD)	TBD		Germany	TBD	TBD	TBD

Figura 3.1: Tabla extraída de Chun et al. (2014). Localización geográfica de los nodos en funcionamiento y sus respectivas instituciones, además se muestran los nuevos nodos en proceso de construcción.

Esta colaboración establece vínculos con una variedad de socios educativos que actúan como anfitriones para cada nodo FALCON. Estos socios, que abarcan desde instituciones educativas primarias hasta universidades y centros de investigación científica, asumen responsabilidades específicas en el proceso de instalación y mantenimiento de cada nodo. Desde una perspectiva operativa, la USAFA aporta el equipamiento necesario para la instalación de cada nodo (ver Figura 3.2), incluyendo telescopios, monturas, cámaras, ruedas de filtros, domos, estaciones meteorológicas, computadoras y dispositivos de almacenamiento. Por otro lado, los socios educativos desempeñan un papel crucial al proporcionar los edificios destinados a albergar los telescopios y la infraestructura esencial para respaldar el correcto funcionamiento del observatorio.

La presencia de los ocho observatorios F'TN en diversas instituciones y regiones geográficas representa una valiosa contribución al panorama científico contemporáneo, respaldando la investigación astronómica y fomentando la cooperación internacional y el intercambio de conocimientos entre científicos de diferentes partes del mundo.



Figura 3.2: Figura extraída de Chun et al. (2018). En la actualidad, operan ocho observatorios FTN. En la fila superior, de izquierda a derecha, se encuentran los telescopios FALCON situados en: Otero Junior College (La Junta, Colorado, EE.UU.); Northeastern Junior College (Sterling, Colorado, EE.UU.); La Universidad Estatal de Pensilvania (University Park, Pensilvania, EE.UU.); y Fort Lewis College (Durango, Colorado, EE.UU.). En la fila inferior, también de izquierda a derecha, se hallan los telescopios FALCON en Yoder, Colorado, EE.UU.; el Observatorio Mamalluca (Vicuña, Chile); la Universidad de Nueva Gales del Sur (Canberra, Australia); y el Gravity Discovery Center (Gingin, Australia Occidental).

3.1.1. Diseño Óptico, Estructura e Instrumentación

Si bien actualmente existen diversos conjuntos globales de telescopios ópticos, como la Red Global de Telescopios del Observatorio Las Cumbres (Brown et al. (2013)) o The Global Relay of Observatories Watching Transients Happen (GROWTH; (Kasliwal (2017))), la mayoría de ellos están compuestos por sistemas con diferentes ópticas o importantes diferencias instrumentales (Chun et al. (2018)). Esta disparidad, por ende, puede dar lugar a que los estudios temporales de largo alcance exhiban algunas inhomogeneidades que, a su vez, podrían menoscabar la integridad de sus resultados.

En virtud de ser uno de los preceptos fundamentales del proyecto FALCON la observación simultánea de un mismo objeto desde ubicaciones geográficas distantes, se ha tomado la determinación de que la infraestructura de la red esté constituida por lo que se denomina “instrumentación clonada”. En este sentido, cada nodo perteneciente a la red FALCON debe replicar de manera exacta y precisa a los demás nodos que integran la red, con la capacidad de ser gestionado de

manera remota desde cualquier punto del planeta o ser capaz de realizar tareas y ejercer control de forma autónoma como se describe en Chun et al. (2014).

Esta capacidad inherente de gestión y autonomía contribuye a optimizar la eficiencia operativa de la red FALCON, posibilitando la observación coordinada de eventos astronómicos desde perspectivas geográficas diversas. Este enfoque, fundamentado en la estandarización y replicabilidad de la instrumentación, minimiza sesgos o errores instrumentales a la hora de obtener y analizar datos, propiciando así una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos en estudios astronómicos de largo plazo.

Como se describe en Chun et al. (2018), después de un análisis de factores críticos, como la disponibilidad de instrumentación, la exportabilidad, la facilidad de adquisición, la ubicación geográfica, la coordinación de instalación y logística, la capacidad de robotización, la automatización y el control remoto, así como la viabilidad financiera, se optó por seleccionar a Officina Stellare (<https://www.officinastellare.com>) como el principal proveedor de la instrumentación necesaria para los telescopios de este proyecto. Entre las opciones evaluadas, se escogió el modelo de telescopio reflector Pro RC 500 Ritchey-Chrétien (ver Figura 3.3).

Este dispositivo en particular exhibe características técnicas notables, destacando un espejo primario de 0,5 metros (20 pulgadas), una relación focal de $f/8,0$ y una distancia focal nominal de 4000 mm. La construcción del espejo primario es de especial relevancia, ya que está elaborado con vidrio Astro-Sitall de expansión cero, proporcionando así una base sólida y precisa para la captura de imágenes astronómicas. Estructuralmente, el tubo principal del telescopio está confeccionado con una aleación de carbono y aluminio, asegurando durabilidad y ligereza, factores cruciales a la hora de seguimientos de alta precisión a eventos astronómicos.

El telescopio en cuestión, con un peso aproximado de 90 kg, se encuentra instalado sobre una montura ecuatorial Paramount ME2, fabricada por la empresa alemana Software Bisque (<https://www.bisque.com/>). Este tipo de montura distribuye estratégicamente el peso del telescopio y los contrapesos en posiciones opuestas al foco principal de la montura, también conocido como el eje polar o eje de ascensión recta. Este diseño específico contribuye a la estabilidad del sistema, garantizando un seguimiento preciso y constante de los objetos en el cielo.



Figura 3.3: Figura extraída de Chun et al. (2018). Una de las unidades FTN, específicamente en Fort Lewis College, en Durango-Colorado. Un ejemplo de cómo se ve el sistema después de la instalación. Se pueden apreciar componentes como la montura ecuatorial, el anillo que soporta el secundario y los contrapesos.

Los domos destinados a albergar los telescopios y los sistemas de control se encuentran cubiertos por una estructura de fibra de vidrio con un diámetro de 3,65 m (ver Figura 3.4), configurada con una apertura en forma de almeja (clamshell). La labor de proporcionar y confeccionar estas cúpulas estuvo a cargo de Astro Haven Enterprises (<https://astrohaven.com>), una empresa especializada en la fabricación de estructuras astronómicas de alta calidad. Es necesario destacar que, dentro de la red, el edificio constituye el único componente que puede variar en su diseño y construcción (Chun et al. (2018)).

La diversidad en la concepción de estos edificios se origina en la singularidad de las instituciones anfitrionas de los telescopios, las cuales, en virtud de sus particulares necesidades y capacidades, determinan las características específicas de los recintos. Estos diseños responden a diversos factores, siendo la geografía del emplazamiento, así como la financiación y los recursos disponibles, los elementos preponderantes en la decisión de la construcción.

Con respecto a los materiales de construcción, en algunos nodos de la red, se ha optado por levantar edificaciones a base de paneles de hormigón preforma-



Figura 3.4: Cúpula Astro Haven Enterprises <https://astrohaven.com> en forma de almeja de la unidad FALCON-ULS. Vicuña, Chile. Fotografía obtenida en una campaña de observación en Marzo del año 2022.

dos o acero, mientras que en el contexto de Chile, caracterizado por su geografía compleja y alta sismicidad, la elección recae en la mampostería armada con estructura interna de acero y vigas de hormigón armado (ver Figura 3.5). Esto además de resaltar la adaptabilidad de la red a distintos contextos geográficos y socio económicos, enfatiza la priorización de la seguridad y la estabilidad estructural considerando las especificidades del entorno.

3.1.2. Sistema Óptico y Detectores

La cámara empleada en todos los telescopios integrados en la red global FALCON es una APOGEE modelo F47 de la serie Alta. Esta cámara posee un sensor E2V CCD47-10 que cuenta con una resolución de 1024×1024 píxeles, caracterizado por su arquitectura retroiluminada y un tamaño nominal de $13 \mu m \times 13 \mu m$. El sensor posee una ganancia de $1.3 e^-/ADU$ y una eficiencia cuántica del 52 % a 400 nm y del 96 % a 500 nm. El tamaño total del sensor es de 13.6×13.6 mm, con una diagonal de 18,88 mm.

La operatividad de este componente es optimizada mediante la implementación de un sistema de enfriamiento basado en refrigeradores termoeléctricos y un sistema de aire forzado, logrando alcanzar temperaturas de hasta $-25^\circ C$ bajo la temperatura ambiente. Aunque el desempeño de estos sistemas no es completamente eficiente, la capacidad de refrigeración asegura la estabilidad térmica del sensor, vital para la obtención de imágenes de alta calidad y la reducción de



Figura 3.5: Edificio de la unidad FALCON-ULS. Vicuña, Chile. *Fotografía obtenida por Matías Rodríguez y Nicolás González en una visita a las instalaciones el año 2018.*

posibles ruidos en las observaciones.

La escala de píxel nominal del sistema es de $0,65''$ por píxel, determinando así un campo de visión aproximado de 11×11 minutos de arco cuadrados. Este valor, que refleja la relación entre la escala angular en el cielo y la resolución de la cámara, juega un papel importante en la delimitación y planificación de observaciones.

La selección del sistema fotométrico más idóneo para una red global de telescopios constituye un desafío no trivial. No obstante, la distribución geográfica de los nodos FALCON abre la puerta a una diversidad de proyectos astronómicos, abarcando desde la investigación de exoplanetas mediante el análisis de curvas de luz en escalas temporales extensas, hasta la identificación de los eventos asociados

a las ondas gravitacionales. Así, cada telescopio se equipó con una rueda de filtros Apogee AFW50-9R. Esta estructura de rueda de filtros posibilita la incorporación de hasta 9 filtros circulares distintos, cada uno con un diámetro de 50 mm y 3 mm de grosor.

Considerando los aspectos previamente mencionados, se optó por la implementación de un sistema de filtros de amplio espectro, sumamente reconocido y utilizado en la comunidad científica. La elección de esta estrategia tiene como objetivo facilitar la calibración efectiva de los datos fotométricos generados por los diversos nodos de la red FALCON, con la meta de establecer una base de datos coherente de manera eficiente. En este contexto, se prioriza la uniformidad en la recolección y análisis de datos.

Entre los sistemas fotométricos de banda ancha comúnmente empleados, destacan el sistema fotométrico central Sloan (u'g'r'i'z') (Fukugita et al. (1996)) y el sistema Johnson-Cousins (Bessell (1990)). En función de la eficiencia cuántica del detector, se ha tomado la decisión de utilizar una combinación específica de filtros fotométricos, a saber: B, V, R, g', r', i', z'. Esta elección se fundamenta en la consideración de asegurar una transmisión óptima en el rango espectral comprendido entre 400 nm y 1000 nm, abarcando así un espectro relevante para las observaciones astronómicas de interés.

	λ_{ref}	λ_{mean}	λ_{eff}	λ_{min}	λ_{max}
u'	3556	3572	3608	3055	4030
g'	4702	4750	4671	3797	5553
r'	6175	6204	6141	5418	6994
i'	7489	7519	7457	6692	8400
z'	8946	8992	8922	7964	10873

Tabla 3.1: Características de los filtros del sistema fotométrico de Sloan.

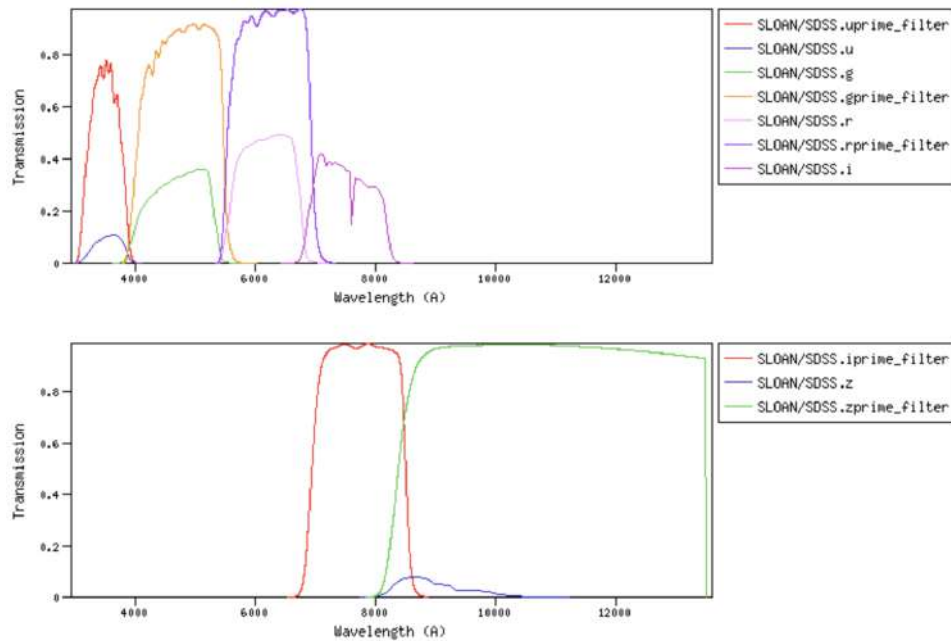


Figura 3.6: Representación gráfica de la transmisión espectral de los filtros fotométricos de Sloan. En el gráfico superior, se muestran las curvas de transmisión de los filtros u'g'r'i' estándar, que abarcan el rango de longitud de onda desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo cercano. En el gráfico inferior, se destacan los filtros i' y z', diseñados para capturar la emisión en el extremo más rojo del espectro visible y el infrarrojo cercano. Cada línea de color representa la eficiencia de transmisión de un filtro específico, definida como el porcentaje de luz que pasa a través del filtro a una longitud de onda dada. Estas curvas son críticas para interpretar las observaciones fotométricas y son fundamentales para estudios de caracterización de objetos astronómicos a través de sus firmas espectrales. La efectividad de la transmisión permite la discriminación precisa de las características espectrales de las fuentes astronómicas, lo que es esencial para investigaciones en áreas como la formación y evolución de galaxias, la estructura a gran escala del universo y la caracterización de exoplanetas.

Es crucial destacar que todos los filtros principales, tanto del sistema Johnson-Cousins como del Sloan, presentan un grosor uniforme de 3 mm. Esta característica técnica minimiza la necesidad de reenfoque del telescopio al realizar cambios en los filtros, optimizando así la eficiencia y reduciendo posibles fuentes de error durante las observaciones. En consecuencia, la elección de este conjunto específico de filtros se erige como un elemento estratégico para asegurar la coherencia y precisión en la recopilación de datos fotométricos (ver Figura 3.6 y 3.7 para detalles de la transmisión espectral de los filtros).

Añadiendo a la configuración, se incorpora al sistema un filtro Astrodon Exo-Planet Blue-Blocking. Este filtro, con un espesor también de 3 mm, presenta capas antirreflectantes en ambos lados, realzando así su eficacia óptica. Este componen-

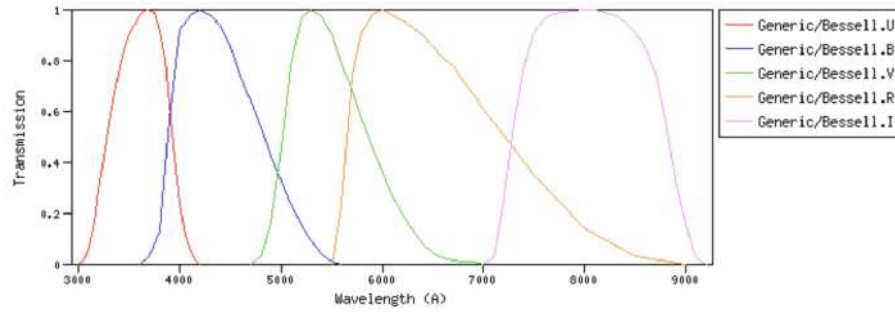


Figura 3.7: Curvas de transmisión de los filtros fotométricos del sistema Johnson-Cousins. Este conjunto de filtros, compuesto por las bandas UBVRI, es una de las bases de la fotometría óptica estandarizada. Las curvas ilustran la fracción de flujo que cada filtro permite transmitir como función de la longitud de onda. El filtro U (azul) se extiende en el ultravioleta cercano, el filtro B (azul claro) cubre la parte azul del espectro visible, el filtro V (verde) coincide con la sensibilidad máxima del ojo humano y es central para la calibración fotométrica, mientras que los filtros R (rojo) e I (marrón) abarcan las regiones de longitud de onda más largas, correspondientes al rojo y al infrarrojo cercano, respectivamente. Estas curvas son fundamentales para la calibración de instrumentos fotométricos y para la determinación precisa de magnitudes y colores estelares, siendo imprescindibles en estudios de la estructura estelar, evolución estelar y la determinación de distancias.

	λ_{ref}	λ_{mean}	λ_{eff}	λ_{min}	λ_{max}
U	3584	3605	3659	3031	4173
V	5477	5512	5445	4733	6875
R	6498	6585	6411	5504	8833

Tabla 3.2: Características de los filtros del sistema fotométrico Johnson y Cousins.

te se optimiza especialmente para la investigación de curvas de luz en estrellas de gran luminosidad, aquellas que superan la magnitud 10. La distinción de este filtro radica en su capacidad para bloquear la radiación ultravioleta y la porción azul del espectro visible, garantizando una buena transmisión en longitudes de onda superiores a 500 nm.

La incorporación de un filtro de esta índole se revela estratégica al realizar fotometría de tránsitos de exoplanetas. Este filtro contribuye a mitigar las diferencias de extinción de masa de aire entre las estrellas objetivo y de comparación de distintos colores. Este ajuste es crucial para mantener la consistencia en las mediciones, especialmente en ambientes astronómicos variables. La implementación estratégica de este filtro enriquece significativamente la capacidad del sistema para abordar los desafíos inherentes a la fotometría de tránsitos exoplanetarios (ver Figura 3.8) en el contexto del proyecto FALCON.

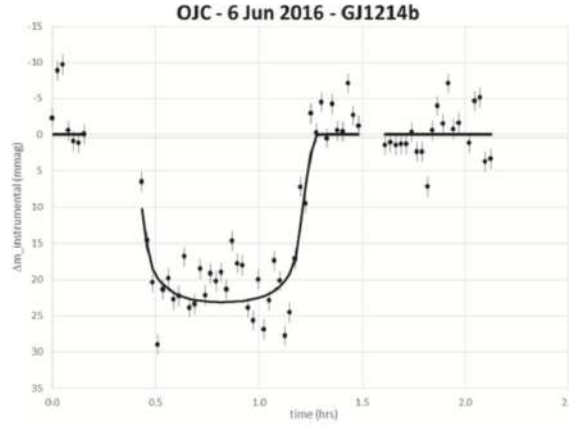


Figura 3.8: Transito de GJ1214b captado con el filtro Astrodón Exoplanet por la unidad FALCON-OJC el 6 de Junio del año 2016 (Chun et al. (2018)).

La rueda de filtros incorpora tambien, en una de sus ranuras, una rejilla de difracción de transmisión Richardson, con una densidad de 100 líneas por milímetro (100 líneas/mm) y un ángulo de incidencia de $4^{\circ},6$ (blaze). La resolución teórica de esta red de difracción oscila entre 103 y 147, abarcando un rango de longitud de onda de 350 nm a 700 nm. La elección de una rejilla de 100 líneas/mm se fundamenta en la configuración de la cámara, que poseen un tamaño de chip CCD de 1024 x 1024 píxeles con un tamaño de 13 micrones por pixel. Esta elección permite la captura simultánea de imágenes de orden cero y orden +1 en un solo cuadro, posibilitando la obtención de espectros contemporáneos en el rango de 350 nm a 850 nm. Este diseño optimizado refleja una estrategia eficaz para maximizar la utilidad del sistema en la recolección de datos espectroscópicos.

3.1.3. Distribución Geográfica de la red FALCON

Una de las características que transforma a FTN en un observatorio astronómico con características formidables es la distribución global del conjunto de telescopios como se muestra en Chun et al. (2018). Esta elección estratégica de ubicaciones para los nodos FALCON ha sido estudiada cuidadosamente considerando diversos parámetros. En primer lugar, las sedes anfitrionas de estos nodos deben asegurar su funcionalidad mediante un acceso fácil a recursos técnicos esenciales para el correcto desempeño del observatorio, tales como accesibilidad, vías de comunicación, suministro eléctrico, agua e infraestructura de conectividad a internet, entre otros aspectos cruciales.

En segundo lugar, la distribución global ha sido concebida para satisfacer las necesidades científicas fundamentales del FTN, priorizando la capacidad de realizar observaciones simultáneas del mismo objeto (como satélites artificiales en órbita terrestre) desde diferentes geometrías de iluminación. Esta orientación no solo garantiza la continuidad de las observaciones, sino que también permite una respuesta inmediata a eventos astronómicos de relevancia. Vale la pena señalar que, por razones de eficiencia en costos y sostenibilidad a largo plazo, la selección de ubicaciones no se ha basado exclusivamente en condiciones astronómicas prístinas, sino que ha considerado primordialmente la infraestructura técnica y logística requerida para el funcionamiento eficaz del observatorio.



Figura 3.9: La Vía Láctea cruzando los cielos del Observatorio Mamalluca en una noche de invierno del año 2018. Este emplazamiento es el lugar de la unidad FALCON-ULS localizado en Vicuña, Chile. *Fotografía de Matías Rodríguez y Nicolás González en una visita a las instalaciones el año 2018.*

En total, se han seleccionado 12 ubicaciones estratégicas distribuidas alrededor del mundo para albergar los telescopios, abarcando siete en Estados Unidos, uno en el norte de Chile, dos en Australia y uno en Alemania. Como planificación adi-

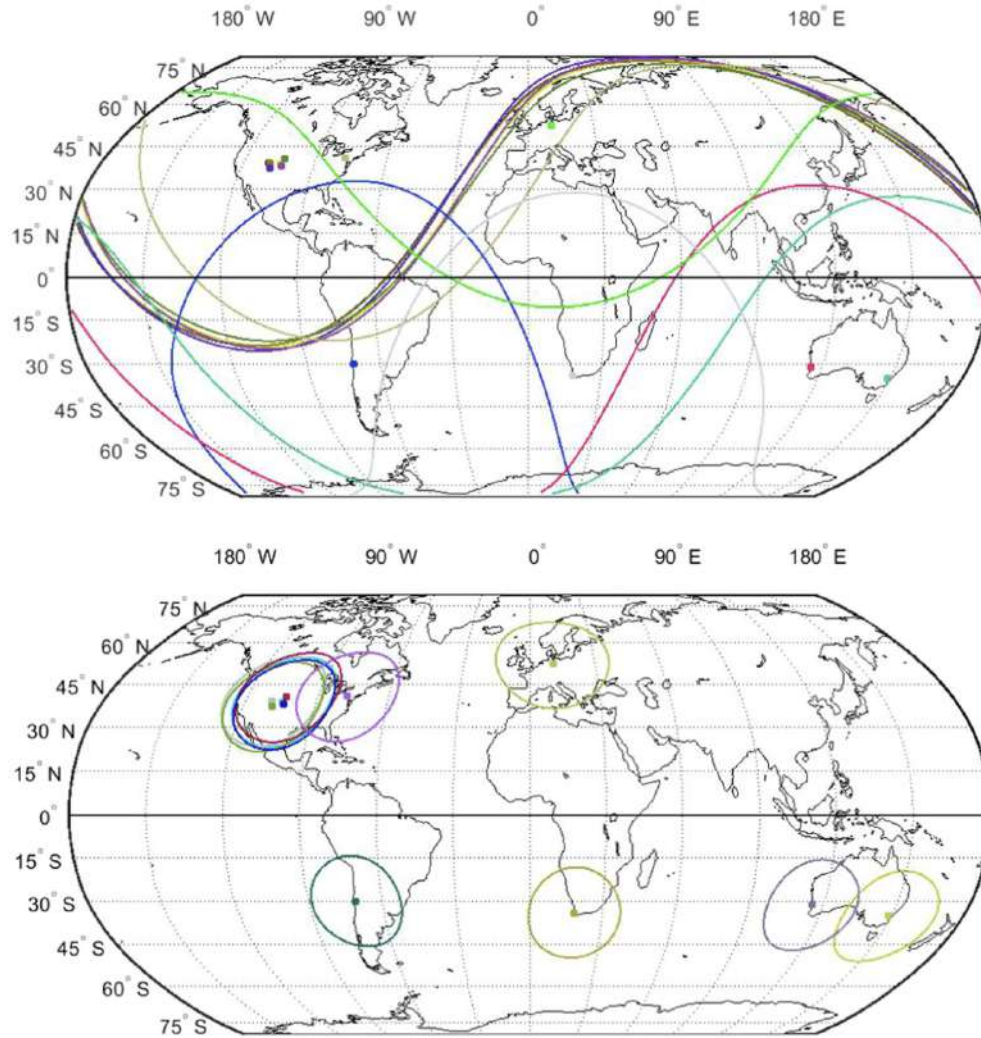


Figura 3.10: Exploración del Campo de Visión del FTN para Órbitas Geosincrónicas (Panel Superior) y Órbitas Terrestres Bajas de 1000 Kilómetros (Panel Inferior) Chun et al. (2018)

cional, se ha contemplado la inclusión de un duodécimo telescopio, actualmente en consideración provisional para su emplazamiento en Ciudad del Cabo, Sudáfrica.

La elección de múltiples sitios en Colorado, Estados Unidos, obedece a la necesidad de brindar la capacidad de observar simultáneamente satélites en órbita terrestre baja (LEO) desde diversas perspectivas y geometrías de iluminación. Esta estrategia busca maximizar la información obtenida durante las observaciones y optimizar la capacidad de respuesta del observatorio ante eventos astronómicos de interés.

De manera similar, la ubicación en Chile (ver Figura 3.9), a una longitud equiparable a los sitios estadounidenses, se justifica para permitir observaciones

simultáneas de satélites en órbita terrestre geosíncrona (GEO), en contraposición a los satélites LEO. Este despliegue geográfico específico responde a las necesidades de investigación y las particularidades de las órbitas de los satélites, como se puede apreciar en los campos de visión simultáneos para los satélites LEO y GEO, detallados en la Figura 3.10.

Education or Research Institute	Telescope Location (city, state)	Country	Longitude (east)	Latitude	Elevation (meters)	Avg Clear Nights per Year	Avg Sky Brightness at Zenith (mag/asec ²)
USAF Academy	Woodland Park, CO	USA	255.01	39.01	2790	168	19
MITRE Corporation*	Yoder, CO	USA	255.80	38.89	1961	168	19
Colorado Mesa University	Grand Junction, CO	USA	251.76	39.96	1380	176	21
Fort Lewis College*	Durango, CO	USA	252.13	37.27	1880	186	19
Northeastern Junior College*	Sterling, CO	USA	256.80	40.65	1177	164	20
Otero Junior College*	La Junta, CO	USA	256.46	37.97	1221	183	18
Penn State University*	State College, PA	USA	282.17	40.86	317	99	19
Universidad de La Serena*	Vicufia	Chile	289.32	-29.99	1139	219	21
University of New South Wales and EOS*	Canberra	Australia	149.17	-35.29	600	120	NA
University of Western Australia, Catholic Education Western Australia, and Gravity Discovery Centre*	Gingin	Australia	115.71	-31.36	18	144	21
Technische Universität Braunschweig	Braunschweig	Germany	10.55	52.28	73	37	NA
University of Cape Town (TBD)	Cape Town	South Africa	18.46	-33.96	110	161	NA

Figura 3.11: Tabla extraída de Chun et al. (2018). Localización geográfica de nodos activos(*) y sus respectivos centros asociados.

La consideración de la distribución geográfica de los sitios refleja la adaptabilidad y la orientación estratégica de la red FALCON para abordar de manera efectiva una amplia gama de objetivos científicos, maximizando la utilidad y eficacia de la red en el contexto de la observación astronómica global.

La gestión de todos los observatorios de la red FALCON recae en diversas instituciones, que abarcan desde escuelas, hasta centros de investigación avanzada y universidades. La USAFA, en este contexto, otorga a cada institución la autonomía para determinar la ubicación específica de construcción del observatorio, tomando en consideración factores tales como costos, operaciones y mantenimiento. Esta flexibilidad en la toma de decisiones promueve la adaptabilidad de la red a las necesidades y características individuales de cada institución anfitriona.

La Figura 3.11 detalla los 12 sitios seleccionados para albergar la red FALCON, ofreciendo información detallada sobre la institución anfitriona (columna 1), la ubicación del telescopio FALCON en términos de ciudad, estado y país (columnas 2 y 3), las coordenadas geográficas en grados (columnas 4 y 5), la elevación del sitio sobre el nivel del mar en metros (columna 6), el número promedio de noches despejadas anuales según datos climáticos proporcionados por los administradores del sitio o Weatherspark.com (columna 7), y el brillo promedio del cielo noctutno en el cenit, cuando estos datos están disponibles (columna 8).

La distribución global de la red FALCON representa un avance significativo al posibilitar la observación simultánea de un objeto desde diversas geometrías. Este atributo distintivo se evidencia claramente en la Figura (3.12), donde se examina la investigación de satélites artificiales. En esta representación, se delinean las distintas áreas de observación que se derivan de cada telescopio, enfocándose particularmente en satélites en órbita terrestre baja (LEO, en la parte inferior) y satélites en órbita terrestre geosíncrona (GEO, en la parte superior). Es crucial destacar que los campos de observación se han configurado para elevaciones superiores a 20° sobre el horizonte, garantizando una observación efectiva y precisa.

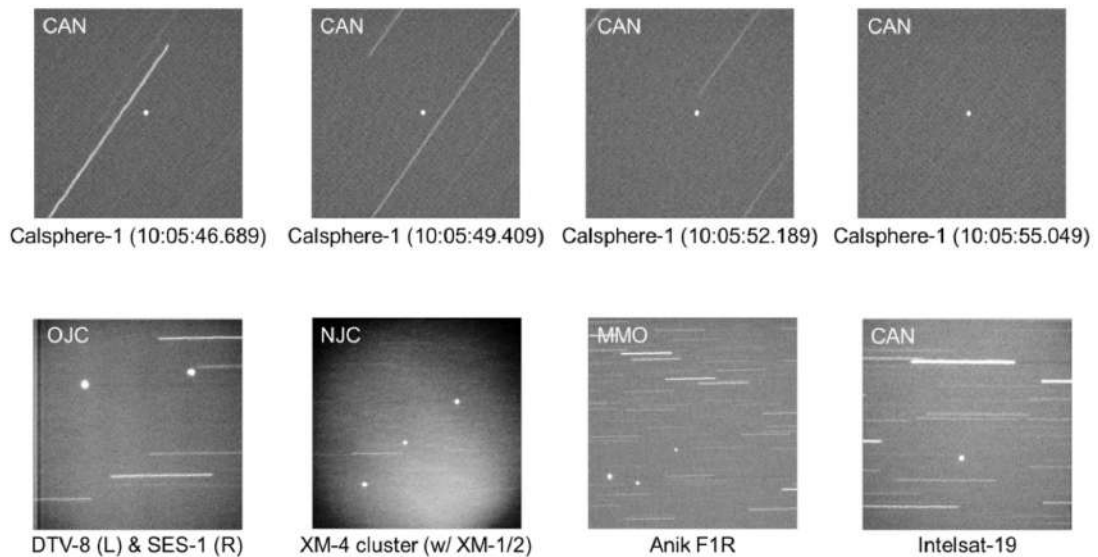


Figura 3.12: Conjunto de datos crudos, tomados el 2014 con diferentes nodos de la red. En la parte superior 4 imágenes correspondiente a satélites GEO utilizando el nodo FALCON-CRB localizado en la University of New South Wales (UNSW) Canberra, Australia. Parte inferior datos crudos de satélites LEO's, tomados por distintas unidades de la red Chun et al. (2014)

La visualización detallada en la Figura 3.10 también revela que es posible observar objetos ubicados en cualquier parte del cinturón geosíncrono desde al menos dos sitios, y en algunos casos, incluso se posibilita la observación simultánea desde los hemisferios norte y sur. Para los satélites en órbita baja, se observa una superposición de los sitios en Estados Unidos y de los sitios en Australia. Esta redundancia estratégica ofrece la capacidad de realizar un seguimiento fluido de objetos, permitiendo que la observación se transfiera de un telescopio a otro

a medida que el objeto se desplaza fuera del campo de visión de uno de los telescopios.

Un aspecto notable es la posibilidad de realizar un seguimiento continuo de algunos satélites a lo largo de sus órbitas, extendiendo el tiempo de observación en comparación con lo que un solo sitio podría lograr por sí solo. Este método eficiente se traduce en una mejora notable en la recopilación de datos astronómicos y potencia las capacidades de seguimiento orbital de la red FALCON como se muestra en Albrecht et al. (2022).

Tabla 3.3: Especificaciones del nodo FALCON-ULS.

Características	Detalles
Telescopio	Officina Stellare 20 inch, f/8.1 Ritchey–Chrétien
Distancia focal	4000 mm
Cámara	Apogee Alta F47 1024 × 1024 pixels
Área de la matriz	13.6 mm × 13.6 mm
Diagonal de la matriz	18.88 mm
Sensor	E2V CCD47-10, 13 μm pixel, 11' FOV
Ganancia	1.3 e-/ADU
Pixel Binning	1 x 1 to 8 x 1024 en chip
Escala de pixel - placa	0.65"/pix o 51"/mm
Rueda de filtros	Apogee AFW50-9R
Filtros disponibles	B, V, R, g', r', i', z', Astrodon Exo-Planet Blue-Blocking, 100 lines/mm diffraction grating,
Temperatura de funcionamiento (Detector)	-25°C
Montura	Ecuatorial Paramount ME2
Peso del telescopio	90 kg
Cúpula	Astro Haven 12-foot Clamshell Dome
Sensor de Nubes	Boltwood Cloud Sensor II
Receptor GPS	Symmetricon GPS Receiver (BC637PCIE): 170 ns rms accuracy
Computadoras	Advantech Gen II Computers w/Intel SSD DC S3700 Series
Almacenamiento	Synology NAS (8–20 TB)
Router	Cisco ASA 5505 Router
Switch	Cisco Small Business 200 Series Switch
Fuente de Poder (UPS)	Tripp Lite Uninterruptible Power Supply (UPS) SMART1000/2000
Cámara IP	Foscam Pan/Tilt Internet Protocol (IP) Camera (FI8919W and FI9826W)

Capítulo 4

Aplicaciones Astrométricas a FALCON-ULS.

4.1. Motivación

Una de las principales limitaciones de FTN reside en la falta de un estudio detallado de las capacidades de las unidades, que abarca desde hardware y óptica, hasta las influencias climáticas y atmosféricas del lugar donde fueron instaladas. Estas deficiencias podrían impactar de manera directa en los datos en forma de distorsiones que se pueden ver reflejadas en inexactitudes posicionales, desviaciones orbitales, o simplemente en aberraciones. Estos factores afectan directamente gran parte de los objetivos principales del proyecto, tales como la observación y el estudio de satélites y “objetos transeúntes”, para los cuales se necesita gran precisión.

El telescopio FALCON-ULS, situado en el Observatorio Mamalluca en el norte de Chile, ha sido designado como la unidad principal de las 8 operacionales para llevar a cabo el presente trabajo de tesis sobre aplicaciones astrométricas dentro de la red.

La comprensión de cómo la luz de los objetos astronómicos viaja por el sistema óptico, alcanza el plano focal y cómo este último a través del sensor capta la señal electromagnética de los objetos, son factores claves que podrían introducir errores sistemáticos o distorsiones durante la observación. Es por ello que el estudio de estos elementos es esencial para el éxito y la fiabilidad en las investigaciones tanto de la red FALCON, como de cualquier proyecto astronómico.

Las distorsiones que involucran desde desalineaciones del sensor, defectos en la óptica, hasta perturbaciones atmosféricas, pueden modificar distintos parámetros del sistema y afectar la precisión de las mediciones y la interpretación de los datos. Un análisis profundo de estos efectos es imperativo para garantizar la calidad y la confiabilidad de los resultados obtenidos a través de la observación con telescopios de esta naturaleza.

Es por esto que junto con la colaboración se ha tomado la responsabilidad de dar solución a este problema a través de la realización de un código que entregue soluciones astrométricas y tenga la capacidad de caracterizar parte de la óptica del telescopio FALCON-ULS. Dicho código tendrá la versatilidad de ser utilizado para cualquiera de la unidades de la red, entregando modelos de distorsiones ópticas que tienen el potencial de actuar como máscaras para corregir los datos una vez son tomados por los telescopios del proyecto.

Antes de continuar, ofrecemos una breve descripción general del método para proporcionar contexto. La premisa fundamental del método que se utilizará en esta tesis radica en detectar fuentes astronómicas a través de SExtractor (Bertin & Arnouts (1996)) y medir las coordenadas físicas de un considerable número de estrellas, capturadas en el plano focal del telescopio (placa observada), y compararlas con las posiciones derivadas de un modelo polinomial de distorsión óptica preciso (placa sintética), como se describe en Eichhorn (1971) y Freeman et al. (2023). Este modelo convierte las coordenadas celestes de las estrellas de referencia en coordenadas de plano focal. Dichas coordenadas celestes son obtenidas de un catálogo astrométrico de alta precisión, siguiendo trabajos como el de Robichon et al. (1995), pero en este caso, el sondeo Gaia (Gaia Collaboration et al. (2023)) que ha sido nuestra vara de medir desde hace unos años. La creación de un modelo de esta índole implica resolver una transformación que convierte las coordenadas celestes a coordenadas físicas del plano focal y viceversa (Eichhorn (1971)). Esta transformación incorpora constantes de placa que modelan diferentes tipos de distorsiones inherentes al CCD, y por otro lado describe la escala de placa en función del radio desde el eje óptico en el plano focal, siendo las distorsiones radiales responsables de describir dicho cambio de escala con respecto al radio. Los residuos se calculan restando las posiciones del modelo (que incluyen las constantes de placa y la distorsión radial) de las posiciones observadas. El objetivo del ajuste astrométrico es minimizar estos residuos ajustando las constantes de placa y los

coeficientes de distorsión radial.

4.2. Puesta en marcha del proyecto

Tras casi dos años de adaptación a la nueva normalidad impuesta por la pandemia del Covid-19 en 2020, se iniciaron las primeras etapas de planificación para llevar a cabo el presente trabajo de tesis. Este periodo, marcado por las restricciones impuestas por el virus que nos limitaron en nuestras actividades cotidianas, dio paso a una gradual vuelta a la operación normal de proyectos científicos y, en particular, a las operaciones *in-situ* de telescopios y observatorios.

El proceso de retorno a la normalidad no fue fácil. Muchos observatorios en todo el mundo se vieron obligados a realizar una revisión rigurosa de los sistemas, junto con extensos trabajos de mantenimiento y reconfiguración para asegurar el funcionamiento óptimo de sus instrumentos. En este contexto, la red de telescopios FALCON, con especial énfasis en la unidad FALCON-ULS, no escapó a la necesidad de realizar ajustes y renovaciones para garantizar el rendimiento adecuado de sus componentes. Este proceso, aunque desafiante, sentó las bases para retomar las actividades científicas de manera plena y efectiva.

A principios del año 2022, se llevaron a cabo los primeros chequeos de los sistemas. Este proceso abarcó aproximadamente un mes e implicó una serie de verificaciones y ajustes para garantizar el funcionamiento óptimo de la unidad.

Las actividades incluyeron:

- Evaluación del sistema de abastecimiento energético del telescopio.
- Limpieza y revisión del funcionamiento del domo.
- Chequeo y reparación de la estación climática.
- Evaluación de la conectividad a Internet para operaciones remotas.
- Análisis de la mecánica general del sistema.
- Verificación del correcto funcionamiento de los distintos controladores y actuadores del telescopio.
- Evaluación de los sistemas de enfriamiento para la cámara.

- Revisión de la mecánica de la rueda de filtros.
- Evaluación de la reflectividad del espejo primario.
- Captura de las primeras imágenes de calibración y del cielo.



Figura 4.1: Izquierda: Espejo primario telescopio FALCON-ULS meses después de la pandemia del Covid-19. Centro: El primario de 20” pulgadas luego de un mantenimiento para mejorar su reflectividad. Derecha: Pablo instalando una antena de conectividad a internet en las instalaciones de FALCON-ULS. Foto por José Luis Nilo Castellón.

4.3. Interfaz gráfica de usuario y controladores

Tanto el interfaz gráfico de usuario, como el controlador acoplado que comunica los distintos componentes del telescopio con el observador, está a cargo del software “*The Sky X*”.

The Sky X (ver Figura 4.2), es un programa de origen privativo desarrollado por la empresa de Software Bisque (<https://www.bisque.com>) y fue lanzado en la década de 1980, pensado principalmente en astrónomos aficionado. Con los años ha evolucionado a través de continuas actualizaciones y mejoras, convirtiéndose en una herramienta apta para astrónomos profesionales y centros de investigación de todo el mundo.

La interfaz gráfica intuitiva del programa facilita la exploración del cielo, mientras que su extensa base de datos astronómica proporciona información detallada

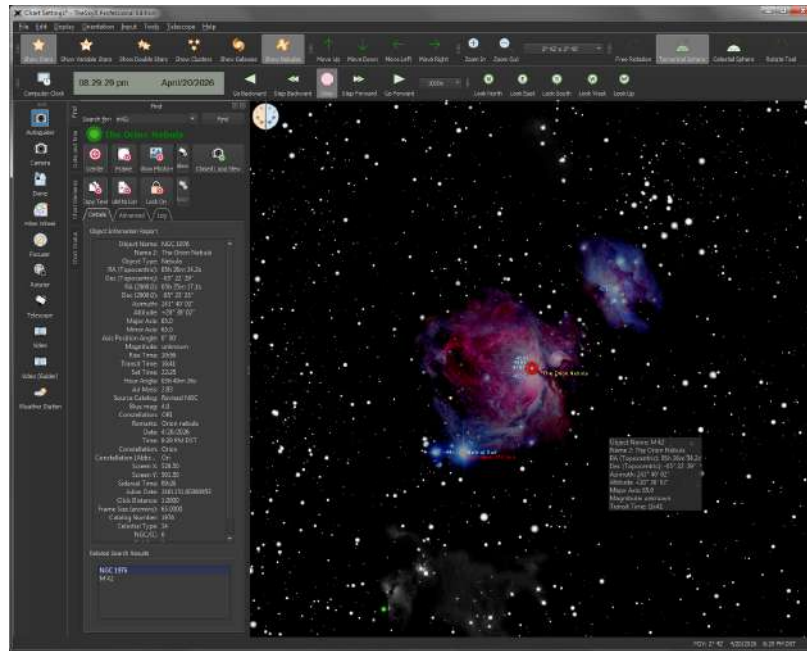


Figura 4.2: Interfaz Gráfico Software Sky X. Información completa de este software en <https://www.bisque.com>.

sobre estrellas, planetas, galaxias y otros objetos celestes, como por ejemplo satélites. Destaca por su capacidad de planificación de observaciones, permitiendo a los usuarios determinar la posición y visibilidad de objetos celestes en momentos específicos. Además, TheSky X ofrece funciones avanzadas, como el control de telescopios, integrándose de manera efectiva con hardware astronómico. Entre sus ventajas también se encuentran la integración manual de base de datos, como por ejemplo los TLE's (Two Line Element set) que indican coordenadas y posiciones de los satélites GEO y LEO, fundamentales para este proyecto.

Cabe destacar que el software que se actualiza todos los años (última actualización el 2022) es compatible con la infraestructura total del telescopio, permitiendo el control de rastreo, cámara, ajustes del espejo secundario, rueda de filtros, domo, recursos energéticos, etc.

4.4. Tipos de datos y obtención de datos de prueba

Después del mantenimiento, el equipo de colaboración organizó varias sesiones de observación para recoger datos con la unidad FALCON-ULS, con el fin de

analizar sus capacidades y restricciones. Esto tuvo como objetivo una evaluación integral del telescopio y del software asociado, buscando áreas susceptibles de mejora y asegurando la preparación del equipo para futuros trabajos.

Durante estas jornadas, se obtuvieron datos en variadas condiciones astronómicas que posibilitaron la calibración de la respuesta y precisión del telescopio. La metodología implementada proveyó datos esenciales para perfeccionar el funcionamiento del FALCON-ULS.

Con el hardware operativo, la comunicación entre sistemas comprobada y la interfaz de usuario validada, se inició una campaña de observación en Mayo del año 2022. Esta campaña exploró la amplitud de datos obtenibles por el FALCON-ULS en distintos escenarios astronómicos, desde la observación de galaxias y estrellas hasta la detección de satélites geoestacionarios.

El procedimiento de adquisición de datos incluyó la captura de imágenes de calibración (*Bias, Darks y Flats*) con distintos tiempos de exposición, esenciales para identificar y corregir anomalías del sensor. Esta etapa fue crucial para garantizar la integridad de los datos e indispensable en la fase de corrección y análisis de imágenes.

Se creó además una amplia base de imágenes de variados objetos astronómicos, llevando el telescopio a diferentes posiciones en el cielo, con exposiciones y filtros fotométricos diversos. Se realizaron observaciones en diferentes modos, incluyendo apilado y reducción automática, con y sin seguimiento sideral, y con ajustes del enfoque. Particularmente, se observaron satélites (ver Figura 4.3) usando la rejilla de 100 líneas por milímetro disponible en todas las unidades, un recurso también utilizado en experimentos de calibración para estos cuerpos.

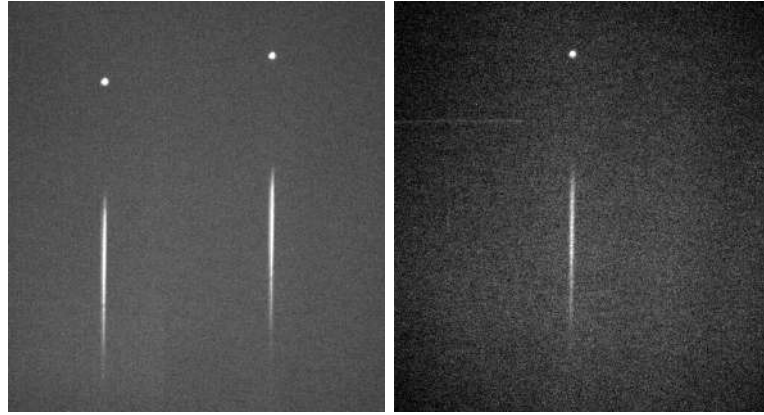


Figura 4.3: Imágenes de seguimiento óptico de satélites durante la campaña de observación Glint Season en Mayo de 2022, en colaboración con la United States Air Force Academy (USFA). A la izquierda, se observan los rastros de los satélites DTV10 y DTV12, caracterizados por las brillantes y distintivas estelas que dejan a su paso debido a la reflexión de la luz solar en sus superficies. A la derecha, se muestra el rastro del satélite STPSAT-6, identificable por su trayectoria y reflejo característico en el rango óptico. Estas observaciones fueron parte del proceso de adquisición de distintos tipos de datos de la unidad FALCON-ULS.

4.5. Reducción de datos y análisis

Luego de la toma de datos, la atención se centró en la realización de un análisis *a priori* pero detallado de los datos recopilados durante la fase de prueba. Este análisis se presenta como un paso fundamental para detectar posibles influencias ópticas, mecánicas o ambientales que podrían incidir en la calidad de los datos y, por ende, introducir errores sistemáticos en el estudio de los objetos celestes.

Uno de los puntos claves fue la captura de imágenes de Flats, tanto durante el atardecer como al amanecer. Sin embargo, este proceso se vio interrumpido debido a que las imágenes de Flats exhibían patrones inesperados y una variabilidad considerable en el número de cuentas durante el barrido de la imagen. Estos problemas comprometían la utilidad de las imágenes para la posterior reducción de datos (ver Figura 4.4, fila 1).

Ante esta situación, la colaboración llevó a cabo un análisis de las imágenes y llegó a la conclusión de que la anomalía arriba mencionada estaba relacionada con la posición del telescopio al tomar este tipo de imágenes. Para abordar esta problemática, se implementó una solución consistente en la creación de una biblioteca de imágenes de Flats capturadas específicamente al amanecer. Esta medida correctiva permitió superar las dificultades previas y asegurar la calidad de los datos recopilados durante la observación.

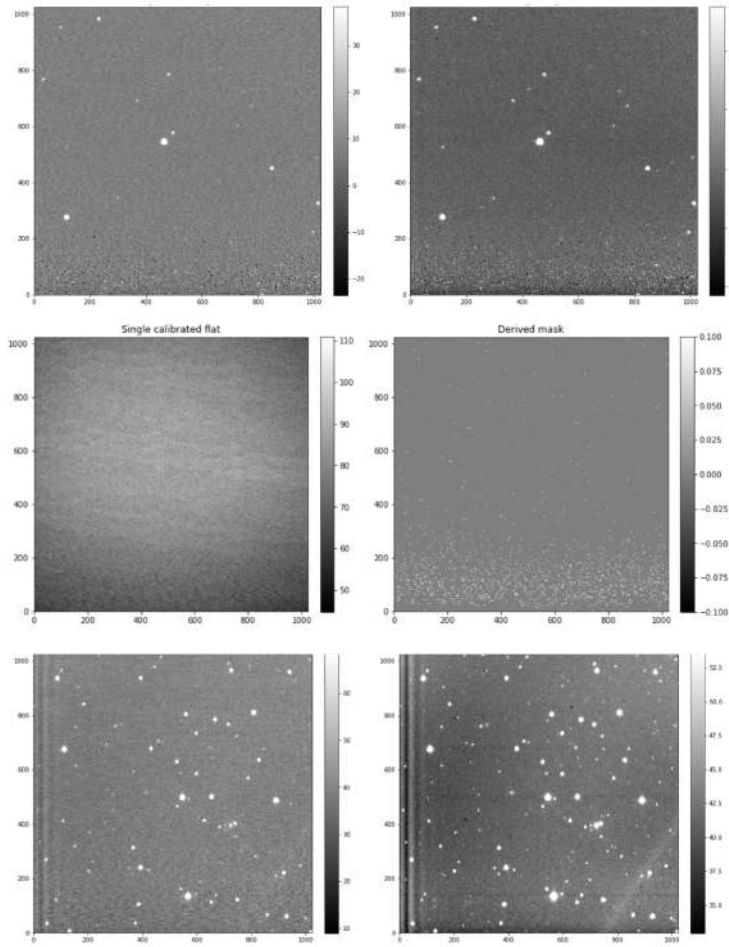


Figura 4.4: Fila 1: Primeras reducciones a imágenes de ciencia con Flats de atardecer aplicados. Fila 2: Flat de crepúsculo simple a la izquierda y máscara de Flats de crepúsculos construida a la derecha. Fila 3: Imágenes de ciencia con reducción exitosa.

Como se mencionó anteriormente, la investigación astrométrica demanda una precisión y fiabilidad de datos excepcionales, por lo cual se ha integrado un código de reducción astronómica basado en Astropy. Este software, diseñado para procesar los datos del telescopio FALCON-ULS, se convierte en una herramienta crucial para la mejora de la calidad de las imágenes y la interpretación rigurosa de los fenómenos celestes. Este código se basa principalmente en la corrección de errores instrumentales, relacionados a el ruido electrónico y se complementa con ajustes para condiciones atmosféricas, tales como la absorción y dispersión de la luz en la atmósfera. Utilizando imágenes de calibración, se corrigen defectos como píxeles calientes y gradientes de iluminación, implementando técnicas de “dark frames”, “flat fields”, y la resta de “bias frames” para normalizar las lecturas del detector,

el viñeteo y los efectos de la atmósfera.

El resultado de este proceso es la obtención de datos calibrados, listos para análisis científicos.

4.6. Adquisición de datos

Las imágenes CCD de campos estelares sobre las que se trabajaron en este estudio, fueron obtenidas la noche del 5 de agosto de 2022, en colaboración con miembros del Grupo de Ciencia Espacial de la Universidad de La Serena.

Tras completar las calibraciones necesarias para la subsiguiente reducción de datos, el telescopio fue dirigido hacia las coordenadas celestes RA 18:45:07, DEC -43:48:18. Este apuntado estratégico se orientó hacia un campo estelar poblado, ubicado en una baja latitud galáctica, en las proximidades de la constelación de la Corona Austral. Este escenario celeste seleccionado ofrece un entorno propicio para llevar a cabo el experimento.

El inicio preciso de la toma de datos quedó registrado a la hora sideral ST 17:27:10 con un ángulo horario HA -01:19:37 y una masa de aire de 1,01. Estos parámetros temporales y atmosféricos son cruciales para contextualizar y validar los resultados obtenidos. Con estos datos iniciales, se establece una base robusta para el análisis y las interpretaciones que puedan surgir de este estudio.



Figura 4.5: Cielo prístino en el Observatorio Mamalluca la noche del 5 de Agosto del 2022. FALCON-ULS adentrándose en la Vía Láctea. *Registro fotográfico de Pablo Vera durante un break de una larga jornada de capturar fotones.*

Es de suma relevancia resaltar que durante el periodo de estas observaciones, el

cielo se encontraba despejado en su totalidad, proporcionando condiciones ideales para la toma de datos astronómicos (ver Figura 4.5). La temperatura ambiente se mantenía constante en 11°C , la humedad relativa rondaba aproximadamente el 40% y la presión se mantenía cerca de 940 mb en esa noche invernal. La transparencia atmosférica (solo medida a ojo en este caso), temperatura, humedad y presión son elementos críticos que influyen directamente en la calidad y la precisión de las observaciones astrométricas.

La configuración para la observación se llevó a cabo utilizando las características originales por defecto del telescopio y del sensor (Ver Tabla 3.3). La utilización de la matriz se realizó sin binning, preservando así la resolución total del sensor. Es relevante destacar que la cámara se mantuvo estable en su temperatura de funcionamiento de -25°C bajo la temperatura ambiente, garantizando condiciones térmicas óptimas (límite del instrumento) para la adquisición de datos.

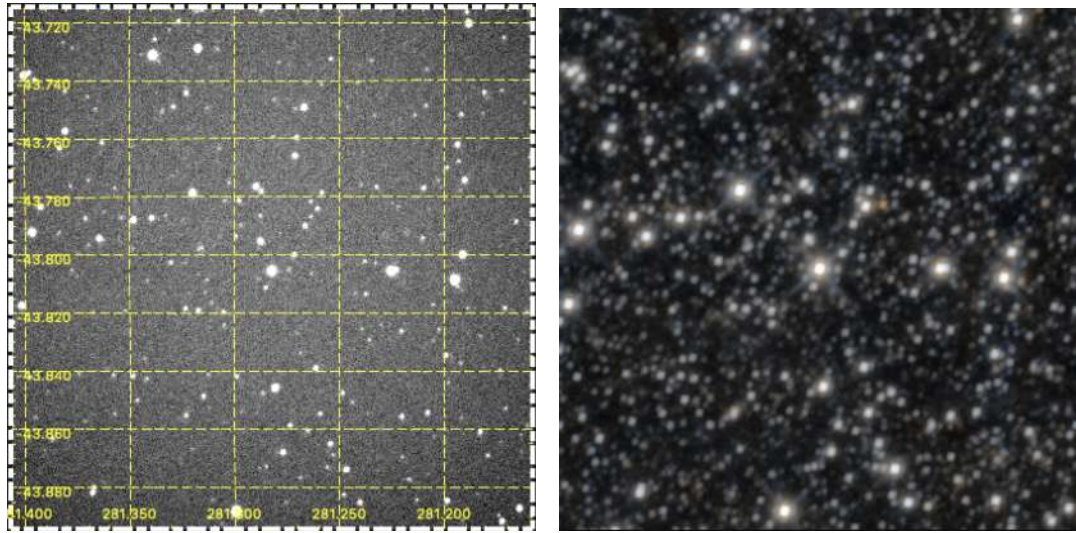


Figura 4.6: Comparativa de observaciones astronómicas en diferentes longitudes de onda. A la izquierda, se muestra una imagen en escala de grises obtenida con una exposición de 40 segundos utilizando el filtro r del nodo FALCON-ULS, revelando la distribución de las fuentes de luz en el campo objetivo. A la derecha, se presenta la misma región del cielo capturada por el telescopio espacial WISE en el infrarrojo, destacando la emisión de fuentes celestes en esta banda espectral. La comparación de ambas imágenes demuestra la alta capacidad del nodo FALCON-ULS considerando que es un telescopio comercial.

Al comienzo de la secuencia de observación, los observadores giraron el telescopio cerca del meridiano, con una declinación de -43° , correspondiente a una distancia cenital para la imagen de alrededor de -14° (la latitud de Mamalluca es

-29°). Esta elección se hizo para reducir los efectos de la flexión del telescopio y la refracción diferencial, e igualmente porque esa región del cielo ofrecía suficientes estrellas para obtener una buena solución astrométrica.

Durante la observación, se llevaron a cabo exposiciones de 40 segundos en el campo objetivo (ver Figura 4.6), tiempo que se configuró para evitar la saturación de las estrellas más brillantes del campo utilizando el filtro r de sloan ($\lambda = 6141\text{\AA}$). Los bordes del detector estaban alineados hacia el norte y el este en el cielo.

Además en la misma noche se tomaron datos a la colaboración del mismo campo estelar pero realizando una técnica de dithering o traslapo (ver Figura 4.7). Esta técnica descrita íntegramente en los trabajos de Stock (1981) y Abad (1993), propone el uso de un dithering o traslapo dentro de un campo objetivo para obtener modelos astrométricos. Este método en resumen, se basa en un barrido de campo procurando dejar un mismo objeto en diferentes placas. Con esto se genera un conjunto de ecuaciones, provenientes tanto del enlace placa-placa, como del enlace placa-catálogo para ajustar las soluciones de las placas del catálogo y evaluar las distorsiones sistemáticas. Después de obtener las soluciones por bloques para los grupos de placas, se calculan las constantes de placa para la posición de cada placa y, por ende, para cada estrella.

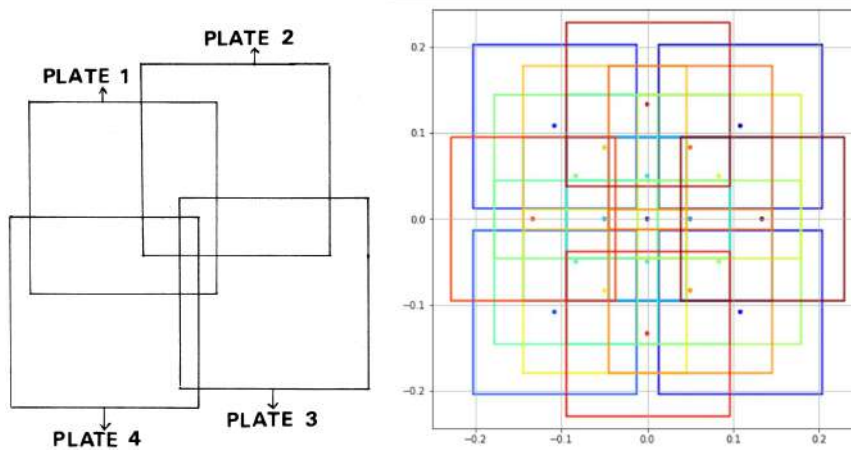


Figura 4.7: *Izquierda:* Método de ajuste por bloque con 4 placas propuesto en Stock (1981). *Derecha:* Traslado de 21 placas realizado para la colaboración con datos de FALCON-ULS.

Capítulo 5

Modelamiento de datos

5.1. Preámbulo

En este capítulo se aborda en detalle el proceso para la aplicación de soluciones astrométricas a datos de la red de telescopios FALCON (Chun et al. (2018)). Este proceso que se detalla en las secciones subsiguientes es aplicable a cualquier sistema óptico presente en telescopios. El código generado es versátil y eficaz en tareas como detección de fuentes astronómicas, entrecruzamiento de datos, ajuste por movimientos propios, cálculo por refracción atmosférica y por su puesto, el modelar distorsiones correspondiente a la escala, orientación, zero-point, tilt y distorsiones radiales. Este procedimiento fue realizado siguiendo pautas de trabajos como el de Robichon et al. (1995), Freeman et al. (2023), y por supuesto artículos clásicos como Abad (1993).

5.2. Source Extractor - *SExtractor*

El software SExtractor (Bertin & Arnouts (1996)) desempeña un papel fundamental en la astronomía y la astrometría al permitir la detección “automática” de fuentes celestes y la generación de catálogos que abarcan una amplia gama de parámetros, desde los aspectos posicionales hasta las características fotométricas y morfológicas. Su eficiencia es notable, ya que puede procesar áreas extensas de datos de forma rápida y eficaz, lo que resulta ideal en un campo donde el análisis de grandes conjuntos de datos es la norma. Además, su capacidad para manejar imágenes de alto volumen sin comprometer la calidad o la precisión es una característica que lo distingue de otros programas disponibles.

Una particularidad de SExtractor es su diseño adaptable, que permite a los usuarios ajustar los parámetros y configuraciones según las necesidades específicas de su investigación. Esta flexibilidad es esencial en un entorno científico en constante evolución, donde los requisitos de análisis pueden variar de un proyecto a otro.

El proceso (ver Figura 5.1) que sigue SExtractor para identificar y caracterizar las fuentes astronómicas comienza con la evaluación del fondo del cielo, donde distingue con precisión entre los píxeles que pertenecen al fondo y aquellos que corresponden a objetos celestes. A partir de ahí, el software aísla los objetos del fondo, realiza la separación y la identificación de objetos cercanos, y calcula una serie de propiedades fundamentales para cada uno de ellos, incluido su flujo luminoso total y su posición precisa.

En el contexto de este trabajo, el uso de SExtractor ofrece una ventaja importante al permitir configurar el entorno de detección de fuentes desde el punto cero, trabajando sin sesgos ni cajas negras. El trabajo con SExtractor y las características que se describen a continuación contribuyen directamente al resultado final de este proyecto astrométrico.

Estimación del Background

El “background” o fondo de una imagen astronómica se refiere a la luz y a las señales que no son atribuibles directamente a los objetos de interés (como estrellas, galaxias, etc.) y que ocupan el “fondo” de la imagen. Esto incluye la luz dispersa en la atmósfera terrestre, la emisión difusa del cielo, y el ruido electrónico del detector. La estimación precisa del fondo es fundamental para medir correctamente las propiedades de las fuentes astronómicas, como su brillo y forma.

SExtractor aborda esta tarea mediante una metodología que se centra en la precisión y la flexibilidad para adaptarse a diversas características de imagen.

Metodología de estimación del fondo en SExtractor

- Segmentación en celdas: Primeramente la imagen se divide en una malla de celdas de tamaño configurable. Este tamaño es crucial, ya que debe ser lo suficientemente grande para estadísticas significativas y para suavizar las fluctuaciones de escala pequeña, pero lo suficientemente pequeño para

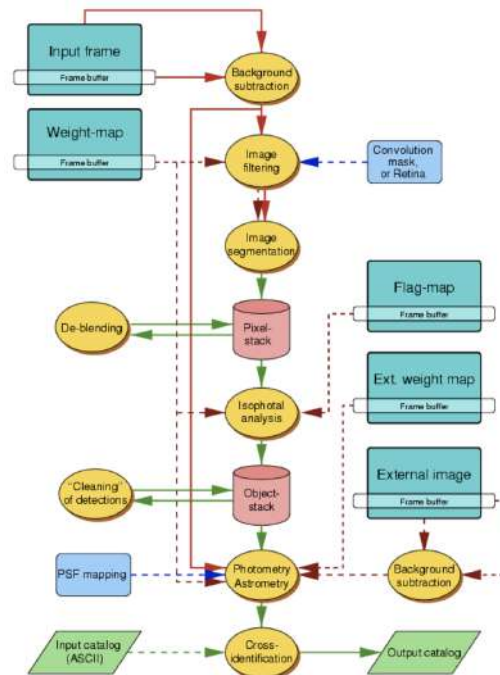


Figura 5.1: *Diagrama de Flujo*: Diagrama de flujo del proceso de procesamiento de datos implementado por el software SExtractor. El flujo inicia con la entrada del marco de imagen y procede a través de varias etapas de refinamiento, incluyendo la sustracción del fondo, la filtración de imágenes, y la segmentación. Se realiza un de-blending sofisticado para resolver fuentes superpuestas, seguido de un análisis isofotal para definir los contornos de los objetos. Finalmente, se efectúa la fotometría y la astrometría, resultando en un catálogo detallado de propiedades de los objetos celestes detectados. Este proceso es fundamental para la obtención de mediciones precisas que son cruciales para la actual investigación. Imagen extraída de la segunda edición de la guía-manual de *Source Extractor Guide to Galaxies*.

detectar variaciones espaciales en el fondo.

- Estimación del fondo por celda: Para cada celda, SExtractor calcula un valor de fondo utilizando estadísticas robustas, típicamente el valor mediano, para minimizar la influencia de valores atípicos (por ejemplo, píxeles pertenecientes a fuentes estelares o galácticas). Esta aproximación asegura que el valor estimado represente fielmente el fondo local, excluyendo la contribución de objetos celestes.
- Filtrado y modelado del fondo global: A continuación, se aplica un filtro mediano a las estimaciones del fondo de las celdas para producir un mapa de fondo suavizado. Este paso es esencial para eliminar discontinuidades y variaciones abruptas entre celdas adyacentes. En este contexto, la elección del filtro mediano sobre otros tipos de filtros, como los filtros promedio o

gaussiano, se justifica por su capacidad para preservar los bordes de las características de la imagen mientras se reduce el ruido. Los filtros se pueden clasificar según su geometría, siendo los más comunes los rectangulares, circulares y en forma de cruz. La geometría del filtro influye en cómo se ponderan los píxeles vecinos durante el proceso de filtrado, afectando así el resultado final. La elección de una geometría específica dependerá de las características de la imagen y de los objetivos de la estimación del fondo. Luego, SExtractor puede ajustar un modelo polinómico al mapa de fondo suavizado, lo que permite interpolar el fondo en cada píxel de la imagen. Este modelo polinómico es flexible y puede ser de primer orden (plano) o de mayor orden para capturar variaciones más complejas del fondo.

- **Sustracción y generación del mapa de fondo:** Finalmente, el fondo estimado se sustrae de la imagen original píxel por píxel, resultando en una imagen en la cual el fondo ha sido efectivamente “normalizado”. El mapa de fondo generado por SExtractor es una representación de la estimación del fondo a lo largo de la imagen. Este mapa muestra los valores del fondo que SExtractor ha calculado para cada región. Al igual que con la imagen original, los valores más altos en el mapa de fondo indican áreas de mayor brillo de fondo, mientras que los valores más bajos representan áreas más oscuras (ver Figura 5.2). SExtractor representa este background estimado y modelizado, permitiendo visualizar y evaluar la precisión de la sustracción del fondo.

Este proceso implica la manipulación de parámetros, como el tamaño de las celdas y el orden del modelo polinómico, para adaptarse a las características específicas de la imagen y del instrumento. La capacidad de SExtractor para ajustar estos parámetros permite optimizar la estimación del fondo para las necesidades específicas, lo cual es crucial para la detección precisa de objetos débiles y para la medición fiable de sus propiedades.

El impacto de esta corrección se evidencia en la mejora de la sensibilidad de detección, especialmente para objetos débiles que podrían estar enmascarados por fluctuaciones del fondo de cielo. Además, al disminuir la influencia del fondo, se reduce al mínimo el sesgo presente en las mediciones fotométricas y astrométricas, lo cual se traduce en una mayor precisión en la determinación de las propiedades de los objetos detectados, como su posición, brillo y tamaño.

Los parámetros de SExtractor configurados para este trabajo fueron un `BACK_SIZE` de 64, para equilibrar entre captura de fondo y la detección estelar, con un `BACK_FILTERSIZE` de 3, para suavizar adecuadamente el fondo sin perder capacidad de detección en las estrellas. Debido a que nuestro campo presentaba algunas variaciones significativas, se escogió un entorno `LOCAL` para `BACKPHOTO_TYPE`. De todos modos es importante considerar probar siempre `BACKPHOTO_TYPE GLOBAL` si el campo estelar no muestra variaciones de brillo. Esto puede ayudar a mejorar la detección de fuentes en regiones de fondo suave.

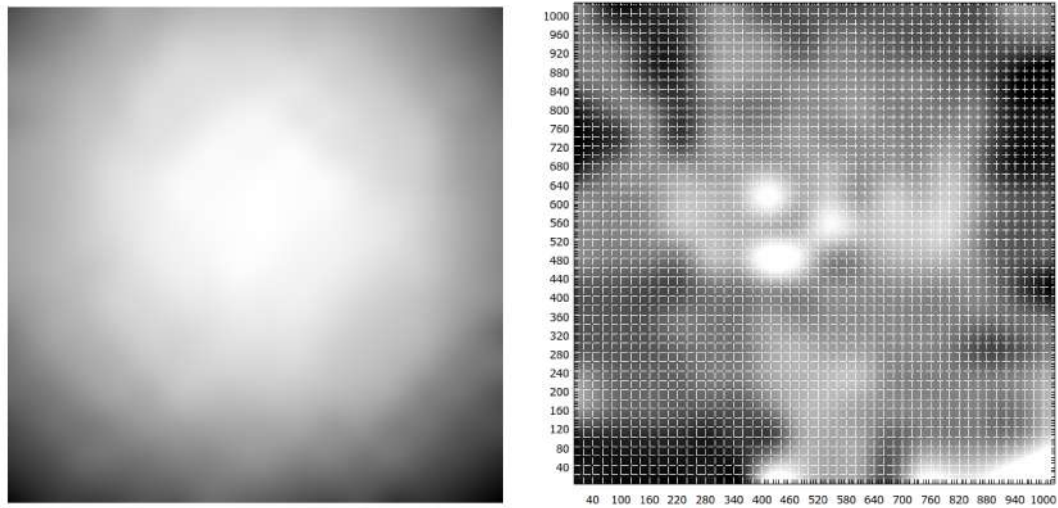


Figura 5.2: *Izquierda: Mapa de Background.*- En el lado izquierdo, el mapa de fondo revela un gradiente suave de luminosidad, no asociado con fuentes astronómicas puntuales, sino más bien con luz difusa como la luz zodiacal o la emisión de airglow. La correcta estimación y sustracción de este fondo es esencial para obtener mediciones fotométricas precisas de los objetos de interés. SExtractor automatiza este proceso al dividir la imagen en una cuadrícula y calcular el fondo en cada celda, ajustando localmente para contabilizar las variaciones del fondo a través de la imagen. *Derecha: RMS Background.*- Por otro lado, en el lado derecho, el mapa de RMS de fondo muestra cómo el software divide la imagen en celdas para calcular la estimación local del ruido de fondo. Las áreas más brillantes indican regiones con mayor variabilidad en los niveles de intensidad, posiblemente causadas por fuentes astronómicas, ruido instrumental o variaciones en la respuesta del detector. Por el contrario, las zonas más oscuras representan una menor variabilidad, sugiriendo un fondo más uniforme. Este mapa es fundamental para establecer umbrales de detección adecuados en la imagen, permitiendo ajustar la sensibilidad de detección de objetos astronómicos en función de la variabilidad local del ruido de fondo.

Detección de objetos en imágenes astronómicas con SExtractor

La fase de detección en el proceso de análisis de imágenes astronómicas con SExtractor inicia con un procedimiento crítico: la identificación de agrupaciones de píxeles que exhiben intensidades superiores a un umbral definido, el cual se determina con base en un mapa de fondo y la relación señal a ruido (S/N) inherente a la imagen. En esta etapa se distinguen las fuentes celestes potenciales del ruido de fondo y otros objetos espúrios.

La metodología empleada para establecer el umbral de detección involucra una evaluación precisa del nivel de ruido en la imagen, lo cual se logra mediante la estimación estadística del fondo y su variabilidad. SExtractor utiliza un tratamiento para modelar el fondo, considerando tanto las fluctuaciones globales como locales, lo que permite ajustar el umbral de detección de manera dinámica a través de la imagen. Esta adaptabilidad es determinante para manejar las variaciones en la densidad de fuentes y en las condiciones de observación.

Una vez establecido el umbral, SExtractor busca píxeles que no solo superen este límite, sino que también estén conectados espacialmente, formando agrupaciones coherentes. Esta conectividad es esencial para identificar fuentes celestes como objetos discretos dentro del mosaico de píxeles de la imagen. La conectividad se evalúa a menudo en términos de vecindad directa (píxeles adyacentes) o vecindad indirecta (píxeles que comparten esquinas), con el software ofreciendo configuraciones para ajustar estos criterios según las necesidades específicas del análisis. La detección de agrupaciones de píxeles también implica el manejo de múltiples escalas de detección, permitiendo que SExtractor identifique objetos de variado tamaño y brillo.

Cuando las agrupaciones de píxeles son identificadas, SExtractor procede a aplicar algoritmos de umbralización adicionales para refinar estas detecciones. Esto puede incluir la revisión de la uniformidad de la señal dentro de las agrupaciones, la comparación con perfiles de intensidad esperados para fuentes celestes y la eliminación de candidatos que no cumplen con criterios de significancia estadística.

Para el campo objetivo de esta tesis, se seleccionó DETECT_MINAREA con un valor de 5 para asegurar la detección de fuentes auténticas y minimizar el ruido

y falsas detecciones. Inicialmente se evaluó un rango entre 3 y 5; sin embargo, un umbral de 3 permitía la inclusión de falsos positivos al requerir solo tres píxeles consecutivos sobre el umbral. Por tanto, se optó por un valor de 5, mejorando significativamente la fiabilidad de las fuentes identificadas, en este caso un 8.7%.

Umbralización y refinamiento de la detección

El proceso de umbralización en SExtractor es crítico en la verificación de la calidad de las detecciones de objetos en imágenes astronómicas. Durante esta fase, se implementan criterios más rigurosos que en la detección inicial para confirmar que las agrupaciones de píxeles identificadas correspondan efectivamente a fuentes astronómicas legítimas. Este mecanismo avanzado de filtrado es esencial para minimizar el riesgo de falsas detecciones, que pueden ser provocadas por una variedad de remanentes intrínsecos a la imagen, como píxeles calientes o fluctuaciones aleatorias del fondo. Para la imagen de campo del FALCON-ULS se activó la opción CLEAN que previene falsas detecciones, crucial para análisis astrométricos precisos. Por otro lado la elección de DETECT_THRESH y ANALYSIS_THRESH en 1.5 sigmas se utilizó para equilibrar la detección de fuentes verdaderas contra el ruido de fondo. Estos umbrales determinan la sensibilidad de la detección, especificando el nivel mínimo de señal necesaria sobre el ruido de fondo para que un objeto sea considerado como detectado. Al establecer estos umbrales en 1.5 veces la desviación estándar del ruido de fondo, se optimiza la detección minimizando falsos positivos. Este enfoque es particularmente efectivo en campos estelares no extremadamente poblados, donde la precisión en la detección de fuentes aisladas es fundamental para análisis astrométricos de alta fiabilidad.

Además, SExtractor aplica un proceso de filtrado espacial mediante el uso de un kernel de convolución, el cual está diseñado para realzar las características morfológicas típicas de las fuentes astronómicas. Esta etapa permite diferenciar entre señales genuinas de objetos celestes y patrones falsos de ruido o remanentes. La selección adecuada del kernel de convolución, que puede variar desde perfiles gaussianos hasta plantillas específicas para galaxias o estrellas, es fundamental para optimizar la capacidad de detección del software en diferentes contextos astronómicos.

El refinamiento de la detección también implica la revisión de características

morfológicas de las agrupaciones de píxeles, como la compacidad, elongación, y la simetría, para identificar aquellas que se ajustan a patrones esperados de fuentes astronómicas. Esta revisión morfológica ayuda a filtrar objetos que, aunque superen el umbral de S/N, no concuerdan con las características físicas esperadas de objetos celestes.

Finalmente, se realiza una comparación con modelos de dispersión de luz para evaluar si la distribución de intensidad de los píxeles dentro de una agrupación concuerda con lo esperado para una fuente astronómica. Esta comparativa permite a SExtractor discernir entre fuentes legítimas y anomalías a través de su forma o distribución de intensidad.

Separación de objetos.

En entornos de observación astronómica donde la densidad estelar es significativamente alta, el fenómeno de superposición de estrellas se convierte en un desafío común. La implementación de técnicas avanzadas de deblending es crucial para diferenciar estrellas adyacentes y otras fuentes celestes que el algoritmo de detección podría erróneamente identificar como una única entidad. SExtractor enfrenta esta complejidad mediante un sofisticado algoritmo de deblending, que se fundamenta en el análisis detallado de múltiples isofotas para discernir entre objetos superpuestos. Este enfoque permite una segmentación precisa del perfil de luminosidad de cada objeto, adaptando la profundidad del análisis según el número de niveles de intensidad en los que se divide la distribución lumínica de los objetos.

Durante este proceso, SExtractor evalúa si un conjunto de píxeles contiguos que superan un umbral específico de señal sobre ruido representa uno o múltiples objetos. Este análisis se beneficia de la información derivada de múltiples isofotas, generando un “modelo” de distribución lumínica para cada objeto potencial. Este modelo, representado en una estructura de datos tipo árbol, captura con precisión la complejidad y la gradación de la luz emitida por cada objeto, facilitando así una separación detallada y precisa de objetos que se encuentran físicamente próximos entre sí.

La importancia de este paso es fundamental, ya que una separación ineficaz puede llevar a la fragmentación incorrecta de galaxias extendidas o la fusión inde-

bida de estrellas cercanas en una única detección, distorsionando la interpretación de los datos astronómicos. Por ello, en el desarrollo de esta investigación, se ha optado por configurar SExtractor con un nivel de detalle que alcanza hasta 64 niveles de intensidad y un contraste mínimo de 0.002 lo que sugiere una sensibilidad a diferencias muy sutiles en la intensidad de los píxeles, útil en imágenes donde las fuentes varían levemente en brillo y podrían fusionarse fácilmente en un análisis menos detallado. Esta configuración permite una discriminación óptima de objetos potencialmente superpuestos, asegurando la precisión en la identificación y catalogación de fuentes en campos estelares semi poblados.

Para esta etapa se probaron niveles de intensidad de 32 y contraste 0.005, teniendo en cuenta la densidad de fuentes de los datos. Se realizaron pruebas de validación en un proceso de prueba y error, ajustando los parámetros y evaluando su efecto en las imágenes de prueba. Se buscó un equilibrio donde el número de falsos positivos (fuentes detectadas erróneamente) y falsos negativos (fuentes reales no detectadas) sea óptimo (TopCat).

Para asegurar una detección efectiva y la separación de fuentes superpuestas en análisis astrométricos, se emplean los parámetros `DEBLEND_NTHRESH` y `DEBLEND_MINCONT`. `DEBLEND_NTHRESH` determina el número de niveles de intensidad utilizados para descomponer las fuentes superpuestas, con un valor alto que permite una descomposición más detallada. `DEBLEND_MINCONT` establece el contraste mínimo necesario entre las fuentes para ser consideradas separadas.

Extracción y caracterización inicial de objetos

La fase de extracción marca el fin del proceso de detección en SExtractor, transicionando de la identificación de fuentes celestes a su catalogación y caracterización preliminar. Este paso no solo implica la enumeración de las fuentes detectadas sino también la asignación de un conjunto de propiedades iniciales que servirán de base para análisis más profundos.

SExtractor procede a extraer cada objeto detectado, aislando su señal del fondo y de fuentes adyacentes (ver Figura 5.3). Este aislamiento es crucial para garantizar mediciones precisas y evitar la contaminación cruzada entre objetos próximos. La extracción se basa en la segmentación de la imagen, donde cada píxel es asignado a un objeto específico o al fondo, utilizando los umbrales de

detección y los contornos definidos en las etapas previas.

Una vez extraídos, SExtractor calcula una serie de parámetros fundamentales para cada objeto. Estos incluyen medidas fotométricas básicas como el flujo total y el máximo de flujo, además de parámetros morfológicos que describen la forma y tamaño del objeto, tales como los semiejes mayores y menores, la orientación, y el índice de elongación. Estas medidas preliminares son determinantes para la clasificación inicial de las fuentes y su análisis morfométrico detallado.

La caracterización morfométrica avanza con el análisis de la dispersión de flujos dentro de cada agrupación de píxeles, permitiendo a SExtractor determinar la estructura interna de los objetos. Esto incluye la identificación de centros de luminosidad, que se calculan a partir de la distribución de intensidades de luz, ofreciendo un punto de referencia para medir la posición y para futuras comparaciones astrométricas.

Estos centros, junto con los semiejes y otros parámetros morfométricos, son cruciales para el estudio detallado de las propiedades físicas de las fuentes astronómicas. Facilitan la realización de análisis astrométricos y fotométricos posteriores, permitiendo, por ejemplo, la determinación de distancias y el cálculo de magnitudes.

Determinación del centro de los objetos con SExtractor

En el análisis de imágenes astronómicas realizado con SExtractor, la determinación precisa del centro de los objetos es el paso que sigue a la identificación y aislamiento de fuentes celestes del fondo y de las fuentes adyacentes. Esta etapa es esencial para este trabajo, ya que una precisa localización de los centros impacta directamente en la calidad del trabajo astrométrico, ya que desde los centros de los objetos realizamos las comparaciones con las estrellas de referencia de los catálogos.

SExtractor ofrece un abanico de técnicas para la detección y determinación de centros, desde métodos simples basados en intensidades de peaks, como la detección de medidas isofotales (*peak finding by pixels*), hasta enfoques más sofisticados que calculan el baricentro o aplican un método windowed para mitigar las limitaciones de las mediciones isofotales. Cada una de estas técnicas tiene aplicaciones específicas, dependiendo de las características de la fuente y de la calidad de la

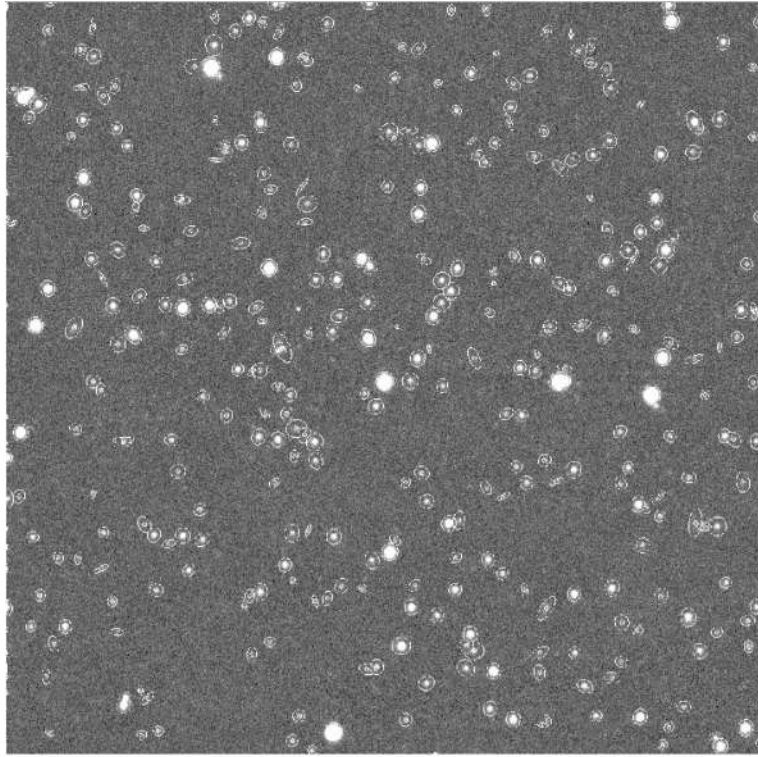


Figura 5.3: Imagen del campo estelar capturado por la unidad FALCON-ULS, mostrando las aperturas de detección empleadas para el análisis fotométrico. Las circunferencias representan las aperturas utilizadas para aislar la luz de las estrellas y llevar a cabo mediciones precisas de su flujo. Esta técnica permite minimizar la contaminación de la luz de fondo y de las estrellas adyacentes, facilitando así una cuantificación más exacta de las intensidades estelares y contribuyendo a la precisión de las mediciones isofotales.

imagen.

La selección de los parámetros de detección, la adecuada estimación del fondo, y la exploración de las combinaciones de filtros de convolución en el software son etapas preliminares fundamentales que aseguran la discriminación efectiva entre fuentes celestes genuinas y espurias. Este proceso mejora la confiabilidad de los datos astronómicos resultantes y facilita un análisis detallado y preciso de las imágenes astronómicas.

La técnica de detección por baricentro, que calcula el centro de gravedad de la distribución de luz alrededor de cada píxel, es particularmente útil para objetos con formas irregulares o distribuciones de luz no uniformes. Esta metodología permite una localización precisa del núcleo de fuentes difusas o extendidas, tales como nebulosas o galaxias.

Por otro lado, el método windowed, que implica la aplicación de una ventana móvil o “kernel” sobre la imagen, es efectivo para suavizar las variaciones locales de intensidad y facilitar la detección de objetos bajo condiciones de fondo fluctuante o ruidoso. Esta técnica mejora la detección de objetos débiles o difusos, al aplicar un filtro gaussiano que se adapta a las características específicas de cada objeto, optimizando así la sensibilidad de detección frente al ruido.

En el corazón del enfoque windowed yace la geometría del kernel utilizado, el cual es típicamente gaussiano. La elección de una ventana gaussiana circular para integrar los valores de los píxeles refleja una consideración cuidadosa de las propiedades estadísticas de la luz distribuida por las fuentes astronómicas. Esta geometría se selecciona por su capacidad para ponderar los píxeles cercanos al centro de la fuente más fuertemente que aquellos más lejanos, reflejando la típica disminución de intensidad de la luz desde el núcleo hacia los bordes de un objeto astronómico. La función gaussiana se adapta individualmente a cada objeto detectado, donde el FWHM (Full Width at Half Maximum) gaussiano se ajusta para igualar el diámetro del disco que contiene la mitad del flujo del objeto, conocido como d_{50} .

La ventaja de usar coordenadas windowed `XWIN_IMAGE`, `YWIN_IMAGE` radica en su capacidad para ofrecer una estimación robusta y precisa de la posición de las fuentes bajo condiciones adversas, como imágenes con bajo número de cuentas o en presencia de gradientes de fondo.

La documentación de `SExtractor` especifica las ecuaciones matemáticas utilizadas para calcular estas coordenadas windowed, empleando un método iterativo que integra los píxeles, dentro de una ventana centrada en el máximo de intensidad.

Esta integración dentro de una ventana gaussiana permite una reducción efectiva del ruido y una mejora en la precisión de la localización de los centros de los objetos, al ponderar estadísticamente los píxeles en función de su probabilidad de contribuir a la señal real de la fuente. Este proceso es esencial para tareas como el cálculo de desplazamientos astrométricos, la correlación de fuentes entre diferentes imágenes, y el análisis detallado de la morfología y estructura de las fuentes astronómicas.

Las siguientes ecuaciones definen el cálculo iterativo del centroide ponderado en una ventana, donde t denota el número de iteración actual, I_i es la intensidad

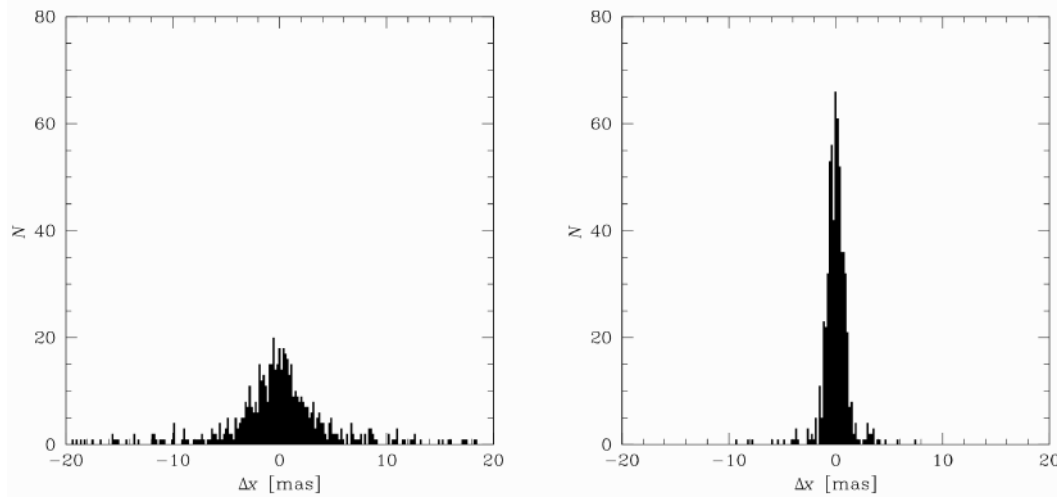


Figura 5.4: Comparación entre los residuos de medición del centroide isofotal y de ventana en imágenes simuladas con un ruido de fondo limitado. En el lado izquierdo se muestra el histograma de la diferencia entre la coordenada X_IMAGE y el verdadero centroide en el eje x , mientras que en el lado derecho se presenta el histograma de la diferencia entre la coordenada X_WIN_IMAGE y el centroide verdadero en el eje x .

del píxel i , (x_i, y_i) son las coordenadas del píxel i , $r_{\max}$ es el radio máximo de la ventana alrededor del centroide para la ponderación, y s_{WIN} es un parámetro relacionado con la dispersión de la PSF (ver Figura 5.4).

Por otro lado, la documentación aclara que este método, aunque más lento, es preferible por su precisión, especialmente en objetos aislados con perfiles similares a una Gaussiana y es casi tan preciso como el ajuste de PSF.

1. **Iterative Process:** El proceso para calcular las coordenadas X_{WIN} e Y_{WIN} es iterativo, lo que significa que la computación se refina sucesivamente hasta que la diferencia entre las coordenadas estimadas en dos iteraciones sucesivas es suficientemente pequeña (menor que 2×10^{-4} píxeles).
2. **Initial Coordinates:** La iteración comienza con las coordenadas iniciales $X_{\text{WIN}}^{(0)}$ y $Y_{\text{WIN}}^{(0)}$, que corresponden a una estimación básica del centroide.
3. **Weighted Mean Position:** Las ecuaciones 5.1 y 5.2 actualizan las coordenadas X_{WIN} y Y_{WIN} en cada iteración. La nueva posición se calcula como un promedio ponderado de las posiciones de los píxeles dentro de una ventana alrededor de la posición inicial, donde el peso de cada píxel decrece exponencialmente con la distancia al centroide actual. Esto es, en esencia, un promedio ponderado localizado.

4. **Weight Function:** La función de peso $w_i^{(t)}$ para la iteración t se define en la ecuación 5.3. Depende de la distancia al cuadrado de cada píxel al centroide actual dividido por un parámetro que controla la dispersión de la ponderación, s_{WIN} .
5. **Distance r_i :** La distancia r_i en la ecuación 5.4 es la distancia euclidiana desde un píxel específico con coordenadas (x_i, y_i) al centroide actual.
6. **Window Size:** s_{WIN} es un parámetro que determina el tamaño de la ventana de ponderación y se define como una fracción del tamaño de la dispersión del punto (PSF, por sus siglas en inglés).

$$X_{WIN}^{(t+1)} = X_{WIN}^{(t)} + 2 \frac{\sum_{r_i^{(t)} < r_{max}} w_i^{(t)} I_i (x_i - X_{WIN}^{(t)})}{\sum_{r_i^{(t)} < r_{max}} w_i^{(t)} I_i} \quad (5.1)$$

$$Y_{WIN}^{(t+1)} = Y_{WIN}^{(t)} + 2 \frac{\sum_{r_i^{(t)} < r_{max}} w_i^{(t)} I_i (y_i - Y_{WIN}^{(t)})}{\sum_{r_i^{(t)} < r_{max}} w_i^{(t)} I_i} \quad (5.2)$$

$$w_i^{(t)} = \exp \left(-\frac{r_i^{(t)2}}{2s_{WIN}^2} \right) \quad (5.3)$$

$$r_i^{(t)} = \sqrt{(x_i - X_{WIN}^{(t)})^2 + (y_i - Y_{WIN}^{(t)})^2} \quad (5.4)$$

Con el objetivo de garantizar una detección precisa, se ha llevado a cabo un análisis comparativo entre tres métricas de detección: XY peak, XY baricentro y XY windowed. Esta metodología permite afinar la detección de objetos astronómicos, optimizando la diferenciación entre fuentes genuinas y ruido de fondo, lo cual es esencial para la precisión y fiabilidad de los análisis astrométricos subsiguientes.

Pruebas de detección.

En el presente trabajo se aborda este tema activamente debido a que en la literatura astrométrica si bien se pondera un uso bastante frecuente del software SExtractor, su modo de empleo no queda explícito y parece mas bien una *blackbox*, dejando cabos sueltos sujetos al criterio del autor respecto al uso del software de detección y extracción. Por este motivo se quiso transparentar en las secciones anteriores las características más importantes y cuál fue específicamente el trabajo detrás de la extracción y los parámetros que fueron ajustados en el archivo de configuración.

Un aspecto de suma importancia que fue abordado aquí, es que antes de la detección de píxeles por encima de un umbral específico, SExtractor (Bertin & Arnouts (1996)) ofrece la opción de aplicar un filtro de convolución, lo que es crucial para minimizar la influencia del ruido en la detección de objetos. Estos filtros, que a menudo se asemejan a una Point Spread Function (PSF), son especialmente útiles ya que los objetos en la imagen raramente presentan una resolución menor que una PSF. Convolucionar la imagen con una función similar a la PSF es una estrategia eficaz para preservar la señal de los objetos, como se señala en investigaciones previas (Irwin (1985)). SExtractor permite el uso de diversos filtros de convolución, incluidos el Gaussiano, Mexican hat, Tophat y funciones de bloque en varios tamaños, dependiendo de las características de la imagen y los objetos de estudio.

Los filtros de convolución desempeñan un papel fundamental en el procesamiento y análisis de imágenes. Estos filtros son herramientas matemáticas utilizadas para resaltar características específicas mediante la aplicación de operaciones de convolución sobre los píxeles de una imagen (ver Figura 5.5). La convolución implica la combinación de la imagen original con un núcleo o máscara, también conocido como kernel, que se desplaza sobre la imagen, multiplicando los valores de los píxeles vecinos y sumándolos para obtener el valor de salida en cada posición.

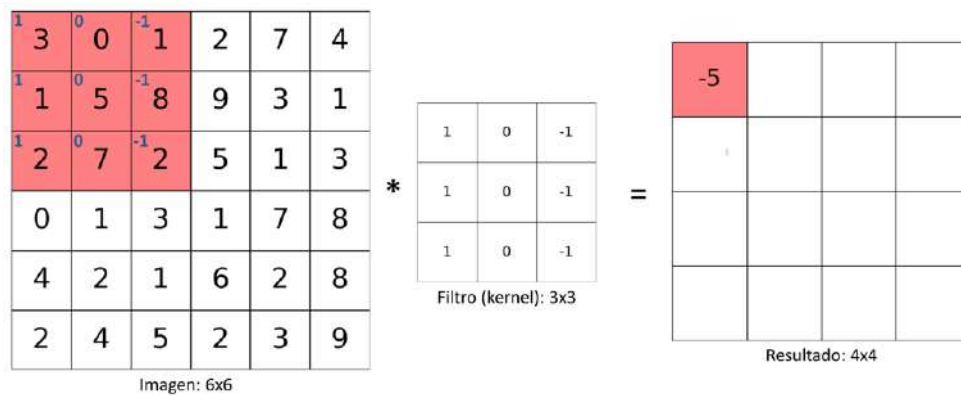


Figura 5.5: Proceso de convolución ilustrado utilizando un arreglo de imagen de 6×6 . A la izquierda, se muestra la matriz de la imagen con la superposición del kernel de convolución (3×3), destacado en rojo, donde los valores en azul dentro del kernel representan los pesos aplicados durante la convolución. A la derecha, se muestra en rojo el valor resultante de aplicar esta primera operación de convolución, generando un nuevo elemento en la matriz resultante de 4×4 . Este método es esencial en el procesamiento digital de imágenes en astrometría, ya que permite enfatizar o suavizar características en los datos astronómicos.

En el contexto de la astronomía, los filtros de convolución se utilizan para una variedad de propósitos, que van desde la mejora de la resolución espacial y la eliminación de defectos de imagen hasta la detección y caracterización de estructuras celestes. Por ejemplo, se pueden aplicar filtros de convolución para suavizar una imagen y eliminar el ruido de fondo, lo que facilita la detección de objetos astronómicos débiles.

En este trabajo la detección y extracción de objetos es una etapa de suma importancia para lograr una buena reducción astrométrica, debido principalmente a que un reconocimiento tanto del centro de los objetos, como su extracción para una posterior correlación con el catálogo de referencia ayuda positivamente los pasos subsiguientes del algoritmo de reducción.

Comenzando con el filtro Gaussiano, este método es ampliamente reconocido por su capacidad para suavizar imágenes, lo que resulta especialmente beneficioso en la detección de objetos extensos y tenues, como las galaxias. Además de su efecto de suavizado, el filtro Gaussiano mejora la detección de estrellas al alinear su señal de manera más precisa con la PSF esperada, facilitando así la distinción entre fuentes puntuales y el ruido de fondo.

Los filtros de convolución presentes en SExtractor, como el Gaussiano con índice 2.0 y una matriz de 3x3, se caracterizan específicamente por un parámetro sigma. Un sigma de 2.0 indica una dispersión moderada, lo que proporciona un nivel de suavizado efectivo para reducir el ruido sin desdibujar excesivamente los detalles de los objetos. La función Gaussiana pondera los píxeles circundantes según su distancia al píxel central, otorgando mayor peso a los píxeles más cercanos.

El segundo número, en este caso el 3x3, se refiere al tamaño de la matriz (kernel) del filtro. Esto significa que el filtro considera los píxeles inmediatamente adyacentes al píxel que está siendo procesado, un total de 9 píxeles incluyendo el central. El tamaño del kernel afecta directamente al área de influencia del filtro en la imagen; un kernel de 3x3 ofrece un equilibrio entre la localización precisa de las características y el nivel de suavizado aplicado.

El filtro Mexican Hat, también conocido como operador Laplaciano del Gaussiano (LoG), es reconocido por su habilidad para resaltar objetos contra fondos variados y detectar bordes y pequeños detalles en imágenes. Esta capacidad lo

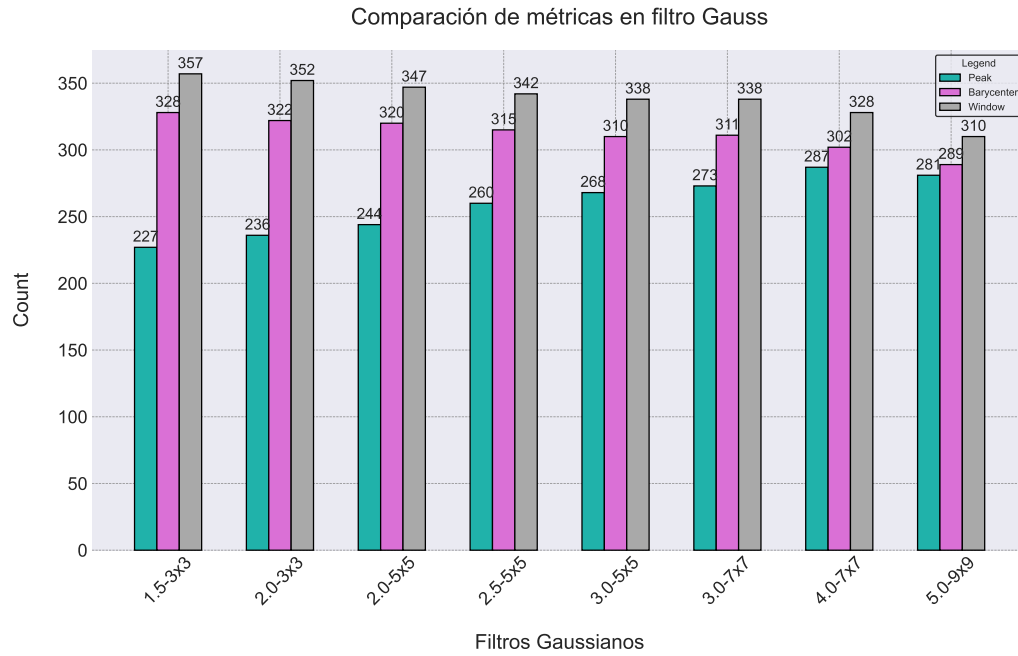


Figura 5.6: Comparación de métricas de detección a través de filtros Gauss.

hace útil en campos estelares densos, donde se enfrenta el desafío común de la contaminación por estrellas de fondo. Al enfocarse en regiones de cambio rápido en la intensidad de la luz, el filtro mejora la identificación de objetos de interés y facilita la detección de características pequeñas como estrellas o galaxias distantes.

El filtro Tophat se distingue en el procesamiento de imágenes astronómicas por su eficacia al resaltar objetos cuyo tamaño es comparable al del kernel, típicamente de 3x3 píxeles. A diferencia de los filtros Gaussianos o Mexican Hat, el Tophat se define por su configuración específica, sin emplear un parámetro de sigma, optando en su lugar por una configuración de dilatación y erosión morfológica, o viceversa. Esta técnica es valiosa para detectar y resaltar objetos de tamaño pequeño a moderado, proporcionando un contraste efectivo contra un fondo medianamente uniforme sin sacrificar detalles esenciales de la imagen. El filtro Tophat es una herramienta crucial para la detección precisa de objetos de tamaño definido, mejorando el análisis de fuentes astronómicas en imágenes complejas gracias a su capacidad para enfocarse en objetos específicos y suavizar el fondo circundante.

La elección del filtro óptimo depende de varios factores, incluyendo el nivel de

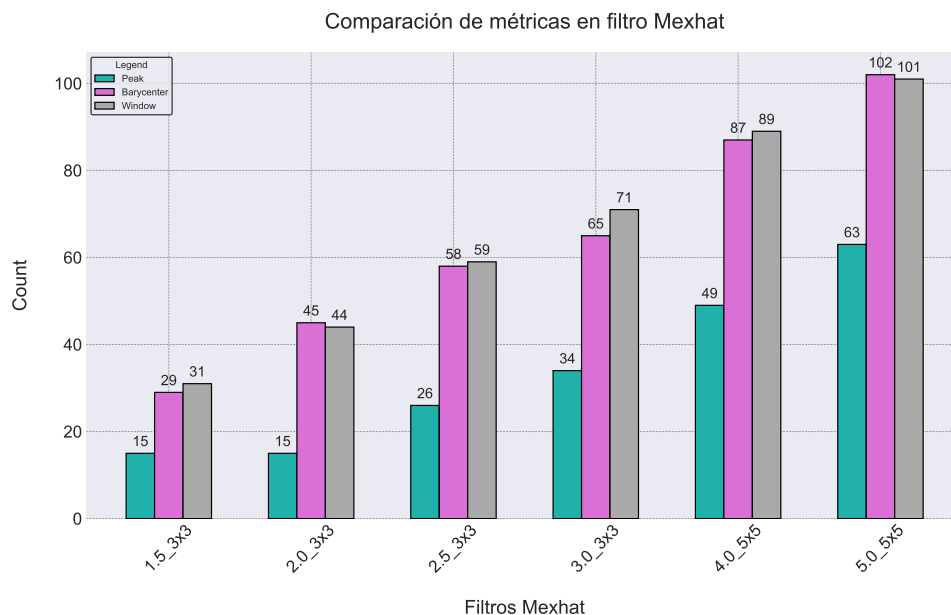


Figura 5.7: Comparación de métricas de detección a través de filtros Mexhat.

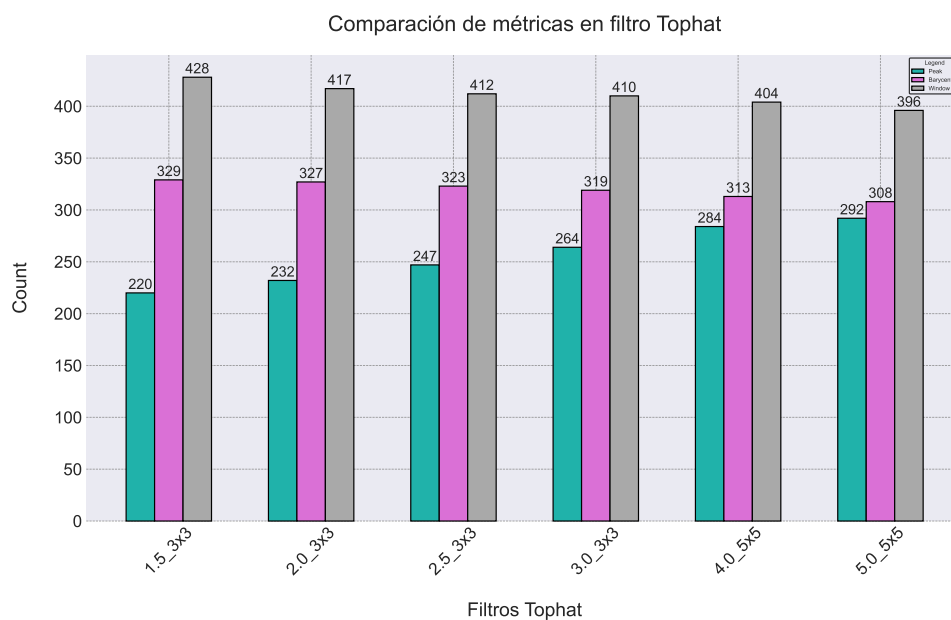


Figura 5.8: Comparación de métricas de detección a través de filtros Tophat.

ruido de fondo, la densidad del campo estelar y la resolución de la imagen. Sin embargo, en general, el filtro Gaussiano es ampliamente preferido para mejorar la

detección de estrellas en una basta gama de condiciones observacionales, gracias a su versatilidad y eficacia.

Con esta premisa se realizó un análisis sobre las mejores adaptaciones del software para los datos astronómicos obtenidos de la unidad FALCON-ULS. Primeramente y sin ningún tipo de sesgos se comenzó a analizar la métrica de detección la cual está bien caracterizada en el manual de uso de SExtractor. Aunque todo nos llevaba a ejecutar el software utilizando la métrica de detección WINDOWED (XWIN, YWIN), se realizó una estadística comparando las 3 métricas de detección más usadas en astrometría y su comportamiento con 3 filtros de convolución diferentes, probando todas sus versiones (ver Figuras 5.6, 5.7, 5.8).

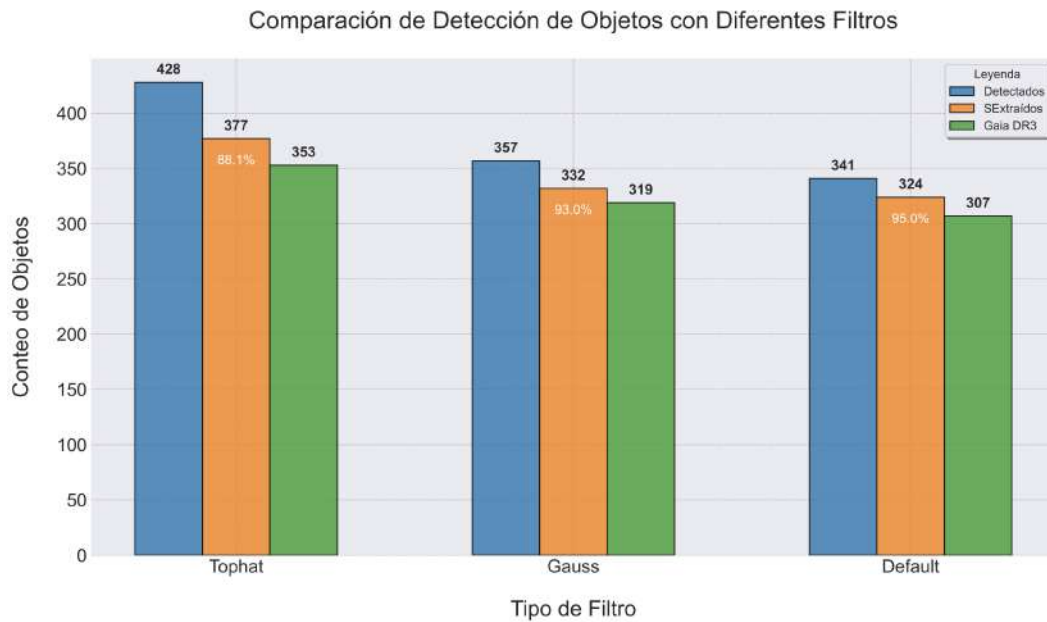


Figura 5.9: Comparación de filtros TopHat, Gauss, Default en relación a objetos detectados, extraídos y encontrados para el campo objetivo del telescopio FALCON-ULS. Los objetos representados por las barras azules corresponden a la detección de objetos usando SExtractor con el filtro correspondiente. Por otro lado, la barra naranja indica el número de objetos que logra extraer SExtractor con el filtro correspondiente. Finalmente la barra verde nos muestra la porción de objetos extraídos que presentan correspondencia con el catálogo Gaia DR3.

Aunque como se puede ver en la Figura 5.9 la razón de objetos detectados sobre extraídos es menor usando el filtro tophat con un 88.1 %, versus 93 % del filtro Gauss y el 95 % del filtro Default, los objetos que hacen match en el catalogo de referencia Gaia DR3 superan ampliamente a los demás utilizando el filtro TopHat.

Según lo evaluado, en este trabajo usamos la métrica para detección de centros correspondiente a Windowed, junto con el filtro de convolución TopHat conforme

a los análisis mostrados en los histogramas a través de esta sección, utilizando una función definida en una matriz de 3x3 píxeles.

Por una parte es importante mencionar que para este trabajo se hicieron pruebas de consistencia y repetibilidad correspondiente al calculo de los centroides con el filtro y la métrica mencionada. La prueba consistió en ejecutar SExtractor en dos exposiciones del mismo campo, pero tomadas con 3 minutos de diferencia entre ellas. La prueba de consistencia resulto en una tasa del 96.4 % de coincidencias entre los centros de los objetos de ambas imágenes, considerando un margen de error del 5 % entre las posiciones. Estos porcentajes pueden tener influencias tanto inherentes al hardware, como ambientales, por lo que se considera positivamente aceptable.

En segundo lugar como se puede ver en la Figura 5.10, el parámetro de detección windowed aplicado a los datos de FALCON-ULS, también afecta positivamente a la morfología en la tarea de detección. Por ejemplo, podemos parametrizar los valores de la elipticidad y elongación, los cuales se calculan simplemente a partir de los ejes mayor (A) y menor (B).

$$ELLIPTICITY = 1 - \frac{B}{A} = 1 - \frac{1}{ELONGATION}$$

Se puede notar que al usar la métrica XY Image la elipticidad presenta mayor dispersión con un RMS de 0.313, y un percentil 90 de 0.5, obteniendo un mayor de número de objetos extendidos, mientras que gracias a la ventana móvil de windowed los valores muestran que la morfología en los objetos detectados se comportan más como objetos puntuales alcanzando un RMS de 0.098, con un percentil 90 de 0.11. Esto impacta significativamente a la hora de realizar una búsqueda en catálogos de referencia como Gaia. Se ha demostrado que, para objetos aislados con perfiles de intensidad de tipo gaussiano, la precisión de las mediciones en ventana se acerca al límite teórico establecido por el ruido presente en la imagen. Este nivel de precisión superior hace que los parámetros de posición en ventana sea una opción preferida en una variedad de aplicaciones astronómicas.

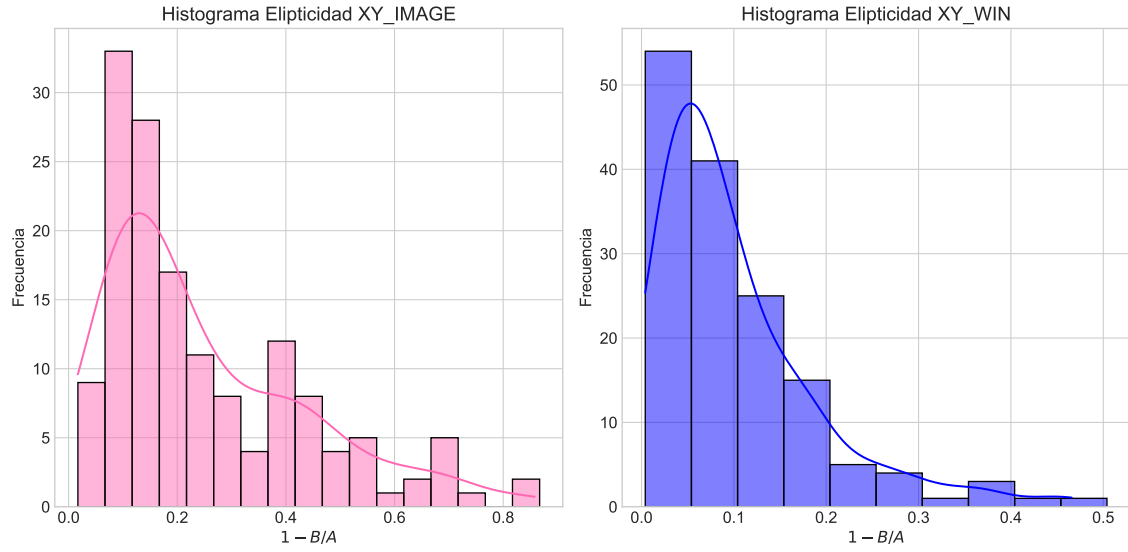


Figura 5.10: Comparativa de la distribución de elipticidad de objetos, calculada utilizando dos métricas diferentes de detección en SExtractor. A la izquierda, el histograma muestra la elipticidad calculada con el parámetro `X_IMAGE`, `Y_IMAGE`, mientras que a la derecha se muestra la elipticidad con el parámetro `X_WIN`, `Y_WIN`, que emplea un enfoque de ventana para mejorar la precisión. Se aprecia una tendencia a valores de elipticidad menores cuando se utiliza el parámetro `windowed`, lo que indica una mejora en la detección y caracterización de la forma de los objetos astronómicos. El eje horizontal representa la elipticidad definida como $1 - \frac{B}{A}$, donde B y A representan los semiejes menor y mayor de la elipse ajustada a la forma del objeto, respectivamente. La elipticidad menor reflejada en el histograma derecho sugiere una detección más precisa de objetos más redondos o menos alargados, resaltando cómo la elección del parámetro afecta el resultado final de la medición.

5.3. Astrometry.net - World Coordinate System

Después de someter las imágenes al software SExtractor, donde se extraen las fuentes y se conocen las posiciones en coordenadas del plano focal (expresadas en píxeles), corresponde resolver en el Sistema de Coordenadas Mundial (WCS, por sus siglas en inglés) a cada imagen.

Para esto usamos `astrometry.net` (Lang et al. 2010) conocido por su robustez y precisión en la resolución de coordenadas celestes a los objetos identificados en las imágenes. Es importante destacar que, en este contexto se evalúa una función para la coordenada de píxel, a partir de las variables que vamos a calcular al resolver el WCS. Esto nos permite, por ejemplo, calcular valores para fracciones de píxeles y no sólo para valores enteros de píxeles. Las coordenadas por ende se resuelven a cada píxel de la placa observada y no directamente a los objetos detectados.

Cabe resaltar que realizar el ejercicio de obtener las posiciones de las fuentes presentes en la placa no garantiza necesariamente la obtención de las posiciones reales de estos objetos. Esto se debe a las distorsiones atmosféricas y ópticas presentes en nuestro sistema. Por consiguiente, cobra relevancia el objetivo principal de este trabajo de tesis: abordar estas distorsiones para obtener mediciones más precisas y confiables de las posiciones de los objetos celestes en nuestras observaciones. Al obtener una grilla de coordenadas ecuatoriales sobre nuestra placa, fue posible utilizar la librería Astropy, en especial el módulo `astropy.coordinates` para obtener una lista con la transformación de nuestros objetos desde coordenadas en píxeles (x,y) del plano focal a coordenadas ecuatoriales (RA, DEC).

5.4. Catálogo Gaia y Crossmatch

Programa Gaia

La misión Gaia de la Agencia Espacial Europea, lanzada en diciembre de 2013, ha marcado un antes y después en la exploración astrofísica gracias a su capacidad para elaborar un detallado catálogo tridimensional de más de mil millones de estrellas de la Vía Láctea. Según Gaia Collaboration et al. (2023), Gaia no solo cartografía la posición estelar con una exactitud de microsegundos de arco, sino que también registra sus movimientos propios y características intrínsecas, como el brillo y el tipo espectral.

Este prodigioso telescopio espacial, equipado con dos espejos ópticos de 1.45 metros cada uno y una matriz de detectores CCD con una resolución de casi mil millones de píxeles, es capaz de detectar estrellas hasta magnitud 20, lo que corresponde a objetos extraordinariamente tenues (Short et al. (2005)). Gracias a su diseño óptico avanzado y su plataforma de rotación continua, Gaia realiza mediciones astrométricas con una precisión de hasta 7 microsegundos de arco para estrellas de magnitud 15, y de alrededor de 25 microsegundos de arco para aquellas de magnitud 20.

En su misión por capturar la cinemática estelar, Gaia no solo mide paralajes con una precisión promedio de 0.02 milisegundos de arco, lo que permite calcular distancias con un nivel de exactitud hasta ahora no alcanzado, sino que también registra las velocidades radiales de más de 150 millones de estrellas. La medición de paralajes y movimientos propios se traduce en la capacidad de discernir las

distancias y movimientos de las estrellas con un nivel de detalle excepcional.

Además, Gaia ofrece una medición sistemática y precisa de la posición angular de las estrellas, alcanzando una precisión de posición de 27 microsegundos de arco, lo que equivale a detectar el diámetro de una moneda en la superficie de la Luna. A lo largo de su vida operativa, Gaia realizará múltiples pasadas por cada objeto astronómico, mejorando la precisión y eliminando incertidumbres gracias a la redundancia y al cruce de datos, lo que facilita la identificación de errores sistemáticos y la mejora continua de la base de datos astrométrica.

El resultado de la misión Gaia se materializa en un extenso catálogo estelar en constante actualización, impulsando investigaciones astronómicas diversas y desempeñando el papel de referencia para el estudio de la astronomía posicional (Kılıç et al. (2018)). Esta contribución se ve respaldada por la capacidad sin precedentes de Gaia para superar los límites de la precisión astrométrica, con errores típicos en la posición de estrellas del orden de milisegundos de arco, representando así una mejora sustancial en comparación con misiones predecesoras. En particular, al contrastarse con la misión Hipparcos (Schuyler (1992)) que para estrellas de magnitud 9, la precisión astrométrica fue de aproximadamente 1 milisegundo de arco (mas), y en caso de estrellas más brillantes (hasta la magnitud 5-7), la precisión mejoró a alrededor de 0.6 mas. Gaia no solo amplía significativamente el número de objetos cartografiados, sino que también mejora la precisión, consolidándose como la nueva referencia en la cartografía estelar.

Es relevante subrayar que la elección de Gaia como referencia posicional-astrométrica para el desarrollo de este trabajo se fundamenta en su extraordinaria capacidad para lograr precisiones a nivel de milisegundos de arco, una hazaña que resulta prácticamente inalcanzable dentro de la atmósfera terrestre (Bouquillon et al. (2018)).

En la siguiente lista (ver Fig 5.11) se describen las incertidumbres o errores alcanzados por Gaia, y la razón por la cual elegimos este catálogo como referencia.

Crossmatch

Luego de detectar, extraer, y convertir los objetos de coordenadas de píxeles en el sensor a coordenadas ecuatoriales, es posible realizar una búsqueda corres-

Data product or source type	Typical uncertainty
Five-parameter astrometry (position & parallax)	0.02–0.04 mas at $G < 15$ 0.1 mas at $G = 17$ 0.7 mas at $G = 20$ 2 mas at $G = 21$
Five-parameter astrometry (proper motion)	0.07 mas yr ⁻¹ at $G < 15$ 0.2 mas yr ⁻¹ at $G = 17$ 1.2 mas yr ⁻¹ at $G = 20$ 3 mas yr ⁻¹ at $G = 21$
Two-parameter astrometry (position only)	1–4 mas
Systematic astrometric errors (averaged over the sky)	<0.1 mas
<i>Gaia</i> -CRF2 alignment with ICRF	0.02 mas at $G = 19$
<i>Gaia</i> -CRF2 rotation with respect to ICRF	<0.02 mas yr ⁻¹ at $G = 19$
<i>Gaia</i> -CRF2 alignment with ICRF	0.3 mas at $G < 12$
<i>Gaia</i> -CRF2 rotation with respect to ICRF	<0.15 mas yr ⁻¹ at $G < 12$
Mean G -band photometry	0.3 mmag at $G < 13$ 2 mmag at $G = 17$ 10 mmag at $G = 20$
Mean G_{BP} - and G_{RP} -band photometry	2 mmag at $G < 13$ 10 mmag at $G = 17$ 200 mmag at $G = 20$
Median radial velocity over 22 months	0.3 km s ⁻¹ at $G_{RVS} < 8$ 0.6 km s ⁻¹ at $G_{RVS} = 10$ 1.8 km s ⁻¹ at $G_{RVS} = 11.75$
Systematic radial velocity errors	<0.1 km s ⁻¹ at $G_{RVS} < 9$ 0.5 km s ⁻¹ at $G_{RVS} = 11.75$
Effective temperature T_{eff}	324 K
Extinction A_G	0.46 mag
Colour excess $E(G_{BP} - G_{RP})$	0.23 mag
Radius	10%
Luminosity	15%
Solar system object epoch astrometry	1 mas (in scan direction)

Figura 5.11: Resumen de las incertidumbres típicas asociadas a los productos de datos y parámetros astrométricos y fotométricos proporcionados por el segundo lanzamiento de datos de Gaia (Gaia DR2). Se detallan las precisiones alcanzadas en astrometría de cinco y dos parámetros, incluyendo la posición, paralaje y movimiento propio, junto con la alineación y rotación del marco de referencia Gaia-CRF2 con respecto al ICRF. También se presentan las incertidumbres sistemáticas en astrometría, fotometría de banda G , fotometría de banda GBP y GRP , y la velocidad radial media a lo largo de un periodo de 22 meses. Los errores sistemáticos en la velocidad radial, así como las incertidumbres asociadas a parámetros físicos estelares como la temperatura efectiva, extinción, exceso de color, radio y luminosidad, también están incluidos. Adicionalmente, se especifica la incertidumbre para la astrometría de objetos del sistema solar. Este conjunto de incertidumbres define los límites de precisión para estudios astrométricos y fotométricos basados en los datos de Gaia DR2, facilitando la evaluación crítica de la calidad y la aplicabilidad de los datos en investigaciones astronómicas.

pondiente a la posición de estos objetos a través de catálogos astronómicos. La herramienta principal usada como motor de búsqueda fue TopCat (Tool for OPe-

rations on Catalogues And Tables) (Taylor (2011)), la cual es una herramienta de software utilizada en astronomía para manipular, analizar y visualizar datos tabulares y catálogos astronómicos. Fue desarrollado por el Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge y está diseñado para facilitar la manipulación de grandes conjuntos de datos tabulares, comunes en la astronomía, de manera eficiente.

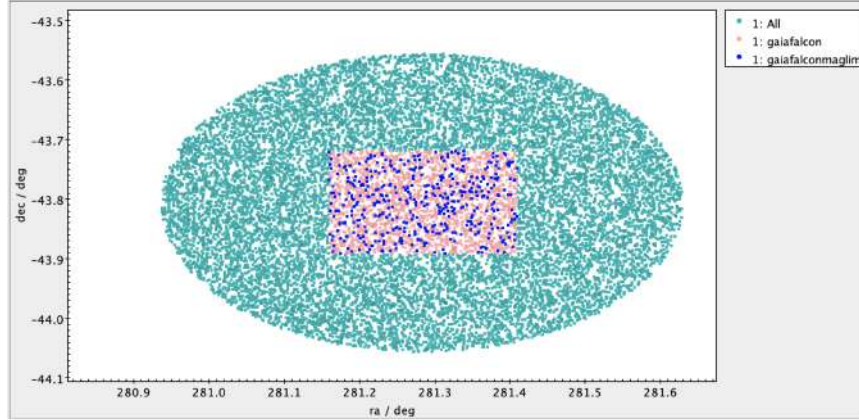


Figura 5.12: Campo de búsqueda de objetos en TopCat, en rosa se muestra el FoV de FALCON-ULS, en color azul aparecen los objetos concordantes con Gaia DR3 limitados a una magnitud $G < 18$.

La búsqueda se realiza utilizando la herramienta de entrecruzamiento de TopCat con el catálogo Gaia DR3 (ver Figura 5.12), empleando las coordenadas ecuatoriales de los objetos observados. Se establece una separación angular máxima de 1.5 segundos de arco para garantizar la inclusión de fuentes con mayores incertidumbres. Aunque Gaia DR3 proporciona posiciones astrométricas de alta precisión para estrellas brillantes, esta precisión disminuye para estrellas más débiles, lo que justifica este margen.

Por otro lado, los telescopios como FALCON enfrentan errores instrumentales y de medición, como seguimiento impreciso, alineación imperfecta y distorsiones ópticas, que pueden causar desviaciones de hasta unos pocos segundos de arco. La turbulencia atmosférica (seeing) también puede afectar la resolución efectiva del telescopio, que oscila entre $1.0''$ y $2.0''$ en el emplazamiento de FALCON-ULS.

La escala de píxel del telescopio FALCON es de $0.65''$ por píxel, cubriendo cada píxel una región del cielo de $0.65''$. Un umbral de $1.5''$ equivale aproximadamente a 2.3 píxeles, lo cual es adecuado para capturar desviaciones posicionales sin introducir demasiadas coincidencias falsas. Esto asegura que las correspondencias no

se vean comprometidas y que se incluyan adecuadamente las fuentes con mayores incertidumbres.

En el proceso, se identificaron 307 objetos observados por FALCON-ULS que corresponden a estrellas del catálogo Gaia DR3, con una distancia angular media de 0.9.^{entre sus centros}, aunque algunas pueden estar más separadas debido a factores mencionados. Este resultado confirma la eficacia del procedimiento y destaca la capacidad del telescopio para registrar datos precisos y relevantes en concordancia con catálogos astronómicos de referencia.

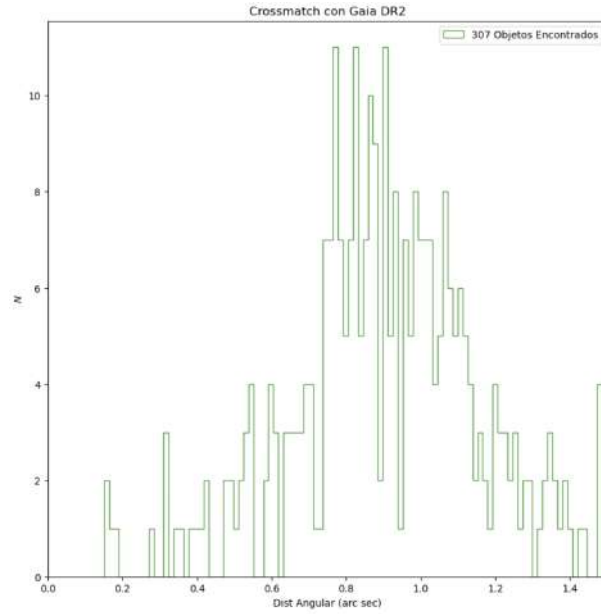


Figura 5.13: Distribución de distancias angulares resultantes del proceso de crossmatch entre los objetos detectados por el instrumento FALCON-ULS y las entradas del catálogo Gaia DR3. Se identificaron un total de 307 objetos coincidentes. La distancia angular se mide en segundos de arco y se observa en el gráfico que la mayoría de los emparejamientos se concentran por debajo de 0.90 segundos de arco, indicando una alta precisión en la correlación entre las observaciones de FALCON-ULS y los datos de Gaia DR3, lo que es crucial para la validación de candidatos a objetos de interés astronómico y la calibración de instrumentos.

5.5. Movimientos propios

Es importante destacar que al realizar un entrecruzamiento con un catálogo astronómico, no se puede asumir una comparación exacta con los objetos en el cielo. Existen diversos factores que contribuyen a las diferencias entre las posiciones de los objetos observados. Como ya se mencionó, los más significativos desde la

perspectiva de la placa observada son las contribuciones de la atmósfera terrestre, como la refracción y los errores ligados a la instrumentación astronómica.

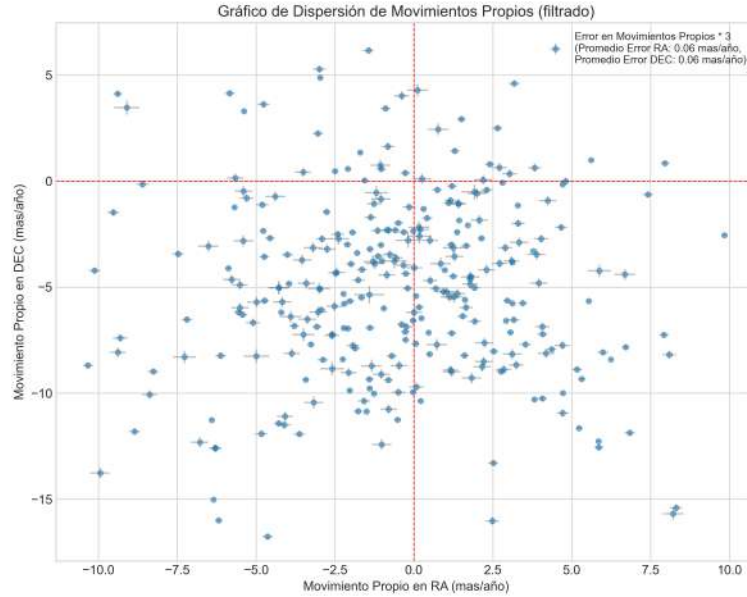


Figura 5.14: Correlación entre movimientos propios de las estrellas 'objetivo' en el catálogo Gaia DR3. El gráfico muestra el movimiento propio en ascensión recta (RA) y declinación (DEC) en milisegundos de arco por año (mas/año), con barras de error que representan la incertidumbre en estas mediciones. Los errores en RA de 0.0645 mas/año y DEC de 0.05 mas/año están amplificados por un factor de tres para una mejor visualización en el gráfico. La distribución de los puntos proporciona una visión general de la cinemática del campo estelar observado, y la consistencia de los errores de movimiento propio refleja la fiabilidad de las mediciones astrométricas obtenidas del catálogo Gaia DR3.

Sin embargo, en este ejercicio, hay otros factores importantes a considerar, como la fecha de observación de la placa (FALCON-ULS en este caso) en comparación con la época del catálogo. Nuestros datos se obtuvieron el 5 de agosto de 2022, mientras que Gaia DR3 presenta una época J2016 en sus catálogos. Esta diferencia temporal puede resultar en disparidades en las posiciones, especialmente en lo que respecta a los movimientos propios. Aunque estos movimientos son pequeños, para un trabajo con esta precisión siguen siendo un factor relevante a tener en cuenta.

Para mitigar esta potencial fuente de error, se ha implementado un código basado en la herramienta *astropy.coordinates.SkyCoord* de la biblioteca Astropy, la cual ajusta la fecha de los catálogos astronómicos al momento exacto de la observación. Es importante destacar que los movimientos propios en Ascensión

Recta (RA) han sido corregidos por el coseno de la declinación. Esto se debe a que RA es un ángulo que varía con la declinación y, por lo tanto, para obtener un desplazamiento lineal correcto en el plano del cielo, es necesario multiplicar los movimientos propios en RA por el coseno de la declinación. Este ajuste es necesario porque a diferentes declinaciones, un cambio en RA representa diferentes distancias físicas. Cerca del ecuador celeste ($\text{Dec} = 0^\circ$), el $\cos(\text{Dec})$ es aproximadamente 1, por lo que el ajuste es mínimo. Sin embargo, a declinaciones más altas, el $\cos(\text{Dec})$ disminuye, y el mismo cambio en RA corresponde a una distancia lineal menor en el cielo. Por otro lado, es imperativo realizar la conversión de datos, asegurándose de que las coordenadas celestes reflejen con precisión la ubicación geográfica y el tiempo exacto en que se capturaron las observaciones. Por esta razón, es prudente trabajar directamente con la información contenida en el encabezado (header) de las imágenes astronómicas, ya que este contiene metadatos cruciales que garantizan la precisión de la calibración y, por consiguiente, la validez de los resultados científicos derivados.

Cabe destacar que los valores de diferencia de la actualización por movimientos propios de las coordenadas a la fecha de observación no es de gran magnitud como se muestra en la Figura 5.15, y en los *boxplots* de la Figura 5.16 la transformación deja un promedio de diferencia en ascensión recta de 5.546 milisegundos de arco. Mientras que en declinación deja un promedio de diferencia entre coordenadas de 136.69 milisegundos de arco. La observación de que los valores de movimientos propios en ascensión recta (RA) son menores que en declinación (Dec) podría explicarse por varios factores. En el sistema de coordenadas ecuatoriales, la componente del movimiento propio en RA (μ_α) se multiplica por el coseno de la declinación ($\cos(\delta)$), reduciendo su valor aparente en comparación con la componente en Dec (μ_δ). En regiones de baja latitud galáctica, donde se encuentran la mayoría de los objetos observados, la distribución de velocidades estelares es anisotrópica, con estrellas que presentan movimientos predominantes a lo largo del plano galáctico, lo que puede también influir en la disparidad entre las componentes del movimiento propio. Además, la resolución limitada del telescopio, los efectos de la turbulencia atmosférica (seeing) y los errores instrumentales y de medición también podrían contribuir a estas diferencias.

Aunque los valores son pequeños, el no considerar su efecto podría llegar a introducir errores sistemáticos que influyan en el resultado final como se demuestra

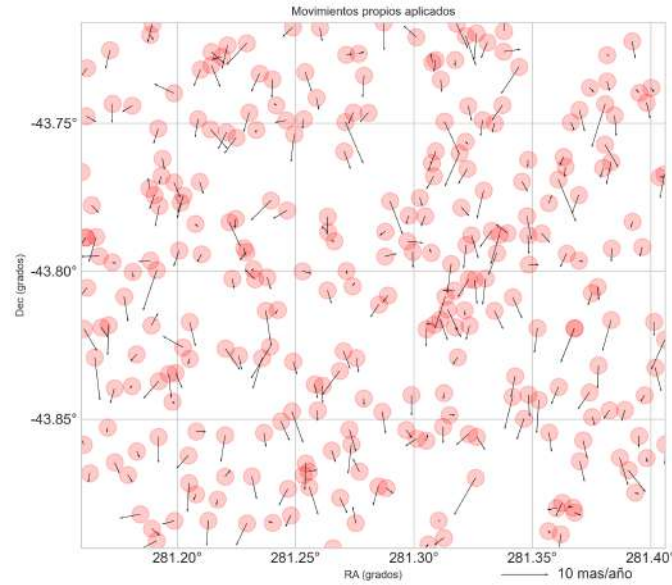


Figura 5.15: Movimientos propios aplicados a las coordenadas de las estrellas del catalogo Gaia DR2 actualizados a la fecha de observación 5 de Agosto del 2022. El marco de referencia se encuentra en grados para las estrellas del catálogo, sin embargo los movimientos propios se representan en mili arco segundo, y son considerablemente pequeños en comparación con la escala de la gráfica. Es por esto que la longitud de la flecha se establece específicamente para representar un movimiento propio de "10 milisegundos de arco por año" (10 mas/año). Dado que los movimientos propios en el gráfico están escalados por un factor de 250 para facilitar su visualización, la longitud de la flecha de referencia se calcula como $10/250$ de la unidad de escala del gráfico. Esto significa que una flecha de esta longitud en el gráfico corresponde a un movimiento propio de una estrella de 10 mas/año.

en Soubiran (1992).

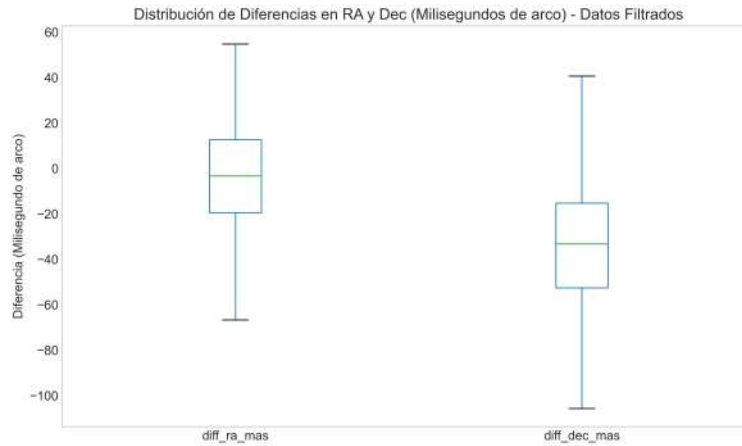


Figura 5.16: Análisis comparativo de la variabilidad en las mediciones de Ascensión Recta (RA) y Declinación (Dec) para las estrellas de interés observadas, en términos de milisegundos de arco, con respecto a los valores de referencia del catálogo Gaia DR3. Los *boxplots* muestran una síntesis visual robusta de las desviaciones, donde la línea central indica la mediana de la distribución; los límites superior e inferior de cada caja definen el primer y tercer cuartil, respectivamente; y las antenas se extienden hasta el valor máximo y mínimo dentro del rango aceptable, excluyendo los valores atípicos. Esta representación gráfica es crucial para discernir la precisión y consistencia de las mediciones astrométricas, así como para identificar posibles sesgos sistemáticos o errores. La depuración previa de los datos se realizó aplicando el método del rango intercuartílico para una selección más rigurosa de los datos, con el fin de asegurar la integridad y fiabilidad de los análisis posteriores.

5.6. Refracción atmosférica

En esta sección, se aborda el proceso de corrección de las posiciones observadas de los objetos celestes para tener en consideración en el modelo los efectos de la refracción atmosférica que se produjeron a la hora de la observación del campo objetivo.

El proceso de modelado de datos astrométricos inicia con la conversión de coordenadas ecuatoriales a altazimutales utilizando el paquete `astropy.coordinates` de Python. Esto permite ajustar las observaciones a la perspectiva del observador terrestre, integrando movimientos propios previamente calculados y considerando la posición exacta del observatorio (latitud y longitud) así como la hora y fecha específicas, lo cual es importante debido a la variabilidad azimutal por la rotación terrestre. La precisión en esta transformación es esencial, y Astropy facilita la tarea al manejar la precesión, la nutación y otros efectos celestes relevantes. Este paso es crítico para asegurar la exactitud en la localización de las estrellas y otros objetos celestes desde una perspectiva del observador.

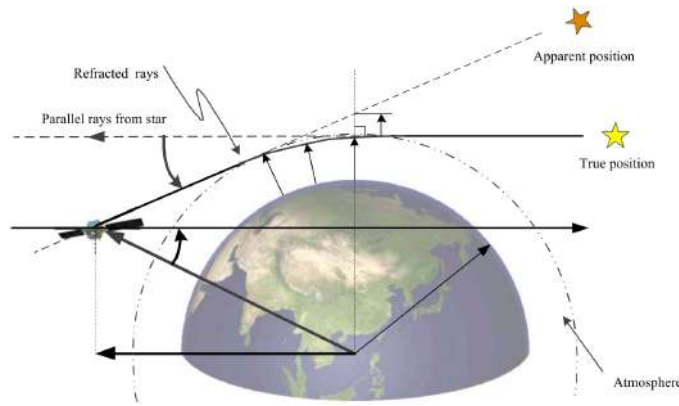


Figura 5.17: Representación esquemática de los efectos de la refracción atmosférica en el trabajo de Ning et al. (2013).

La razón principal detrás de esta conversión de coordenadas es abordar correcciones en las posiciones de los objetos del catálogo Gaia DR3 considerando la refracción atmosférica que ocurre al momento de la observación con FALCON-ULS. La refracción atmosférica es el fenómeno por el cual la posición aparente de un objeto astronómico se desvía de su posición real (ver Figura 5.17) debido a la curvatura de la luz a medida que pasa a través de las capas de la atmósfera terrestre. Este efecto es más pronunciado cerca del horizonte y disminuye con el aumento de la altitud. Por lo tanto, la idea general es agregar una incertidumbre a las posiciones de las estrellas debido a las condiciones atmosféricas en el lugar y hora de la observación para poder realizar una comparación adecuada con las posiciones de las estrellas observadas para este proyecto. El fenómeno de refracción impacta directamente en las posiciones de las estrellas observadas, tanto que puede agregar factores de error de algunos arco segundos. Por lo tanto, al transformar las coordenadas celestes al sistema AltAz, se facilita la corrección de la posición aparente de los objetos observados, teniendo de forma explícita la Altura de estos.

Un aspecto crucial de este proceso es la corrección por refracción diferencial. La refracción diferencial se refiere a la variación en la desviación de la luz para diferentes longitudes de onda debido a la dispersión atmosférica. Este fenómeno es especialmente importante en astrometría de alta precisión, donde incluso pequeñas diferencias en la refracción entre estrellas pueden introducir errores significativos en las mediciones de posición. Al considerar la refracción diferencial, podemos corregir las posiciones observadas para tener en cuenta estas diferencias, mejorando

la precisión global de nuestras mediciones.

Un detalle importante fue considerar el ángulo paraláctico en la transformación de coordenadas de ecuatoriales a AltAz, principalmente para corroborar una correcta transformación y un punto de referencia comparativo. El ángulo paraláctico indica la orientación del campo de visión en el cielo y afecta cómo se proyecta la esfera celeste en el plano de la imagen. El ángulo paraláctico se mide con respecto al meridiano local, que es una línea imaginaria que va del polo norte celeste al polo sur celeste y pasa por el cenit del observador. En otras palabras, el ángulo paraláctico es el ángulo entre el círculo horario de un objeto celeste (una línea que pasa por el objeto y los polos celestes) y el círculo vertical que pasa por el objeto (una línea que pasa por el objeto y el zenit del observador). En observaciones que requieren alta precisión o para corregir efectos de rotación, incorporar el cálculo del ángulo paraláctico puede mejorar significativamente la calidad de los datos. Astroplan proporciona herramientas para manejar estos cálculos, permitiendo una integración de este factor en análisis astronómicos y astrométricos. El ángulo paraláctico se calcula individualmente para cada estrella porque depende de la posición específica de cada estrella en el cielo en relación con la ubicación del observatorio en la Tierra. Este ángulo es importante para comprender cómo se orienta el objeto observado en relación con el horizonte local y es crucial para configuraciones de telescopios y correcciones de efectos atmosféricos, entre otros usos.

Esta etapa inicial del modelado es esencial para asegurar que las coordenadas resultantes reflejen con precisión las posiciones reales en el cielo. Esto posibilita una interpretación más exacta y confiable de los datos recolectados por el telescopio FALCON-ULS. Además, la consideración detallada de la refracción atmosférica, aunque a menudo pasa desapercibida en campos de visión reducidos como es nuestro caso (refracción diferencial casi despreciable), es necesaria para descartar cualquier posible fuente de error en los resultados finales. Considerando las características únicas y los objetivos específicos del proyecto FALCON, la refracción atmosférica adquiere un papel de vital importancia, especialmente en la ubicación del observatorio en Chile. En esta región, donde los satélites geoestacionarios orbitan a distancias cenitales considerablemente grandes, comprender y corregir los efectos de la refracción atmosférica se convierte en un aspecto crítico para garantizar la fiabilidad y precisión de nuestras mediciones.

El modelo de refracción es el implementado en el paquete Essential Routines for Fundamental Astronomy ERFA3. Es una biblioteca de software escrita en C que se ha desarrollado con el propósito de realizar cálculos astronómicos fundamentales con precisión y eficiencia. Su enfoque se basa en el “Standards of Fundamental Astronomy” (SOFA) (IAU SOFA Center (2014)), proporcionando una interfaz de programación en C para llevar a cabo diversas operaciones astronómicas esenciales. La biblioteca abarca una amplia variedad de características, destacando especialmente en transformaciones de coordenadas entre sistemas astronómicos como coordenadas ecuatoriales y eclípticas. Asimismo, facilita cálculos precisos de efemérides, ofreciendo información detallada sobre la posición de objetos celestes en momentos específicos. Actualmente es accesible a través de Python, pudiendo utilizar todas sus funciones con la sintaxis de este último lenguaje.

ERFA incluye funciones para calcular paralaje estelar y corregir los efectos de aberración en observaciones astronómicas, contribuyendo así a obtener resultados más precisos en la investigación y observación del cielo.

El modelo de refracción para Falcon-Uls es caracterizado por la siguiente ecuación:

$$dZ = A \tan Z + B \tan^3 Z$$

El modelo anterior sigue la pauta del trabajo de Damke-Calderon (2016). Es una fórmula empírica que representa cómo la luz cambia de dirección al pasar por la atmósfera de la Tierra. La tangente de la distancia zenital (Z) tiene una relación directa con el ángulo de incidencia de los rayos de luz en la atmósfera. A medida que el ángulo zenital aumenta, la tangente de este ángulo también aumenta, reflejando cómo la cantidad de refracción crece. La tangente de Z (donde Z es la distancia zenital refractada) aparece en estos modelos porque la refracción atmosférica es más pronunciada a ángulos bajos (cerca del horizonte), y la tangente es una función que aumenta rápidamente a medida que su argumento se acerca a 90 grados. Aunque el seno y el coseno también varían con el ángulo, su tasa de cambio no se adapta bien al comportamiento de la refracción atmosférica cerca del horizonte. La tangente, en cambio, tiene una tasa de cambio más pronunciada y refleja mejor el incremento dramático en la refracción cuando los objetos celestes están bajos en el cielo. Esto coincide con el comportamiento de la refracción cerca del horizonte, convirtiéndola en una función ideal para describir la variación de la

refracción en la atmósfera terrestre.

El término cúbico se añade para ajustar el modelo con mayor precisión a las observaciones reales, especialmente en los ángulos más extremos donde los efectos no lineales de la refracción se vuelven más significativos. La variable dZ es una corrección aditiva aplicada a Z para corregir la refracción de la distancia zenital. Las constantes A y B dependen de las condiciones atmosféricas durante la observación. En nuestro caso, la temperatura ambiente se mantuvo casi constante en 11°C y la humedad relativa promedió el 40 %.

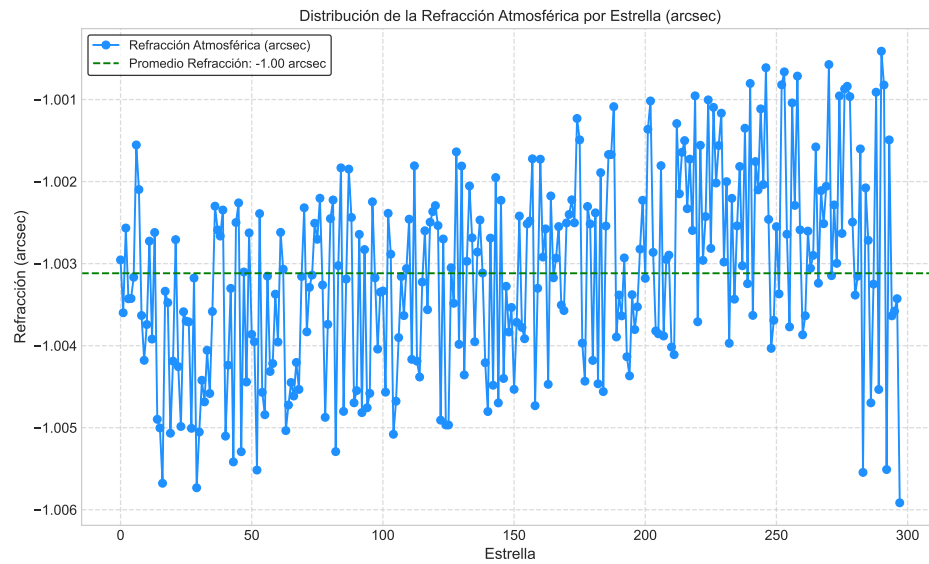


Figura 5.18: Se ilustra la cantidad de refracción atmosférica en segundos de arco para cada estrella observada, antes de aplicar cualquier corrección astrométrica. Cada punto azul en el gráfico representa la refracción experimentada por una estrella individual, destacando cómo esta refracción varía en función de las condiciones de observación específicas, como la altitud, la temperatura y la presión. La línea discontinua verde indica el promedio de la refracción atmosférica a lo largo del conjunto de datos, proporcionando una referencia para evaluar las desviaciones individuales. La refracción atmosférica tiene un impacto significativo en las posiciones observadas de las estrellas. El gráfico ofrece una visión de cómo dicha refracción afecta cada estrella en particular.

El modelo de refracción atmosférica que aplicamos a los datos observados se ve influenciado no solo por las condiciones atmosféricas generales, sino también por la longitud de onda efectiva utilizada durante la observación, que en nuestro caso corresponde a 6141 Ångströms, considerando el filtro r de Sloan.

Las constantes mencionadas anteriormente en el modelo de refracción, fue-

ron calculadas a través de rutinas de minimización correspondientes al software LMFIT (Non-Linear Least-Squares Minimization and Curve-Fitting for Python).

Las valores ajustados A y B, mostraron valores de $-0.07881078 \pm 9.6008 \times 10^{-6}$ (0.01 %) y $0.22559214 \pm 6.5408 \times 10^{-5}$ (0.03 %) respectivamente. Además, los estadísticos de ajuste resultaron en un chi cuadrado reducido de 1.1014×10^{-07} , y un R-squad de 0.99973762 lo cual indica que el modelo explica el 99.97 % de la variabilidad en los datos y se adecúa a las condiciones específicas de las observaciones. Este procedimiento aclara cómo se calcularon los valores de A y B, primero minimizando el modelo empírico y luego aplicando los parámetros ajustados para calcular las correcciones de refracción y promedios en los datos.

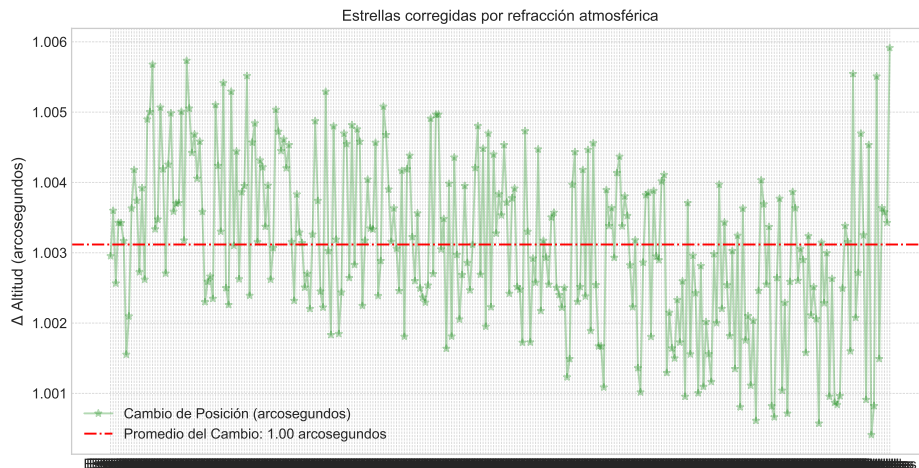


Figura 5.19: Estrellas Corregidas por Refracción Atmosférica: El esquema superior presenta el cambio en la posición de las estrellas, medido en segundos de arco, tras aplicar la corrección por refracción atmosférica. La Δ Altitud de cada estrella se muestra individualmente, permitiendo evaluar la efectividad de la corrección aplicada. Cada punto verde indica el cambio específico en la posición de una estrella, destacando cómo la corrección ha ajustado su posición en el plano focal. La línea discontinua roja representa el promedio de este cambio a lo largo del conjunto de datos estelares, proporcionando una referencia general sobre la magnitud de la corrección.

Enfocándonos en la refracción diferencial, un aspecto clave para nuestro análisis, surge debido a que las estrellas dentro del campo del CCD presentan distancias cenitales ligeramente diferentes. Este fenómeno implica que las estrellas experimentan una refracción en cantidades diferenciales con respecto a una refracción media, medida, por ejemplo, en el centro del campo observado.

Al aplicar el modelo a una altura de aproximadamente 76° , la refracción at-

mosférica en altitud se estima en alrededor de 1.0 segundos de arco (ver Figura 5.19). Sin embargo, la refracción diferencial promedio de las estrellas es casi despreciable en altitud resultando aproximadamente 0.94 milisegundos de arco (ver Fig 5.20). Aunque este valor puede parecer insignificante a primera vista, es esencial tener en cuenta que nuestro objetivo es mantener las incertidumbres individuales por debajo de 1.0 segundos de arco.

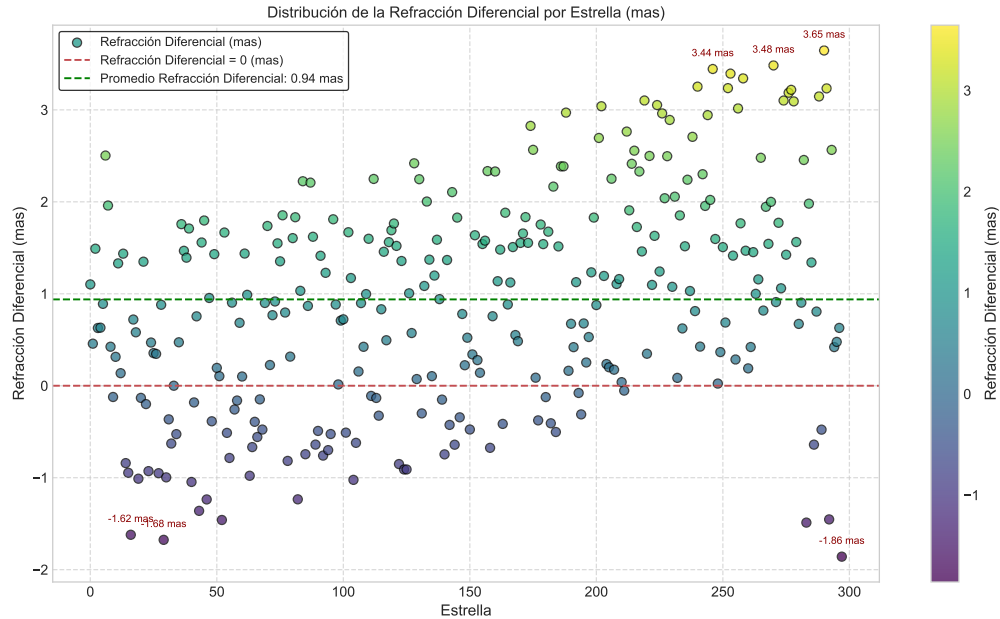


Figura 5.20: Distribución de la Refracción Diferencial por Estrella. La gráfica presenta la variación de la refracción diferencial medida en milisegundos de arco (mas) para cada estrella, lo cual refleja los errores residuales en la refracción atmosférica que persisten tras la aplicación de las correcciones estándar. La refracción diferencial es un indicador clave de la precisión alcanzada en las mediciones astrométricas, ya que incluso después de las correcciones atmosféricas, pueden subsistir errores adicionales debido a variaciones en las condiciones atmosféricas. Cada punto coloreado en el gráfico representa la magnitud de esta refracción diferencial para una estrella específica, facilitando la identificación de aquellas con mayores desviaciones. La línea discontinua verde señala el promedio de la refracción diferencial en el conjunto de datos, mientras que la línea discontinua roja representa el valor de referencia ideal (0 mas).

En un análisis inicial del modelo de refracción, se identificó una tendencia azimutal inesperada, lo cual generó preocupación debido a que la refracción atmosférica afecta predominantemente la altura y no el azimut. Tras una revisión exhaustiva, se determinó que estas aparentes correcciones en el azimut eran el resultado de errores en el manejo de los datos. Este hallazgo subraya la importancia crítica de la corrección por refracción para la precisión en las observaciones astrométricas. Es imperativo llevar a cabo una investigación minuciosa de los

factores que pueden influir en el modelo de refracción, así como realizar análisis adicionales para identificar y cuantificar sus efectos. Eliminar cualquier valor sin una justificación sólida puede resultar en la pérdida de información valiosa, por lo que en este caso, la corrección aplicada fue esencial para garantizar la exactitud de los resultados.

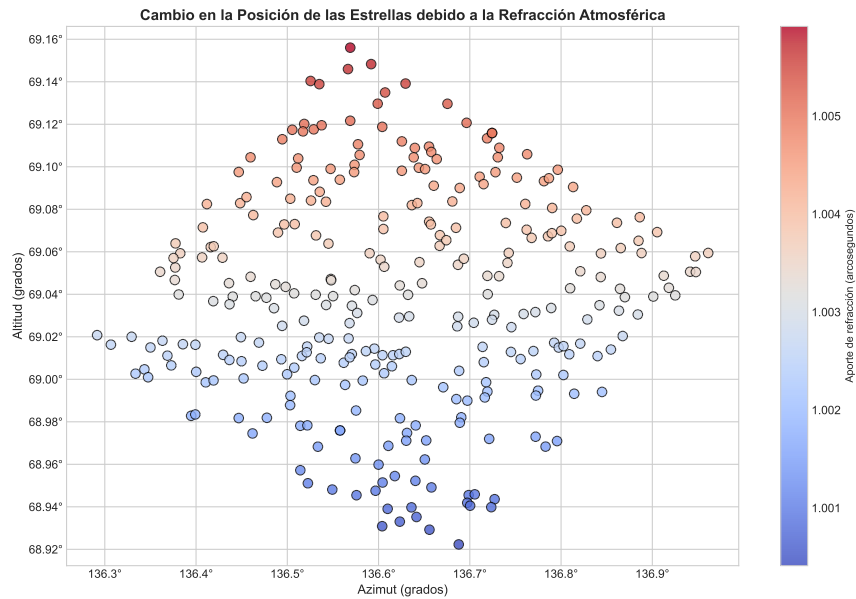


Figura 5.21: Análisis de la refracción atmosférica diferencial en observaciones astrométricas. Este gráfico muestra el cambio en la posición aparente de las estrellas objetivo debido a la refracción atmosférica, con la intensidad del color representando el grado de refracción. La variabilidad en el color indica la magnitud del cambio en la posición, que es más pronunciado para estrellas a menores altitudes (cerca del horizonte). Como se aprecia en el diagrama existe una variación mínima en la refracción a través del campo de visión, un fenómeno esperado en observaciones de campo estrecho y que debe ser cuidadosamente corregido para asegurar la precisión astrométrica en mediciones de alta resolución.

5.7. Del cielo al plano focal

El objetivo principal ahora es poder llevar las estrellas a un sistema de referencia común. Esto es crucial porque permite minimizar el modelo respecto a lo observado, asegurando que las comparaciones y ajustes entre las observaciones y el modelo astrométrico sean consistentes y precisos. Al transformar tanto las estrellas de referencia del catálogo Gaia DR3 como las estrellas observadas por el telescopio de la red FALCON a coordenadas del plano focal, se establece una

base uniforme sobre la cual se pueden aplicar correcciones y ajustes. Este paso es importante para reducir los errores sistemáticos y aleatorios, y para garantizar que las desviaciones entre las posiciones observadas y las predichas sean atribuidas correctamente a las distorsiones ópticas y no a discrepancias en el sistema de referencia. Además, la transformación a un sistema de referencia común facilita la aplicación de técnicas de minimización como el método de los mínimos cuadrados, mejorando la precisión de la calibración astrométrica y, por ende, la exactitud en la determinación de posiciones estelares.

En el caso de las estrellas observadas por la unidad FALCON-ULS la tarea es bastante sencilla, debido a que podemos realizar la transformación conociendo la información del tamaño de sensor y el tamaño de cada píxel (ver Fig 5.22).

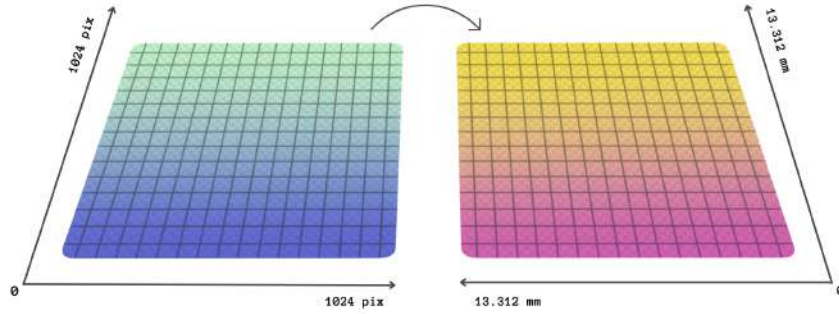


Figura 5.22: Representación de transformación de coordenadas de píxeles X_{pix}, Y_{pix} a milímetros $X_{mmo,mm}, Y_{mmo,mm}$.

En el caso de la red de telescopios FALCON como se menciona en los capítulos anteriores, poseen una configuración idéntica en los 12 telescopios. El tamaño del sensor CCD de la cámara APOGEE ALTA F47 presenta dimensiones de 1024 x 1024 píxeles, con un tamaño de píxel de 13 micrones. Por lo tanto al realizar el calculo nos resulta una matriz de 13.6 milímetros por lado. Con esto podemos transformar cada estrella con unidades de píxeles X_{pix}, Y_{pix} a unidades de milímetros $X_{mmo,mm}, Y_{mmo,mm}$ dentro del sensor. Aunque esta conversión suena trivial, puede entregarnos información vital sobre si existe una inclinación o tilt en el sensor.

En el siguiente paso de nuestro proceso, llevamos a cabo la conversión de las estrellas del catálogo en coordenadas AltAz nuevamente a coordenadas ecuatoriales, tomando en cuenta las correcciones por refracción atmosférica, en la denominada “placa estándar sintética”. Posteriormente, estas coordenadas se transforman en coordenadas del plano focal, a través de una proyección gnomónica o tangencial, según se ilustra en la Figura 5.23.

Este método de conversión nos permite representar de manera precisa y detallada las posiciones de los objetos de referencia observados en términos del plano focal del telescopio FALCON-ULS. La aplicación de la proyección gnomónica facilita la modelación de la escala de la placa y las distorsiones inherentes, brindando una representación fiel de las coordenadas de los objetos en el plano focal, lo cual es esencial para el análisis astrométrico preciso y la obtención de resultados confiables en nuestro estudio.

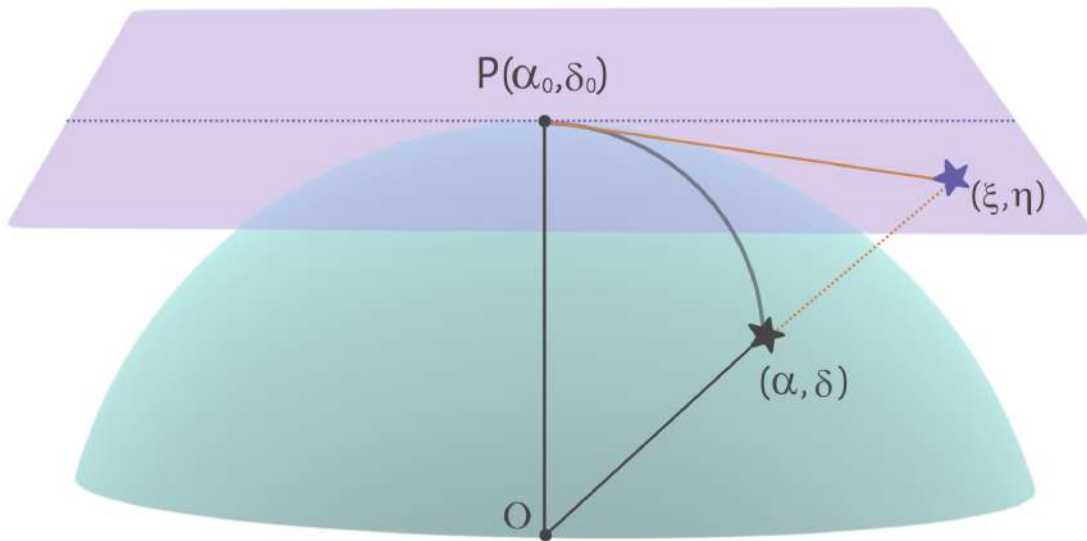


Figura 5.23: Ilustración de una proyección gnomónica o plano tangente. El plano es tangente a la esfera en el punto (α_0, δ_0) , y en las coordenadas (ξ, η) se proyectará una estrella con coordenadas (α, δ) . El punto tangente se proyecta sobre el origen del sistema de coordenadas del plano, paralelo al eje focal del telescopio. El observador está en el punto O .

La proyección gnomónica o tangencial en astronomía se emplea para representar la posición aparente de objetos celestes desde un punto específico de observación en el espacio. A diferencia de las proyecciones cartográficas terrestres, esta técnica visualiza la esfera celeste desde un punto de observación exterior convirtiendo *líneas rectas en círculos máximos*. La proyección tangencial se forma

al proyectar los rayos de luz de los objetos celestes hasta un plano tangente a la esfera celeste desde el punto de observación. Este método conserva ángulos y coordenadas, siendo útil para la astrometría, que se enfoca en medir con precisión las posiciones y movimientos de objetos celestes. Esto permite visualizar la posición aparente de los objetos celestes desde la perspectiva del observador en el espacio, facilitando la representación de trayectorias aparentes y paralajes estelares. Aunque presenta distorsiones, especialmente lejos del punto de observación, se considera aceptable para campos de visión pequeños.

Las ecuaciones que describen esta proyección son las siguientes:

$$\xi = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta + \cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

$$\eta = \frac{\cos \delta_0 \sin \delta - \sin \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 \sin \delta + \cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

Donde ξ y η son coordenadas angulares medidas en radianes de una estrella con coordenadas de cielo α , δ proyectadas en el plano tangente. Las coordenadas en punto tangente entre la esfera y el plano son α_0 y δ_0 , las cuales serán proyectadas en $(\xi, \eta) = (0, 0)$, asumiendo que el apuntado del telescopio es correcto y que el eje focal del telescopio se posicione perpendicular y centrado en el sensor como se muestra en la Figura 5.24.

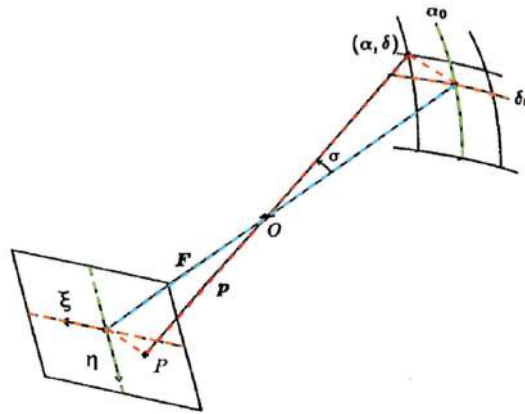


Figura 5.24: Representación del eje focal F apuntando a las coordenadas (α_0, δ_0) , esta imagen da cuenta de que el objetivo por el cual se realiza una proyección gnomónica o tangencial es convertir líneas rectas del plano focal en círculos máximos de cielo.

Tanto ξ como η están en radianes. Una forma de manejar estos valores es multiplicando ambas coordenadas proyectadas por un factor que involucre coordenadas del plano focal. En este caso, es posible multiplicar ambos factores por el largo focal nominal del telescopio en píxeles. Cuando se multiplica el ángulo en radianes por el largo focal en píxeles, se multiplica una cantidad angular por una cantidad lineal. El resultado de esta multiplicación será una cantidad lineal en píxeles, que representa la posición o distancia en el detector correspondiente al ángulo angular medido. Sin embargo, para trabajar en el sistema de coordenadas de píxeles del detector es necesario seguir el siguiente proceso:

$$LargoFocal(\text{pixels}) = \frac{LargoFocal(\text{mm}) \times \text{Ancho del Sensor}(\text{mm})}{\text{Tamaño de la Imagen}(\text{pixel})}$$

Primero, se convierte ξ, η de radianes a píxeles utilizando el largo focal en píxeles

$$\xi_{\text{pix}} = \xi \times F(\text{pix})$$

$$\eta_{\text{pix}} = \eta \times F(\text{pix})$$

Luego, se hace la transformación de las coordenadas en píxeles a coordenadas en milímetros usando el tamaño del píxel.

Por lo tanto, en esta etapa tenemos las estrellas de referencia del catálogo Gaia DR3 (placa sintética) en milímetros. En este momento, tenemos tanto las coordenadas de las estrellas observadas en la placa de FALCON-ULS, como la placa sintética de las estrellas de referencia del catálogo astrométrico Gaia DR3 en coordenadas del plano focal (mm).

Entonces, ¿sería posible obtener una comparación que nos entregue algún tipo de diferencia significativa entre ambas placas?

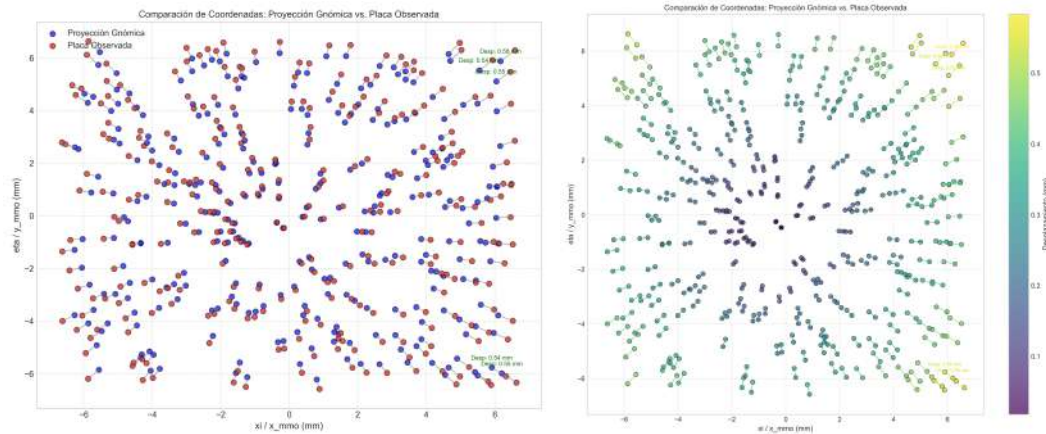


Figura 5.25: Dos representaciones gráficas de la comparación entre las coordenadas de la proyección gnómica y las observadas en la placa. En la figura de la izquierda, las coordenadas se muestran en azul (proyección gnómica) y rojo (placa observada), con flechas grises que indican el desplazamiento entre las posiciones. La figura de la derecha utiliza un colormap para representar visualmente la magnitud del desplazamiento entre ambas placas, facilitando la identificación de áreas con mayores distancias entre los objetos. Este análisis visual sirve para evaluar en primera instancia la precisión de las transformaciones aplicadas y para identificar posibles fuentes de error en las primeras etapas del modelo.

5.8. Distorsiones radiales y constantes de placa

La respuesta no es tan sencilla. La alineación precisa entre las coordenadas de las estrellas en placas observadas y sintéticas no es una tarea trivial, ya que factores como el desalineamiento del eje óptico y el sensor, errores en el apuntado del telescopio, variaciones en la distancia focal, aberraciones esféricas ligadas al sistema óptico o incluso estimaciones incorrectas de la refracción atmosférica pueden introducir discrepancias entre las coordenadas (ξ, η) y (x, y) . Estas discrepancias, representadas por $\xi \neq x$ y $\eta \neq y$, dan lugar a errores sistemáticos que deben ser abordados para garantizar mediciones astrométricas precisas. Para ello, se recurre al uso de modelos polinomiales que minimizan y caracterizan las diferencias entre puntos, utilizando los llamados coeficientes de distorsión radial y las constantes de placa para caracterizar los diversos defectos presentes en los sistemas ópticos.

Distorsiones Radiales

Las distorsiones radiales en imágenes astronómicas son fenómenos que afectan la geometría local de las imágenes, afectando la precisión de las mediciones de posición de los objetos celestes. Estas distorsiones, son causadas por irregularidades

en el sistema óptico del telescopio y en el detector de imagen.

A nivel teórico, las distorsiones radiales se manifiestan como deformaciones no lineales en la geometría de la imagen, que pueden distorsionar la forma y la posición aparente de objetos observados. Estas deformaciones son más notorias en los bordes y pueden variar en magnitud dependiendo del diseño óptico del telescopio y las condiciones de observación.

La corrección precisa de las distorsiones radiales es esencial para obtener mediciones astrométricas confiables y exactas. Esto implica el desarrollo y la aplicación de modelos que puedan describir con precisión la naturaleza de estas distorsiones y proporcionar métodos efectivos para su compensación.

Entre las diversas metodologías, las coordenadas polares emergen como una herramienta fundamental para abordar distorsiones en imágenes astronómicas al representar las posiciones de objetos celestes en coordenadas angulares y radiales. Esta metodología ofrece una descripción detallada del campo de visión del telescopio, permitiendo caracterizar las distorsiones ópticas desde el eje óptico hasta el límite del plano focal.

En el contexto de la reducción astrométrica de imágenes astronómicas, los coeficientes de distorsión radial descritos por s_0 , s_3 y s_5 son parámetros utilizados en modelos matemáticos para describir cómo se distorsiona la imagen en el plano focal debido a las características ópticas del sistema (Damke-Calderon (2016)).

- s_0 (Coeficiente de Distorsión Lineal o Constante de Escala): Ajusta uniformemente la escala de la imagen proyectada en todo el campo de visión, afectando la relación entre el tamaño angular de los objetos observados y sus proyecciones en el plano focal.
- s_3 (Coeficiente de Distorsión Cúbica): Introduce una distorsión más compleja que varía con el cubo de la distancia radial, afectando la forma en que se distorsiona la imagen hacia los bordes del campo de visión.
- s_5 (Coeficiente de Distorsión de Quinto Orden): Captura componentes de quinto orden de la distorsión radial, proporcionando correcciones adicionales para distorsiones más sutiles en el campo de visión, especialmente relevantes para sistemas ópticos de alta precisión.

Estos coeficientes son esenciales para corregir las distorsiones geométricas que

afectan la precisión de las mediciones astrométricas, permitiendo una representación más precisa de las posiciones de los objetos celestes.

Para abordar este tipo de distorsiones, se comienza trabajando las coordenadas proyectadas ξ y η a través de las coordenadas polares ρ y θ .

$$\rho = (\xi^2 + \eta^2)^{1/2}, \quad (5.1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\eta}{\xi}\right), \quad (5.2)$$

Donde ρ y θ son los componentes radiales y angulares respectivamente. La transformación a coordenadas de plano focal, viene dada por:

$$r_{\text{focal}} = s_0\rho + f(\rho) \quad (5.3)$$

donde r_{focal} es la distancia radial en el plano focal desde el eje óptico, en unidades de longitud. La cantidad s_0 es la escala de placa del sistema, y $f(\rho)$ es una función no lineal que describe las distorsiones radiales de la escala de placa. Tales distorsiones en sistemas Ritchey-Chrétien están bien caracterizadas por términos de tercer y quinto orden.

Así,

$$f(\rho) = s_3\rho^3 + s_5\rho^5 \quad (5.4)$$

donde los coeficientes de estos términos, s_3 y s_5 , son las constantes de distorsión. Cabe señalar que no necesitamos convertir la componente angular θ , ya que solo tenemos distorsiones radiales.

Finalmente, convertimos las posiciones del plano focal modeladas desde el marco polar de vuelta a un sistema cartesiano. Este último sistema se ajusta mejor a la geometría de los datos CCD y es lo que utilizamos en la minimización del modelo. Las coordenadas de las estrellas modeladas por distorsiones radiales a partir de datos astrométricos (placa sintética) en el plano focal en milímetros estarán descritas por:

$$x_{\text{focal, astr}} = r_{\text{focal}} \cdot \cos \theta \quad (5.5)$$

$$y_{\text{focal, astr}} = r_{\text{focal}} \cdot \sin \theta \quad (5.6)$$

Estas ecuaciones nos entregan la geometría local del sistema, y será nuestra primera visión de un modelo general que describe cómo el sistema óptico afecta las posiciones de los objetos en el cielo.

Constantes de Placa

Las constantes de placa incluyen parámetros como la orientación, la escala y los desplazamientos de la imagen, que se utilizan para corregir la alineación y la geometría global de las imágenes astronómicas. Una vez que las distorsiones radiales han sido corregidas, las constantes de placa se aplican para ajustar la posición y la escala de la imagen de manera que las coordenadas medidas correspondan con precisión a las coordenadas reales de los objetos en el cielo.

Uno de los enfoques más comunes para modelar estas constantes son las ecuaciones no lineales, como se muestra en las ecuaciones (5.7) y (5.8), que describen una variedad de distorsiones ópticas presentes en el sistema. Estas transformaciones permiten corregir los efectos sistemáticos que surgen durante la conversión de coordenadas desde un sistema local (x, y) asociado con la imagen bidimensional capturada por el detector, hacia un sistema de referencia celeste (ξ, η) alineado con las coordenadas celestes conocidas.

Estas ecuaciones no solo modelan y compensan fenómenos como la orientación y escala del sensor, sino también efectos más complejos como la distorsión óptica y variaciones en la sensibilidad fotométrica (ver Tabla 5.1).

$$\begin{aligned} \xi - x = & a_x x + b_x y + c_x + p_x x(x + y) + x(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2) \\ & + m_x \text{mag} + e_x \text{mag} \cdot x + f_x c_i + g_x x \cdot c_i \\ & + n_x \text{mask}(x, y), \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \eta - y = & b_y x + a_y y + c_y + q_y y(x + y) + y(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2) \\ & + m_y \text{mag} + e_y \text{mag} \cdot y + f_y c_i + g_y y \cdot c_i \\ & + n_y \text{mask}(x, y). \end{aligned} \quad (5.8)$$

Donde los términos y variables se caracterizan en la siguiente tabla:

Tabla 5.1: Términos de corrección para las constantes de placa.

Parámetro	Término de Corrección	
	Eje X	Eje Y
Punto cero	c_x	c_y
Escala	$a_x x$	$a_y x$
Orientación	$b_x y$	$b_y x$
Inclinación de placa	$p_x \cdot x(x + y)$	$q_y \cdot y(x + y)$
OFAD	$x(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2)$	$y(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2)$
Ecuación de magnitud	$m_x \cdot \text{mag}$	$m_y \cdot \text{mag}$
Coma	$e_x \cdot \text{mag} \cdot x$	$e_y \cdot \text{mag} \cdot y$
Índice de color (ci)	$f_x \cdot ci$	$f_y \cdot ci$
Magnificación de color	$g_x \cdot x \cdot ci$	$g_y \cdot y \cdot ci$
Máscara	$n_x \text{mask}(x, y)$	$n_y \text{mask}(x, y)$

- $a_x, b_x, c_x, a_y, b_y, c_y$: Coeficientes de la transformación lineal, que incluyen escalas y rotaciones para alinear el sistema de coordenadas de la imagen con el sistema de referencia del catálogo.
- p_x, q_y : Correcciones para la inclinación del detector o placa fotográfica.
- d_1, d_2, d_3 : Coeficientes de las distorsiones de orden superior, conocidas como distorsiones ópticas de campo angular diferencial (OFAD).
- m_x, m_y : Coeficientes de corrección por magnitud, si la posición es dependiente de la magnitud de las estrellas.
- e_x, e_y : Coeficientes que modelan el coma, una aberración óptica que resulta en imágenes asimétricas de estrellas.
- f_x, f_y : Correcciones para el índice de color, ajustando efectos de refracción cromática atmosférica.
- g_x, g_y : Coeficientes de magnificación de color, para corregir la dispersión cromática diferencial en el detector.
- $n_x \text{mask}(x, y), n_y \text{mask}(x, y)$: Funciones de enmascaramiento aplicadas a regiones específicas del campo de visión.

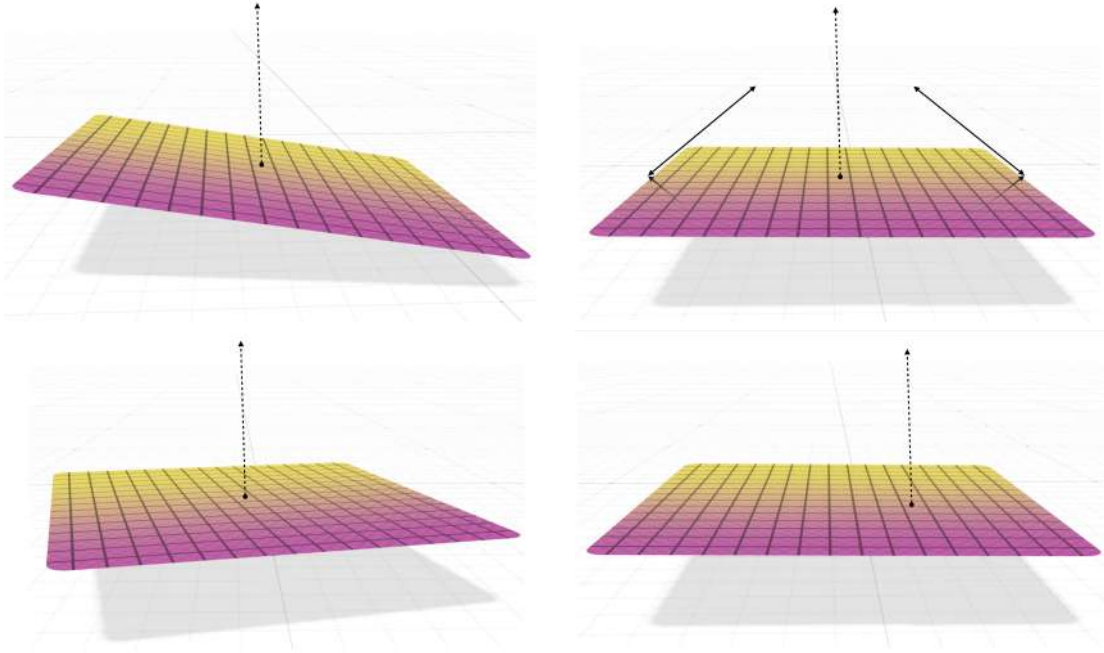


Figura 5.26: Algunos defectos sobre los CCDs: *Arriba Izquierda*: CCD con inclinación o *tilt* con respecto al eje óptico, *Arriba Derecha*: Representación de un CCD con problema de escala. *Abajo Izquierda*: CCD rotado en el eje horizontal con respecto a la alineación original, *Abajo Derecha*: CCD que presenta una traslación con respecto al centro que coincide con el eje óptico.

Para fines prácticos en esta tesis usaremos la parte lineal, cuadrática y cúbica de las ecuaciones (5.9) y (5.10).

$$\xi - x = a_x x + b_x y + c_x + p_x x(x + y) + x(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2) \quad (5.9)$$

$$\eta - y = b_y x + a_y y + c_y + q_y y(x + y) + y(d_1 x^2 + d_2 xy + d_3 y^2) \quad (5.10)$$

LMFIT: Non-Linear Least-Squares Minimization and Curve-Fitting for Python

Para abordar la resolución de las ecuaciones mencionadas previamente, se empleó un software especializado en minimizar mínimos cuadrados. Entre las diversas opciones disponibles, se optó por el paquete LMFIT debido a su extensa documentación y versatilidad para ajustar polinomios.

Desarrollada por Matt Newville, esta herramienta se basa en el paquete de

optimización MINPACK-1, el cual implementa algoritmos robustos y eficientes para el ajuste de modelos a datos.

Una de las características de LMFIT radica en su capacidad para manejar de manera eficaz modelos de ajuste no lineales con múltiples parámetros. Esto posibilita a los investigadores especificar modelos complejos que describan con precisión las relaciones entre las variables observadas y los parámetros ajustables. Asimismo, LMFIT ofrece una amplia variedad de métodos de ajuste y algoritmos de optimización, permitiendo a los usuarios seleccionar la estrategia más adecuada para sus datos y modelos.

Además de sus capacidades básicas de ajuste, LMFIT proporciona herramientas adicionales que simplifican el proceso de análisis de datos. Entre estas se incluye la capacidad de calcular incertidumbres en los parámetros ajustados mediante métodos de estimación, así como la posibilidad de realizar pruebas estadísticas y comparaciones entre modelos.

Entre los diferentes ajustes escogimos Nelder-Mead (Nelder & Mead (1965)) debido a que converge para un mayor número de parámetros libres como es el caso de nuestro modelo en comparación a otras opciones de LMFIT.

Al finalizar el proceso de minimización, se nos revelan los valores de los parámetros de distorsión radial y las constantes de placa, que fueron teorizadas en las etapas iniciales del modelo. La precisión de estas constantes es crítica, puesto que permiten desentrañar y corregir los efectos de distorsión y otras anomalías ópticas.

Incorporando estas constantes al análisis de las coordenadas de referencia del catálogo Gaia DR3, se establece un marco para una comparación más rigurosa y exacta con las coordenadas de los objetos documentados en la placa FALCON-ULS. Este paso es crucial, ya que las discrepancias mínimas entre las coordenadas observadas y las teóricas pueden llevar a errores significativos en la determinación de posiciones de los objetos observados.

5.8.1. Residuos

Al concluir el proceso de modelado, es posible aplicar a los datos de la placa sintética tanto los parámetros de distorsión radial como las constantes de placa para efectuar una evaluación detallada punto por punto en el plano focal de nues-

tro sistema óptico. Esta evaluación revela la distancia total entre las posiciones de las estrellas en la placa sintéticamente modelada, basada en las posiciones de catálogo de Gaia DR3, en comparación con aquellas en la placa observada. La diferenciación punto a punto entre estas posiciones nos permite identificar diferencias o “errores” que permanecen en las mediciones, los cuales denominamos residuos (ver Fig. 5.27).

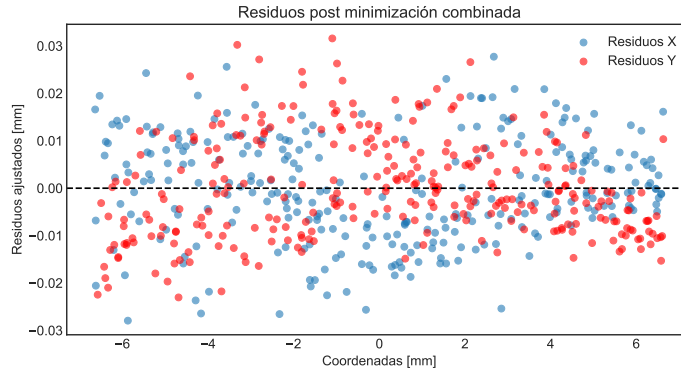


Figura 5.27: Distribución de los residuos ajustados en las coordenadas X (en azul) y Y (en rojo) tras aplicar la minimización combinada. Los residuos muestran una dispersión simétrica en torno a cero, lo que indica la efectividad del ajuste para reducir el error sistemático en ambas direcciones. La línea horizontal en cero sirve como referencia visual para evaluar el centrado de los residuos, confirmando la ausencia de sesgos significativos en las posiciones ajustadas.

Estos residuos pueden ser visualizados mediante vectores en un plano cartesiano, cada uno con una dirección, magnitud y sentido definidos, ofreciendo así una representación gráfica de los patrones de distorsión o áreas con residuos significativos en el plano focal como se muestra en la Figura(5.28).

Estos vectores sirven como una herramienta diagnóstica crucial, revelando patrones que indican las regiones afectadas por distorsiones y los puntos donde los residuos son más pronunciados. La identificación de estos patrones es esencial para entender las limitaciones del sistema óptico y las posibles fuentes de error que afectan la precisión de las observaciones.

El objetivo primordial dentro de las reducciones astrométricas es desarrollar modelos que no solo caractericen sino que también corrijan de manera efectiva todos los errores sistemáticos inherentes al sistema óptico. Este objetivo se puede alcanzar mediante la creación de un mapa de residuos o histograma, que idealmente debería evidenciar una convergencia hacia cero en los valores residuales. La presencia de valores atípicos o tendencias anómalas en este mapa señalaría la existencia de defectos aún no modelados, subrayando la necesidad de ajustes

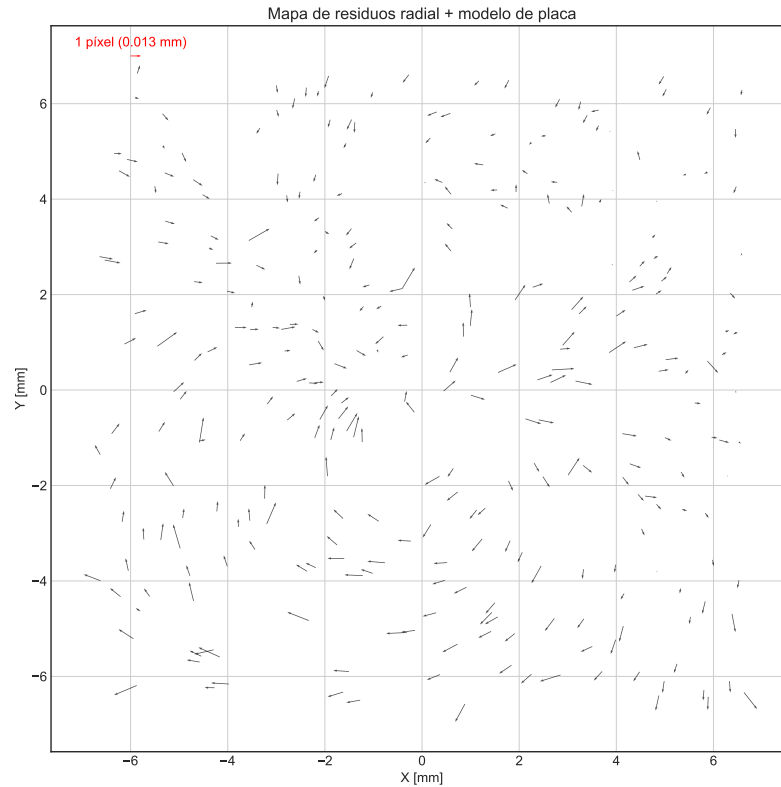


Figura 5.28: Visualización del mapa de residuos radiales combinados con el modelo de placa aplicado al sistema óptico. Los vectores indican la magnitud y dirección de los residuos después de la corrección, mostrando cómo se ajustan las posiciones de los objetos observados. La flecha de referencia en la esquina superior izquierda indica un desplazamiento equivalente a un píxel (0.013 mm), proporcionando una escala visual para interpretar la magnitud de los residuos. La dispersión de los vectores sugiere áreas donde el modelo de corrección ha sido más o menos efectivo, lo que es crucial para identificar y entender las limitaciones del modelo en el contexto astrométrico.

adicionales en nuestro modelo.

El análisis de los residuos ajustados en las direcciones X e Y ofrece una visión detallada de la eficacia del modelo astrométrico implementado. En la Fig. (5.29), se observa una dispersión de los residuos ajustados con una clara concentración en torno a cero, lo que sugiere que el modelo ha sido efectivo en la corrección de errores sistemáticos y aleatorios en ambas direcciones. Los puntos en el gráfico de dispersión se colorean según la magnitud combinada de los residuos, con tonos más oscuros que indican residuos mayores. Este mapeo visual, complementado con contornos que destacan las áreas de mayor densidad, proporciona una comprensión clara de dónde se concentran los errores residuales.

Los histogramas adyacentes en la figura permiten una evaluación más profunda

de la simetría y normalidad de los residuos ajustados. La distribución centrada y relativamente estrecha en ambos histogramas sugiere que los residuos ajustados siguen una distribución cercana a la normal, lo que es un indicador positivo de la calidad del ajuste realizado. Además, la correlación baja entre los residuos en X y Y (-0.06) refuerza la independencia de las correcciones aplicadas en ambas direcciones, un resultado deseable que valida la separación de los términos en el modelo.

Este tipo de análisis es esencial para asegurar que las posiciones estelares medidas se aproximan con precisión a las verdaderas, minimizando el impacto de las distorsiones ópticas y garantizando la confiabilidad de las observaciones astrométricas.

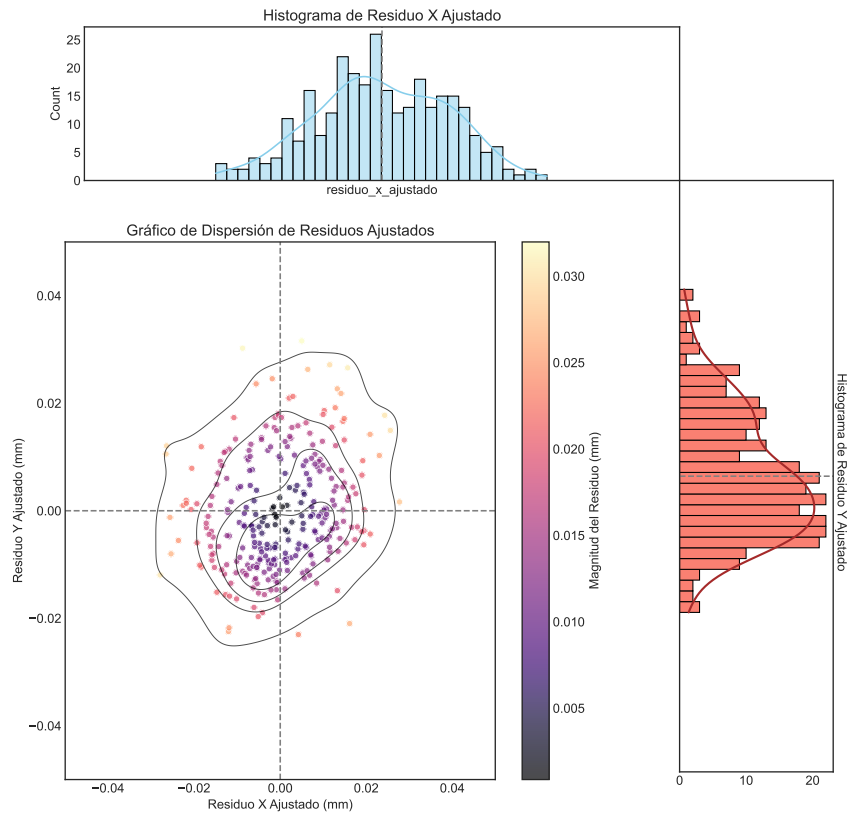


Figura 5.29: Visualización de la dispersión de residuos ajustados en las direcciones X e Y, con histogramas que muestran la distribución de los residuos ajustados en cada dirección. El gráfico central destaca la concentración de residuos alrededor de cero, indicando la efectividad del modelo astrométrico en la corrección de errores sistemáticos. Los contornos resaltan las áreas de mayor densidad de residuos, mientras que la baja correlación entre los residuos en X y Y refuerza la independencia de las correcciones aplicadas en ambas direcciones.

Es crucial reconocer, sin embargo, la presencia de errores aleatorios que esca-

pan a nuestro control, tales como los inherentes a las mediciones y otros factores impredecibles. Estos errores, que pueden surgir de variaciones en la calidad de la imagen, condiciones atmosféricas fluctuantes, o imprecisiones en la calibración del equipo, representan limitaciones fundamentales en la precisión astrométrica. Por tanto, el análisis debe extenderse para incluir métodos estadísticos que permitan cuantificar y, en la medida de lo posible, mitigar el impacto de estos errores aleatorios sobre los resultados finales.

Al avanzar en esta dirección, nuestra investigación no solo se enfocó en la corrección de errores sistemáticos y el perfeccionamiento de modelos teóricos, sino también en la implementación de estrategias para la identificación y tratamiento de errores aleatorios.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Análisis FALCON-ULS

En el curso de este estudio, llevamos a cabo un procedimiento de minimización bifásico para refinar nuestro modelo de corrección de distorsión óptica adaptado a la unidad FALCON-ULS. La fase inicial se centró en ajustar un polinomio que abordara las distorsiones radiales mencionadas anteriormente, para luego proceder a calcular las constantes de placa, incluyendo aspectos como la escala, el punto cero, la orientación y la inclinación.

Las rutinas de minimización se aplicaron a 298 estrellas en total con las cuales luego de la reducción se obtuvo un RMS promedio en los residuos de $\sim 16 \mu m$ en el eje X y $\sim 18 \mu m$ en el eje Y. Los resultados de ambos ajustes y de las constantes de distorsión se detallan en las tablas 6.1 y 6.3.

Aunque se tienen algunas referencias de trabajos como Lacruz et al. (2018) de telescopios con apertura pequeña (CIDA Survey de 1 metro) no tenemos un margen de comparación con otros modelos aplicados a este tipo de telescopios comerciales. Pero teniendo en cuenta esto último, los resultados parecen bastante aceptables y alineados con trabajos mencionados en secciones anteriores aplicados a grandes telescopios.

En este apartado detallan los resultados de ambos modelos que caracterizaron el sistema óptico del Falcon-ULS.

6.1.1. Modelo de distorsión radial

El análisis de la distorsión óptica mediante la modelización de la diferencia radial en función de la distancia radial ha permitido estimar los coeficientes de distorsión, específicamente los términos de escala de placa s_0 , junto con los de tercer y quinto orden, s_3 y s_5 . Estos términos son fundamentales para caracterizar y corregir las distorsiones geométricas en sistemas ópticos. Cada uno de estos términos representa una contribución específica a la distorsión radial que afecta la relación entre el tamaño angular de un objeto en el cielo y su proyección en el plano focal del telescopio (Damke-Calderon (2016)).

Tabla 6.1: Ajuste de parámetros de distorsiones radiales.

Parámetro	Valor Estimado (mm/deg)	Error Estándar
s_0 (mm/deg)	75.121	± 0.015
s_3 (mm/deg ³)	-124.66	± 2.70
s_5 (mm/deg ⁵)	2266.9	± 97.5

La optimización de estos parámetros se ha realizado a través de un proceso de minimización del error cuadrático usando LMFIT. Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 6.1.

En este análisis el primer punto que sale a la luz, es la discrepancia entre el coeficiente de escala s_0 y la escala de placa nominal del sistema, así como las diferencias entre el largo focal calculado por el modelo y el nominal. Estas diferencias pueden ser atribuidas a una combinación de factores relacionados tanto con las características del detector como con las condiciones del sistema óptico. El valor de s_0 , que representa la escala de placa en el modelo de distorsión radial, es el coeficiente que ajusta la relación entre las distancias angulares en el cielo y las distancias físicas en el plano focal del telescopio. Idealmente, s_0 debería coincidir con la escala de placa invertida, lo que implica una traducción precisa de un ángulo en el cielo a una distancia en la placa. Sin embargo, las discrepancias observadas en el valor de s_0 pueden ser indicativas de distorsiones adicionales que el modelo está capturando.

Cabe destacar que el valor calculado del coeficiente de distorsión lineal o constante de escala es $s_0 = 75.12(mm/deg)$ o 47.91 arcsec/mm el cual dista del valor de escala de placa nominal del sistema que es 51 arcsec/mm (Chun et al. (2018)). Al utilizar este valor para calcular el largo focal del telescopio obtenemos 4306 mm lo cual es mayor que la longitud focal nominal de 4000 mm .

Aunque el error relativo de este parámetro a la hora de la modelización fue de un 0.02 %, lo cual lo hace un parámetro bastante robusto en el modelo, estas diferencias pueden estar relacionadas con distorsiones intrínsecas del sensor, tales como la no linealidad en el tamaño de píxel o variaciones en la respuesta del píxel, conocidas como *Fixed Pattern Noise*, que introducen errores sistemáticos en la relación angular-medida en el plano focal. Además, las deformaciones geométricas del CCD, causadas por una *Charge Transfer Efficiency* (CTE) imperfecta, pueden distorsionar la imagen y afectar la medición de posiciones estelares. Estas distorsiones se reflejan en el valor de s_0 , el cual ajusta la escala de la imagen proyectada, influyendo en cómo los objetos observados se mapean en la placa.

Desde el punto de vista óptico, aberraciones del sistema, como la coma y la curvatura de campo, junto con la desalineación de los componentes ópticos, pueden causar que el plano focal real del sistema difiera del plano teórico. Estos efectos ópticos se manifiestan como distorsiones radiales que s_0 intenta compensar. Incluso las variaciones térmicas durante la observación, que pueden generar cambios en el tamaño efectivo del píxel, también influyen en la escala de placa medida, afectando el valor de este parámetro. Hay que tener en cuenta que el impacto de s_0 en la distorsión radial es significativo, ya que afecta uniformemente la escala en todo el campo de visión.

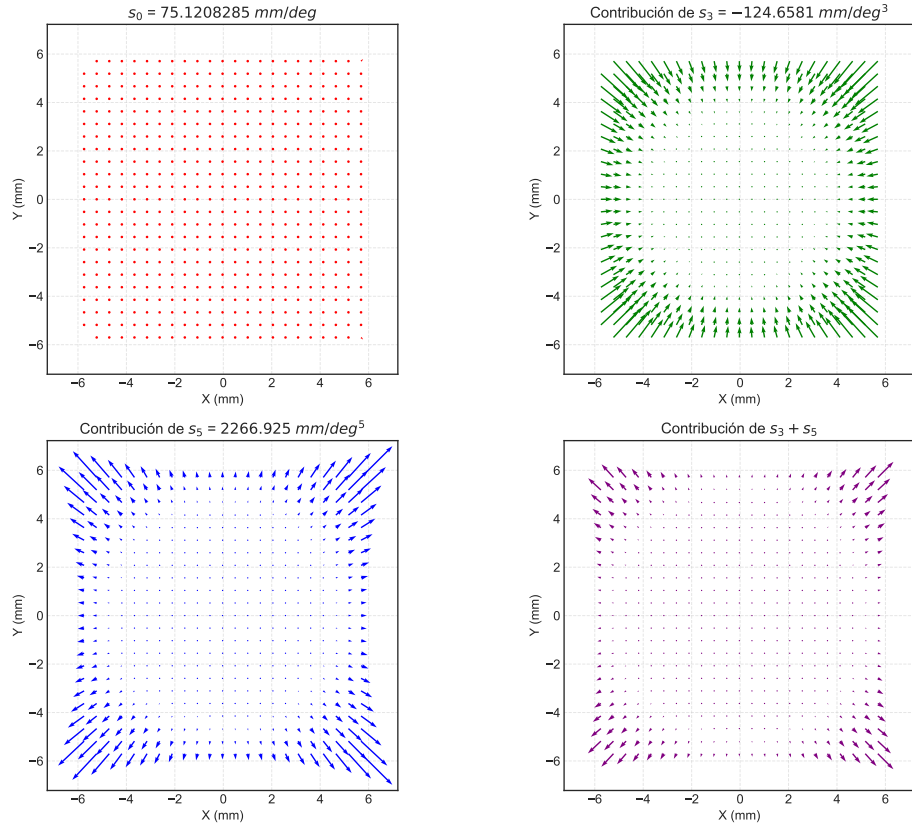
Distorsiones Ópticas (Contribuciones Individuales a s_0)

Figura 6.1: Visualización de las contribuciones de distorsión óptica en el sistema Falcon-ULS. La gráfica superior izquierda muestra la contribución de $s_0\rho$, representando una distorsión radial uniforme que afecta la escala de placa de manera constante en todas las direcciones. La gráfica superior derecha ilustra la distorsión cúbica asociada a $s_3\rho^3$, caracterizada por una distorsión de barril donde la expansión radial aumenta hacia los bordes del campo de visión. En la gráfica inferior izquierda, la contribución de $s_5\rho^5$ presenta un efecto de distorsión de quinto orden, con una distorsión de cojín que se manifiesta principalmente en las esquinas del campo. Finalmente, la gráfica inferior derecha combina las distorsiones cúbica y de quinto orden ($s_3\rho^3 + s_5\rho^5$), mostrando un patrón de distorsión más complejo y equilibrado, resultado de la interacción de ambas componentes. (Las escalas de las representaciones fueron exageradas para poder identificar sus efectos.

Como se muestra en la Fig. 6.1, la contribución de $s_0\rho$, representada en la gráfica superior izquierda, corresponde a la componente lineal de la distorsión radial. Esta se encarga de ajustar la escala de placa de manera uniforme en todo el campo de visión, afectando la distancia angular proyectada en la placa sin introducir curvatura. El resultado es una expansión radial que mantiene una distorsión simétrica y homogénea en todo el campo.

Por otro lado, la contribución de $s_3\rho^3$ se muestra en la gráfica superior derecha. Este término cúbico introduce una distorsión de tipo barril, donde los puntos en los bordes del campo de visión se expanden hacia fuera de manera no lineal. La distorsión se vuelve más significativa a medida que se aleja del centro del campo de visión, debido a la dependencia cúbica de la distancia radial ρ^3 .

La distorsión de quinto orden, representada por $s_5\rho^5$, se ilustra en la gráfica inferior izquierda. Este término captura efectos más complejos de la distorsión radial que varían con la quinta potencia de la distancia radial. A diferencia de s_3 , s_5 introduce una distorsión de tipo cojín, más pronunciada en las esquinas del campo de visión, donde las flechas indican una contracción hacia dentro, opuesta a la distorsión de barril.

Finalmente, la gráfica inferior derecha muestra la interacción de los términos $s_3\rho^3 + s_5\rho^5$. La distorsión resultante de esta combinación es compleja y refleja la superposición de las distorsiones de barril y cojín, aunque notoriamente el coeficiente a la quinta es dominante. La interacción entre s_3 y s_5 produce un campo de distorsión que combina entre la expansión y la contracción, dependiendo de la posición dentro del campo de visión. La interacción entre los parámetros s_3 y s_5 y sus signos específicos sugiere que las distorsiones en el sistema no se manifiestan uniformemente a través del campo de visión. Esto significa que las distorsiones no solo varían en magnitud, sino también en dirección, dependiendo de la distancia al centro óptico. Este comportamiento no lineal y anisotrópico de la distorsión requiere un modelo robusto que pueda capturar estos efectos complejos para garantizar la precisión del sistema óptico.

Los coeficientes s_0 , s_3 y s_5 no solo ajustan la escala de placa, sino que también corrigen la geometría de la imagen proyectada en el plano focal. Sin un modelado adecuado de estas distorsiones, las posiciones estelares medidas podrían verse significativamente afectadas, comprometiendo la precisión de las observaciones astrométricas.

Es importante mencionar que el modelo en un comienzo no era robusto, mostrando correlaciones negativas y parámetros poco significativos con el ajuste. La incorporación de un término angular s_θ en el modelo mostró una mejora en la precisión global del ajuste. Este término, que se representa por la relación $s_\theta \cdot \theta$, introduce una componente angular en el modelo de distorsión radial que permite capturar variaciones en la distorsión que dependen del ángulo θ en el campo de

visión. El parámetro s_θ en el contexto de la distorsión óptica es un coeficiente que ajusta el modelo para capturar posibles asimetrías angulares en la distorsión radial. En términos físicos, este coeficiente puede representar variaciones en la respuesta del sistema óptico que dependen de la orientación angular en el plano focal. Este tipo de ajuste es esencial en sistemas donde la simetría radial no es suficiente para modelar con precisión las distorsiones observadas.

En el ajuste realizado, el valor obtenido para s_θ fue 0.02912 (mm/deg) con un error relativo de 0.8 %. Este valor relativamente bajo y constante a lo largo de todo el rango de θ sugiere que la distorsión angular es prácticamente uniforme en todas las direcciones del campo de visión, lo que indica una baja asimetría angular en el sistema óptico. Es importante mencionar que el término s_θ no introduce una distorsión dependiente del ángulo, sino que actúa como una corrección constante en el modelo de distorsión radial. Aunque el impacto de s_θ podría parecer mínimo debido a su constancia, su inclusión en el modelo de distorsión radial sirve para capturar cualquier pequeña asimetría angular que pudiera afectar las observaciones astrométricas. La contribución de s_θ permitió refinar el modelo, garantizando que incluso leves variaciones angulares sean consideradas, lo que mejora la precisión del ajuste global.

El hecho de que s_θ no varíe significativamente con θ podría indicar que el sistema óptico tiene una buena alineación y simetría en el campo de visión, pero también sugiere que otros términos del modelo, como s_0 , s_3 , y s_5 , están dominando la distorsión radial. La evaluación del término s_θ también plantea la posibilidad de que este término, aunque constante, capte pequeñas correcciones necesarias para mejorar el ajuste.

Este refinamiento en el ajuste subraya la importancia de considerar todos los posibles factores de distorsión, incluso aquellos con un impacto aparentemente mínimo, para lograr un modelo global preciso y robusto.

Tabla 6.2: Correlaciones entre los parámetros del modelo de distorsión radial.

Correlación	Valor
$C(s_0, s_\theta)$	+0.4241
$C(s_0, s_3)$	-0.3179
$C(s_0, s_5)$	+0.2956
$C(s_3, s_5)$	-0.6788

Un punto importante a la hora de evaluar el modelo es el análisis de las co-

relaciones entre los parámetros s_0 , s_θ , s_3 , y s_5 que se presentan en la tabla 6.2. Este apartado revela importantes interrelaciones que influyen en la precisión del ajuste y la interpretación de los resultados astrométricos.

Como se muestra en la tabla 6.2, la correlación de $C(s_0, s_\theta) = +0.4241$ indica una relación positiva moderada entre la constante de escala s_0 y el término angular s_θ . Esta correlación sugiere que estos parámetros no son completamente independientes y que un incremento en s_0 podría estar asociado con un ligero aumento en s_θ . Aunque no es una correlación fuerte, esta relación podría implicar que la contribución angular no es totalmente separable de la escala de placa, lo que podría afectar algunas interpretaciones en el modelo.

Por otro lado, la correlación de $C(s_0, s_3) = -0.3179$ es moderadamente negativa, lo que indica que a medida que s_0 aumenta, s_3 tiende a disminuir. Esta relación sugiere que existe una cierta compensación entre la distorsión radial lineal (s_0) y la distorsión cúbica (s_3). Aunque esta correlación es menor que la observada entre s_0 y s_θ , sugiere que estos parámetros capturan diferentes aspectos de la distorsión.

La correlación de $C(s_0, s_5) = -0.2956$ es negativa, pero ligeramente más baja en magnitud que la de s_0 con s_θ . Esto indica que, aunque existe una relación inversa entre la escala de placa y el término de quinto orden, no es lo suficientemente fuerte como para causar preocupación por colinealidad. Sin embargo, sí sugiere que s_5 podría estar ajustándose en parte para compensar ligeras variaciones no capturadas adecuadamente por s_0 .

Finalmente, la correlación de $C(s_3, s_5) = -0.6788$ es la más fuerte entre los parámetros considerados, y es negativa. Esta correlación alta sugiere que los términos cúbico (s_3) y de quinto orden (s_5) están capturando aspectos similares de la distorsión radial, lo que podría indicar una redundancia en el modelo. Esta fuerte relación negativa sugiere que cuando s_3 aumenta, s_5 tiende a disminuir significativamente, lo que podría complicar la interpretación independiente de estos términos.

En conjunto, estas correlaciones subrayan la necesidad de un análisis cuidadoso al interpretar los parámetros del modelo de distorsión radial. La presencia de correlaciones moderadas sugiere que los parámetros no son completamente independientes y que su interacción puede influir en el comportamiento general del modelo.

Por otro lado, el análisis de las métricas de ajuste presentadas en la Tabla 6.3 proporciona una evaluación de la calidad del modelo de distorsión radial aplicado. El valor de *Chi-square* de 198.2, junto con un *Reduced Chi-square* de 0.63, indica un buen ajuste del modelo a los datos observacionales, sugiriendo que las diferencias entre los datos observados y las predicciones del modelo son relativamente pequeñas y están dentro de lo esperado dado el número de grados de libertad del sistema. Además, los valores de los criterios de información de Akaike ($AIC = -2332.5$) y de Bayes ($BIC = -2325.0$) refuerzan la calidad del ajuste, siendo indicadores que penalizan la complejidad del modelo en relación con la bondad de ajuste. Estos valores, al ser negativos y relativamente bajos, reflejan que el modelo es parsimonioso, evitando sobreajustes mientras captura adecuadamente la estructura de los datos, lo cual es crucial para la precisión en aplicaciones astrométricas de alta precisión.

Tabla 6.3: Ajuste de parámetros y métricas del modelo.

Métrica	Valor
Chi-square	198.2
Reduced Chi-square	0.63
Akaike Information Criterion (AIC)	-2332.5
Bayesian Information Criterion (BIC)	-2325.0

Finalmente, el modelo de distorsión radial genera un mapa de residuos en el plano focal del sistema óptico Falcon-ULS, utilizando los coeficientes de distorsión s_0 , s_3 , s_5 , y el término angular s_θ . Estos parámetros fueron ajustados con el objetivo de modelar y corregir de manera precisa las distorsiones geométricas que afectan la relación entre el tamaño angular de los objetos celestes y su proyección en el plano focal, permitiendo así una estimación más precisa de las posiciones de los objetos.

El gráfico presentado muestra los vectores residuales (izquierda) que indican la dirección y magnitud de los residuos que persisten después de aplicar la corrección radial. A pesar de las correcciones aplicadas, se observa un patrón de distorsión residual que sugiere la existencia de distorsiones adicionales que no han sido completamente corregidas, particularmente en las regiones periféricas del campo de visión. Esto subraya la importancia de continuar ajustando el modelo para mejorar la precisión en la estimación de las posiciones estelares.

El mapa de calor presentado en el gráfico de la derecha utiliza un colormap

para representar la magnitud de estos residuos en milímetros. Este mapa facilita la identificación de áreas críticas donde las distorsiones geométricas son más pronunciadas. La persistencia de estos residuos sugiere la presencia de distorsiones adicionales, posiblemente debidas a aberraciones ópticas complejas como la coma o la curvatura de campo, que no han sido completamente capturadas por el modelo actual.

La comprensión y corrección de estos patrones de distorsión residual es esencial para el desarrollo de modelos astrométricos más robustos. Identificar las causas subyacentes de estas distorsiones permite refinar los modelos. En este trabajo se presenta un segundo modelo el cual caracteriza el sistema a través de las constantes de placa para mejorar la precisión en la determinación de las posiciones estelares, asegurando así la fiabilidad de las observaciones astrométricas realizadas con el sistema Falcon-ULS.

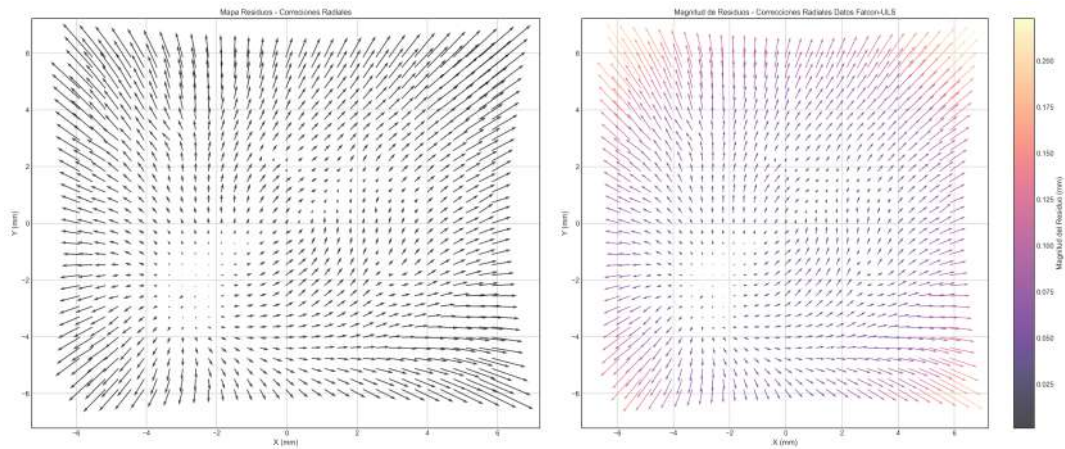


Figura 6.2: Mapa de residuos en el plano focal tras la corrección radial utilizando los parámetros s_0 , s_3 , s_5 , y s_θ . A la izquierda, se observan los vectores residuales que indican dirección y magnitud de los residuos. A la derecha, se presenta un colormap que facilita la identificación de áreas con residuos significativos en milímetros. A pesar de las correcciones aplicadas, persisten distorsiones geométricas que sugieren la necesidad de ajustes adicionales para mejorar la precisión astrométrica.

6.1.2. Modelo de ajuste de placa.

Los parámetros obtenidos a través de la calibración del sistema óptico proporcionan una comprensión precisa sobre la alineación del sensor y su respuesta. Los términos y sus aportaciones al modelo fueron descritos y graficados en la presente sección y resumidos en la Tabla 6.4.

Los coeficientes de escala a_x y a_y , con valores estimados de 0.998 y 0.999 respectivamente, revelan una discrepancia en las escalas de medición del sensor respecto a las coordenadas celestes del catálogo. Estos parámetros, que representan la transformación lineal en los ejes X e Y, ajustan las coordenadas medidas en el sistema del sensor a un sistema de referencia. La diferencia en estas escalas sugiere la presencia de distorsiones en la amplificación o atenuación de las señales capturadas, lo que resalta la necesidad de un modelado y corrección adecuados en el proceso de calibración. Es importante no confundir estos coeficientes con el término s_0 , un coeficiente de distorsión radial que ajusta la escala de la imagen proyectada en el plano focal. s_0 representa una corrección uniforme aplicada a la distancia angular proyectada en la placa, afectando de manera equitativa todas las direcciones en el campo de visión.

En conjunto, s_0 , a_x , y a_y trabajan para corregir las distorsiones y transformar las posiciones observadas en el sistema de coordenadas del sensor a un sistema de referencia preciso. Mientras que s_0 se encarga de corregir la distorsión radial en una escala uniforme, a_x y a_y abordan la escala de los ejes específicos X e Y, asegurando una alineación precisa entre el sistema del sensor y el sistema de referencia celeste.

En este contexto se presenta en la Fig. 6.3, una visualización de la deformación inducida por la escala en el plano focal del sensor. En el gráfico de la izquierda se presenta un mapa de contornos 2D que ilustra la distribución de la deformación inducida por la escala en el plano focal con vectores que muestran la dirección y magnitud del desplazamiento en cada punto. El contorno circular refleja la homogeneidad en la deformación, con una tendencia centrípeta hacia el origen, lo que sugiere que la escala afecta simétricamente en todas las direcciones. La flecha de referencia indica un desplazamiento de 0.01 mm, proporcionando una escala visual de la magnitud de los desplazamientos. En el gráfico de la derecha se muestra una representación 3D de la misma deformación. La superficie ilustra cómo varía la magnitud de la deformación a través del plano focal y permite

visualizar cómo la deformación toma mayor magnitud en la periferia del plano.

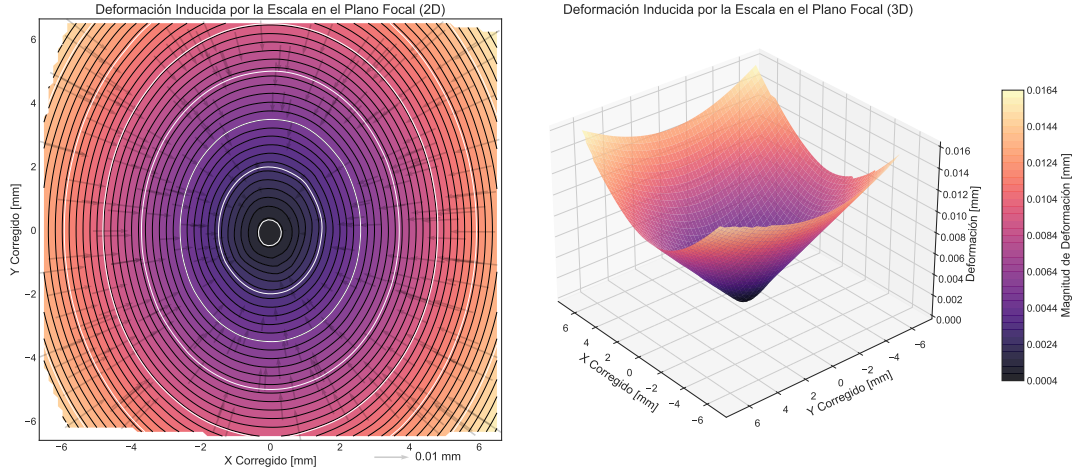


Figura 6.3: Visualización de la deformación inducida por la escala en el plano focal del sensor. En el gráfico de la izquierda se presenta un mapa de contornos 2D que ilustra la distribución de la deformación inducida por la escala en el plano focal. En el gráfico de la derecha se muestra una representación 3D de la misma deformación. La superficie ilustra cómo varía la magnitud de la deformación a través del plano focal.

Los términos de orientación, representados como b_x y b_y , se estimaron con valores de 0.0301 rad y 0.0268 rad, respectivamente. Estos valores sugieren una rotación del campo de imagen respecto al sistema de referencia ideal, el cual, en un caso perfectamente alineado, debería ser nulo. A pesar de que estas magnitudes pueden parecer reducidas, su presencia es significativa y no debe ser subestimada.

La visualización en la Figura 6.4 muestra la desviación del sensor en el plano cartesiano, donde se observa un ángulo de rotación total de 2.31° , calculado a partir de estos términos de orientación. Este ángulo de rotación, aunque pequeño, refleja un ajuste en la alineación del sistema de imagen, ya que cualquier desalineación podría introducir errores sistemáticos en las mediciones astrométricas.

Adicionalmente, se representa el campo de corrección de rotación. La Figura 6.5, refuerza la idea de una rotación sistemática que afecta el plano focal en su totalidad. Esta corrección de rotación afecta cada punto del campo de visión del sensor. Las flechas indican la dirección y magnitud de la corrección aplicada en diferentes puntos del plano focal, mostrando cómo la imagen capturada ha sido "des-rotada" para alinearse con el sistema de referencia. La magnitud de la corrección varía a lo largo del campo de visión, lo cual es visualizado a través del color y la longitud de las flechas en el mapa.

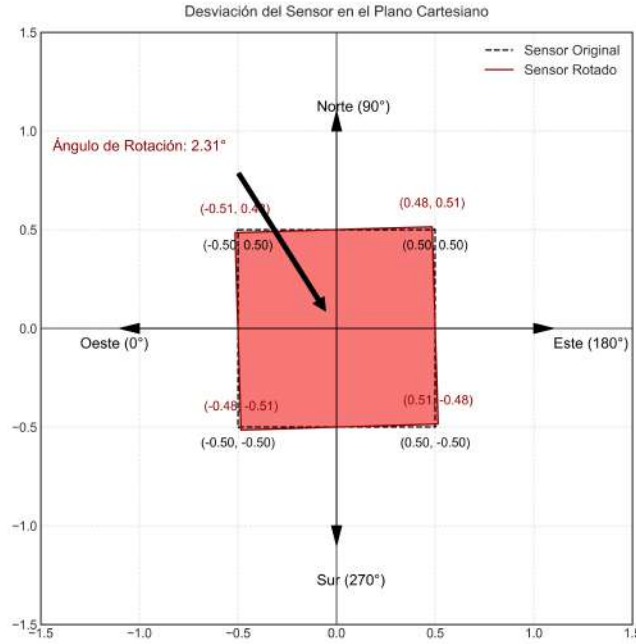


Figura 6.4: Representación de la desviación del sensor en el plano cartesiano debido a la rotación calculada. El gráfico muestra la posición original del sensor (en línea discontinua) en comparación con la posición rotada (en línea continua). El ángulo de rotación de 2.31° con respecto a la orientación del sensor (norte-este positivos) se calculó a partir de las correcciones de rotación b_1 y b_2 , que fueron aplicadas a las coordenadas corregidas del sensor. La rotación es un aspecto a considerar en la calibración de sistemas astrométricos, ya que cualquier desalineación puede introducir errores sistemáticos en la medición de las posiciones de los objetos celestes.

El desplazamiento del punto cero del sensor (c_x y c_y) es una corrección necesaria en el modelo astrométrico para alinear la posición central del sensor con respecto a una posición ideal o esperada. Este desplazamiento puede ser resultado de varios factores físicos o instrumentales, como la desalineación del sensor, donde si el sensor no está perfectamente alineado con el sistema óptico, el punto central (punto cero) puede desplazarse, o podría deberse a un montaje imperfecto o a una inclinación del sensor respecto al eje óptico. Además, las aberraciones presentes en el sistema óptico, como la coma o algún tipo de distorsión, pueden inducir un desplazamiento aparente del centro del campo de visión del sensor. Otro factor a considerar es la calibración imperfecta, donde un error en la calibración inicial del sistema podría dar lugar a un desplazamiento del punto cero, que se corrige posteriormente mediante ajustes en c_x y c_y .

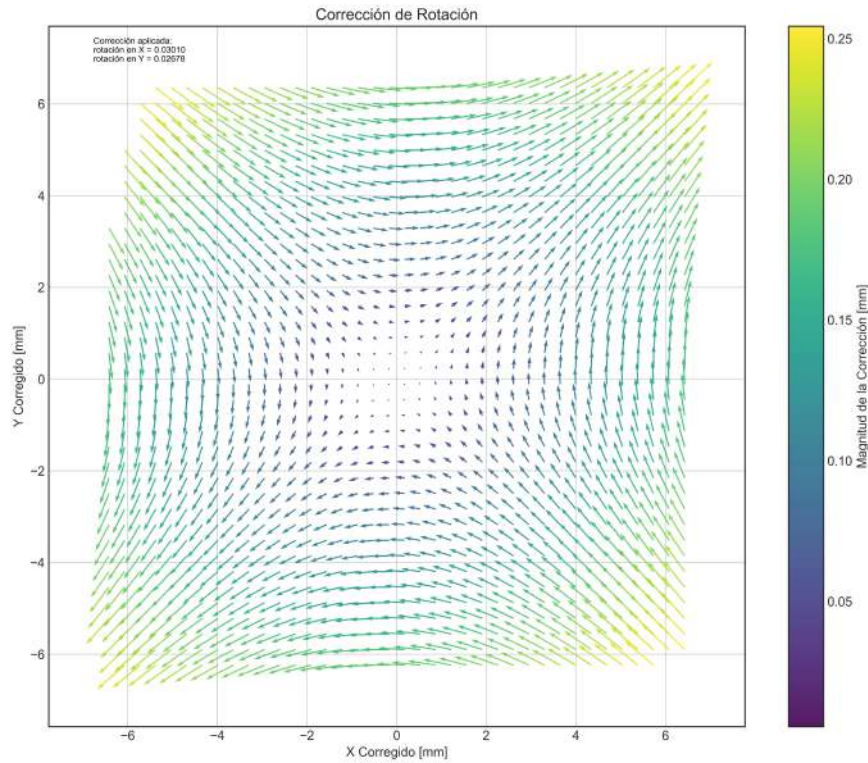


Figura 6.5: Visualización de la corrección de rotación aplicada en el plano focal. El gráfico de vectores muestra el desplazamiento inducido en las coordenadas corregidas por los términos de rotación b_x y b_y , correspondientes a las correcciones de rotación en los ejes X y Y , respectivamente. Las magnitudes de las correcciones se indican en la barra de colores a la derecha, donde las variaciones en el rango de 0.05 mm a 0.25 mm representan el impacto diferencial en la precisión astrométrica en función de la posición en el sensor.

El desplazamiento observado (ver Fig. 6.6) es relativamente pequeño en términos absolutos, pero su impacto debe evaluarse en función del contexto del estudio y la precisión requerida en las observaciones astrométricas. En astrometría, incluso pequeñas discrepancias pueden traducirse en errores angulares significativos, afectando la precisión de la medición de posiciones estelares. Es importante destacar que, dado que el tamaño de un píxel es de 0.013 mm, el desplazamiento observado corresponde aproximadamente a 1.36 píxeles en X y 2.43 píxeles en Y , lo que podría ser relevante en análisis general.

Si el desplazamiento es constante y bien caracterizado, como en este caso, puede ser corregido en el software de reducción de datos. Sin embargo, si el desplazamiento es variable (por efectos térmicos, flexión del telescopio, etc.), podría presentar un desafío mayor para mantener la precisión astrométrica.

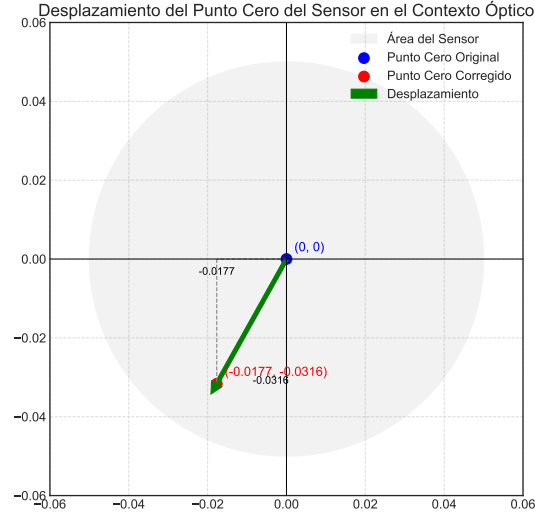


Figura 6.6: El gráfico muestra la posición original del punto cero del sensor (en azul) y su posición corregida (en rojo) tras la aplicación de los ajustes correspondientes en c_x y c_y . La flecha verde indica el vector de desplazamiento resultante, que sugiere un sesgo sistemático en la alineación del sensor. Este desplazamiento podría ser causado por factores como la desalineación del sensor respecto al sistema óptico o aberraciones inherentes al diseño óptico.

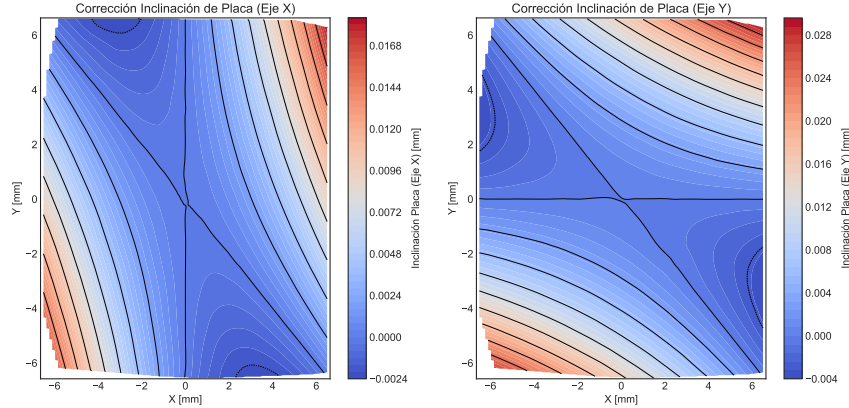


Figura 6.7: Mapas de corrección de inclinación de placa en los ejes X e Y, representados como campos interpolados sobre el plano focal. El gráfico de la izquierda muestra la corrección necesaria en la dirección X del plano focal, mientras que el gráfico de la derecha presenta la corrección en la dirección Y. Esta separación en dos gráficos permite analizar cómo la inclinación de la placa afecta de manera diferente cada eje, proporcionando claridad en la interpretación de las correcciones necesarias. Los colores indican la magnitud de la corrección en milímetros, con tonos cálidos mostrando mayores correcciones positivas y tonos fríos correcciones negativas. Las discrepancias entre los dos gráficos pueden señalar que la inclinación afecta de manera diferente a las dos direcciones, lo que es crucial para el ajuste y calibración de sistemas ópticos.

Los términos de inclinación p_x y p_y , con valores estimados de 2.17×10^{-4} rad y 3.61×10^{-4} rad respectivamente, revelan una distorsión geométrica menor en la orientación del plano del sensor. Aunque la magnitud de estos valores es reducida, su existencia es significativa ya que indica una ligera inclinación del plano focal respecto al sensor, una condición que resulta en una variación anisotrópica en la escala de la imagen a través del campo de visión del sensor. Esta anisotropía se debe a que la inclinación de la placa afecta de manera diferente a las direcciones X e Y, como se puede observar en los gráficos de corrección de inclinación (ver Fig. 6.7).

El primer gráfico representa la corrección en la dirección X del plano focal, mientras que el segundo muestra la corrección en la dirección Y. La visualización por separado de estas correcciones es crucial, ya que permite identificar cómo la inclinación de la placa impacta diferencialmente en ambos ejes. En el caso de una inclinación anisotrópica, se pueden esperar discrepancias entre los patrones observados en cada gráfico, lo cual es fundamental para diagnosticar y corregir la alineación del sensor. Este tipo de análisis sirve para asegurar la precisión en los sistemas de medición astrométrica, ya que incluso pequeñas variaciones pueden introducir errores significativos en la determinación de posiciones estelares.

Los términos de distorsión d_1 y d_3 en el modelo astrométrico proporcionan una corrección para las distorsiones geométricas que afectan el campo de visión del sensor. Estos términos están asociados con componentes cúbicos en las ecuaciones que describen la curvatura del campo, corrigiendo de manera precisa las deformaciones inducidas por la óptica del sistema. En particular, los valores estimados para d_1 y d_3 fueron de $d_1 = -1.97 \times 10^{-4}$ (mm²) y $d_3 = -2.11 \times 10^{-4}$ (mm²), lo que revela una distorsión sistemática en las coordenadas x e y que sigue un comportamiento cuadrático a lo largo del campo de visión.

La curvatura del campo óptico, es responsable de que las imágenes de objetos situados en los bordes del campo se deformen más que las situadas cerca del centro. Los términos d_1 y d_3 ajustan esta distorsión, asegurando que las posiciones registradas en el sensor reflejen con mayor precisión las posiciones verdaderas de los objetos celestes (ver Fig. 6.8).

Es importante distinguir estos términos de s_3 , que también representa un componente cúbico, pero en el contexto de la distorsión radial. Mientras que s_3 se refiere a una distorsión que afecta simétricamente en función de la distancia radial

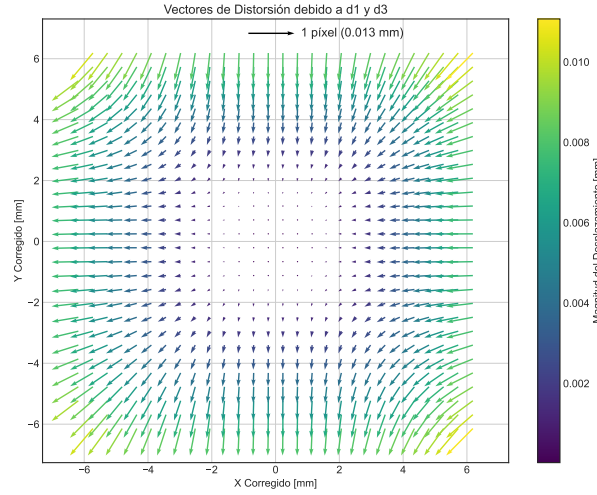


Figura 6.8: Representación de los vectores de distorsión en el plano focal inducidos por los términos cúbicos d_1 y d_3 , los cuales modelan las deformaciones geométricas del sistema óptico. Los vectores indican los desplazamientos en las coordenadas X e Y , cuya magnitud es codificada por el mapa de colores. Estos términos son cruciales para corregir la curvatura del campo, una distorsión común en sistemas ópticos donde la imagen proyectada no es perfectamente plana. La distorsión es más pronunciada en los bordes del campo de visión, como se observa por la mayor magnitud de los desplazamientos en esas regiones, sugiriendo que d_1 y d_3 capturan una componente significativa de la distorsión que varía cuadráticamente con la distancia desde el centro del campo de visión. La inclusión de una referencia de 1 píxel (0.013 mm) permite cuantificar la relevancia de estos desplazamientos en el contexto de la resolución del sensor, destacando que, aunque las magnitudes son pequeñas en términos absolutos, son significativas en relación con la escala del píxel.

desde el centro óptico, los términos d_1 y d_3 son más complejos, al estar asociados con la distorsión en un plano cartesiano. Esta distorsión cartesiana puede manifestar efectos más específicos y localizados, tales como la inclinación del plano focal o variaciones en la distorsión que dependen de la posición específica en el campo. No obstante, la inclusión de ambos en un modelo puede dar lugar a colinealidad, complicando la determinación precisa de los parámetros. Por lo tanto, evaluar la colinealidad y considerar la simplificación del modelo eliminando términos redundantes o menos justificados, fue un paso importante en la mejora de la precisión del presente ajuste.

En nuestro caso la colinealidad fue calculado con un VIF (Factor de Inflación de Varianza). En particular el término s_3 tanto con d_1 como con d_3 rondó un factor de 1.43 - 1.77, lo cual indica que las variables no están fuertemente correlacionadas y que su inclusión conjunta en el modelo es adecuada. Pero con d_2 resultó en un factor de 4.32, lo que indicaba una fuerte colinealidad entre el término s_3 y d_2 .

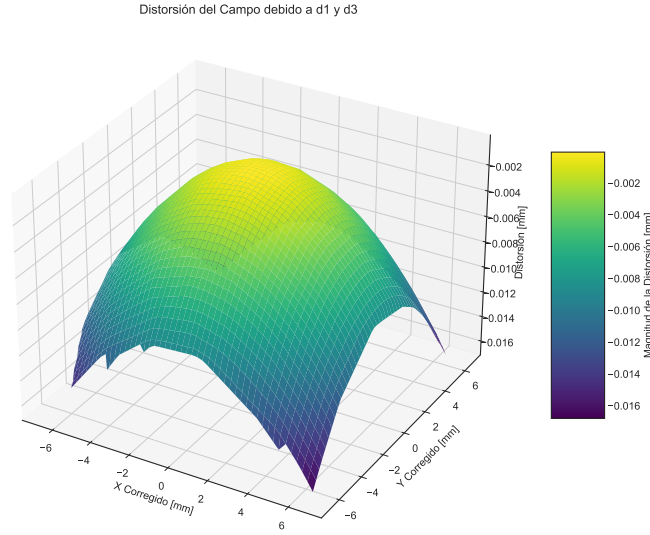


Figura 6.9: Visualización tridimensional de la distorsión del campo inducida por los términos cúbicos d_1 y d_3 , los cuales son responsables de modelar las deformaciones geométricas presentes en el plano focal. La superficie generada ilustra cómo la distorsión se distribuye de manera anisotrópica a lo largo del campo de visión, con una magnitud que varía desde -0.016 mm en las regiones periféricas hasta 0.002 mm en las áreas más centrales. Esta distorsión, caracterizada por una curvatura cóncava, es típica en sistemas ópticos donde la geometría del plano focal se deforma debido a efectos como la curvatura del campo o aberraciones en el sistema de lentes. El análisis de esta distorsión es fundamental para garantizar que las posiciones observadas de los objetos celestes se correspondan con sus posiciones verdaderas en el cielo, minimizando errores sistemáticos.

Por otro lado, d_2 a la hora de ejecutar el modelo fue el término con mayor error relativo, mostrando un porcentaje 48.3 %, no siendo significativo en el modelo y por lo mismo fue retirado.

El análisis tridimensional de la distorsión del campo inducida por d_1 y d_3 muestra una superficie cóncava (ver Fig. 6.9), indicando que la distorsión aumenta hacia los bordes del plano focal, mientras que es menos pronunciada en el centro. Este patrón es consistente con la corrección necesaria para contrarrestar la curvatura del campo en sistemas ópticos. La distorsión varía desde aproximadamente -0.016 mm en los extremos hasta 0.002 mm en el centro, con una distribución que es simétrica, lo que indica que el modelo está capturando de manera efectiva las deformaciones inducidas por la óptica. La distorsión residual, aunque de pequeña magnitud, puede ser problemática en observaciones de alta precisión. Es en este contexto donde la separación y correcta modelación de s_3 frente a d_1 y d_3 cobra relevancia.

Tabla 6.4: Ajuste de parámetros con cifras significativas.

Parámetro	Valor Estimado	Error Estándar
Escala a_x	0.998	± 0.000329
Escala a_y	0.999	± 0.000333
Rotación b_x (rad)	0.0301	± 0.00150
Rotación b_y (rad)	0.0268	± 0.00134
Punto Cero c_x (mm)	-0.0177	± 0.000790
Punto Cero c_y (mm)	-0.0316	± 0.000785
Inclinación p_x (rad)	0.000217	± 0.0000327
Inclinación p_y (rad)	0.000361	± 0.0000340
Coficiente d_1 (mm ²)	-0.000197	± 0.00000933
Coficiente d_3 (mm ²)	-0.000211	± 0.00000953

Las correlaciones entre los parámetros del modelo de distorsión radial y del modelo de placa, como se presenta en la Tabla 6.5, juegan un papel fundamental en la evaluación de la robustez y la fiabilidad del modelo astrométrico. Estas correlaciones pueden revelar la interdependencia entre diferentes parámetros, lo que es crucial para evitar problemas de colinealidad que puedan afectar la precisión de los ajustes y la interpretación de los resultados. En el contexto del modelo de distorsión radial y de placa, las correlaciones permiten entender cómo se relacionan los distintos términos que describen la distorsión y la escala en los ejes X e Y del sistema de coordenadas. Por ejemplo, una alta correlación positiva, como la observada entre $C(a_x, a_y) = +0.6241$, sugiere que los coeficientes de escala en los ejes X e Y están fuertemente relacionados. Esto implica que cualquier ajuste en a_x probablemente tendrá un efecto similar en a_y , lo que es indicativo de un comportamiento simétrico en el sistema óptico, posiblemente reflejando una distorsión similar en ambos ejes.

Por otro lado, las correlaciones negativas observadas, como $C(c_x, p_x) = -0.5856$ y $C(c_y, p_y) = -0.5788$, indican que estos parámetros tienen una relación inversa, sugiriendo una compensación entre ellos. Esto puede ser un signo de redundancia en el modelo, donde un parámetro podría estar ajustándose para compensar el efecto de otro, lo que podría complicar la interpretación de los resultados. En general, la tabla de correlaciones destaca varias relaciones importantes. Las correlaciones moderadamente negativas entre a_x y d_1 ($C(a_x, d_1) = -0.33562$) y entre a_y y d_3 ($C(a_y, d_3) = -0.33454$) indican una relación inversa moderada, sugiriendo que mientras uno de estos términos aumenta, el otro tiende a disminuir. Esto

podría señalar una interacción entre la escala de placa y la distorsión, lo que es relevante para la precisión del modelo.

Asimismo, las correlaciones fuertes entre b_x y b_y ($C(b_x, b_y) = -0.5891$) y entre a_x y a_y ($C(a_x, a_y) = +0.6241$) sugieren una simetría en los ajustes de estos parámetros en ambos ejes, lo que es importante para garantizar que la corrección sea uniforme en todo el campo de visión.

En resumen, las correlaciones entre los parámetros del modelo y entre modelos proporcionan una visión importante de la interacción entre diferentes componentes del modelo de distorsión radial y de placa. Un análisis de estas correlaciones siempre es relevante para evitar colinealidades que puedan comprometer la precisión del ajuste y para asegurarse de que el modelo captura de manera adecuada las complejidades de las distorsiones presentes en el sistema óptico.

Tabla 6.5: Correlaciones entre parámetros del modelo de distorsión.

Parámetros	Correlación
$C(a_x, d1)$	-0.33562
$C(a_y, d3)$	-0.33454
$C(a_x, a_y)$	+0.6241
$C(c_x, p_x)$	-0.5856
$C(c_y, p_y)$	-0.5788
$C(a_y, d1)$	-0.4112
$C(a_x, d3)$	-0.4022
$C(b_x, d1)$	-0.3058
$C(b_y, d3)$	-0.2954
$C(b_x, b_y)$	+0.5891

6.1.3. Resultado del modelado Falcon-ULS

El análisis de los parámetros del modelo tiene implicaciones directas en la evaluación y mejora del sistema de medición. En la práctica, esto podría significar ajustes físicos al hardware del telescopio o modificaciones al software de procesamiento de imágenes para compensar la distorsión óptica. La precisión con la que se conocen estos parámetros afecta de manera crítica la calidad de los datos recopilados y la confiabilidad de las inferencias subsiguientes. Por tanto, la interpretación de estos parámetros es esencial para asegurar la integridad de los datos y la veracidad de las conclusiones científicas derivadas en la red de telescopios.

Aunque los términos presentados no entregan valores alarmantes, es notable que existen distorsiones en el plano focal, las cuales pueden ser corregidas a través del presente de este modelo.

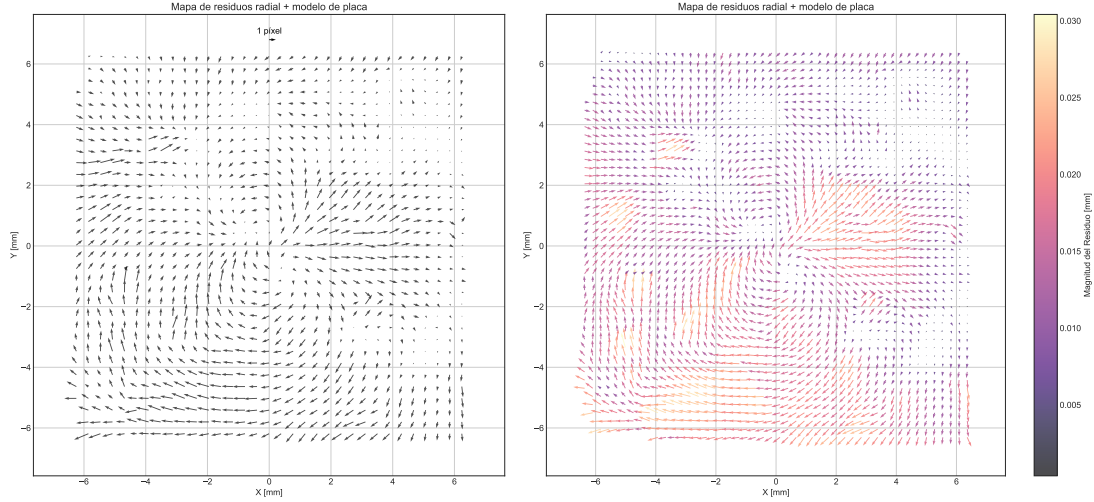


Figura 6.10: Este gráfico presenta mapas de los residuos después de aplicar tanto el modelo de distorsión radial como el modelo de placa. A la izquierda, se muestra un mapa de los residuos donde los vectores representan las desviaciones restantes después de aplicar ambos modelos. El gráfico de la derecha es una visualización más detallada de los mismos residuos, donde el color de los vectores varía según la magnitud del residuo, permitiendo una evaluación visual de las regiones en el campo de visión donde las correcciones fueron menos efectivas. Las magnitudes más altas de los residuos, marcadas en tonos cálidos, sugieren áreas donde la combinación de los modelos no logró mitigar completamente las distorsiones, mientras que los tonos más fríos indican zonas con menor discrepancia.

Uno de los propósitos centrales de esta investigación era materializar visualmente los errores inherentes al sistema óptico mediante la interpretación gráfica de los residuos. La Figura 6.10 ilustra un mapa de distorsión del plano focal completo de los residuos que persisten después de la aplicación de los modelos de distorsión radial y de placa en el telescopio FALCON-ULS, empleando una interpolación lineal para generar una representación coherente de los vectores residuales más cercanos. La interpolación lineal utilizada en las figuras facilita la percepción de esta distorsión y permite identificar zonas de mayor afectación por medio de un mapa cromático que utiliza tonalidades cálidas para resaltar magnitudes más grandes de residuos lo que es esencial para orientar futuras correcciones.

Estos residuos se obtuvieron comparando las coordenadas de los objetos observados con las coordenadas corregidas mediante la solución radial-cartesiana de la placa sintética obtenida a través del catálogo Gaia DR3 (Gaia Collabora-

tion et al. (2023)), proporcionando una representación precisa de las discrepancias remanentes en el sistema óptico.

En el gráfico de la izquierda, se visualizan las direcciones y magnitudes de los residuos en escala de grises, destacando las desviaciones respecto a la posición “real” de los objetos. Esto permite identificar patrones de distorsión que podrían no ser evidentes de otra manera, además se expone una referencia con el tamaño de un píxel del sensor.

La interpolación lineal aplicada no solo mejora la resolución espacial del mapa, permitiendo una mayor densidad de vectores en áreas críticas, sino que también ofrece una mejor comprensión de la distribución espacial de las distorsiones. Esto es determinante para la evaluación del rendimiento del sistema óptico, ya que permite detectar cualquier patrón sistemático o anomalía que no haya sido completamente corregido.

A pesar de la efectividad de las correcciones aplicadas, la persistencia de ciertos patrones residuales subraya la necesidad de considerar efectos sistemáticos adicionales o incluso aleatorios que aún no han sido completamente mitigados. Este tipo de análisis es indispensable en astrometría, donde la precisión extrema es necesaria para mediciones estelares confiables.

La investigación también incluye un estudio sobre la dirección angular de los vectores residuales (ver Fig. 6.11) el cual puede ayudar a visualizar tendencias o patrones en el plano focal que pueden ser parte de influencias sistemáticas. Un mapa de intensidad (ver Fig. 6.12) contribuye al desarrollo de métodos correctivos, como la aplicación de máscaras específicas, pero principalmente ayuda a seccionar regiones en el plano focal para reconocer los sectores donde las diferencias de las posiciones observadas de los objetos con las posiciones reales son mayores.

El análisis de nuestro procedimiento astrométrico revela implicaciones significativas para el procesamiento de imágenes astronómicas. El método astrométrico empleado ha desentrañado un patrón de error sistemático en el aparato óptico, que, si bien puede manifestarse en magnitudes aparentemente pequeñas al nivel individual, culmina en un desplazamiento medio discernible y no nulo de $0.82''$ en Ascensión Recta en dirección al Este, y de $0.91''$ en Declinación hacia el Norte, asumiendo que el eje del CCD está orientado de manera estándar con el Norte y el Este en incrementos positivos.

Los promedios de las diferencias calculados se refieren a la media aritmética

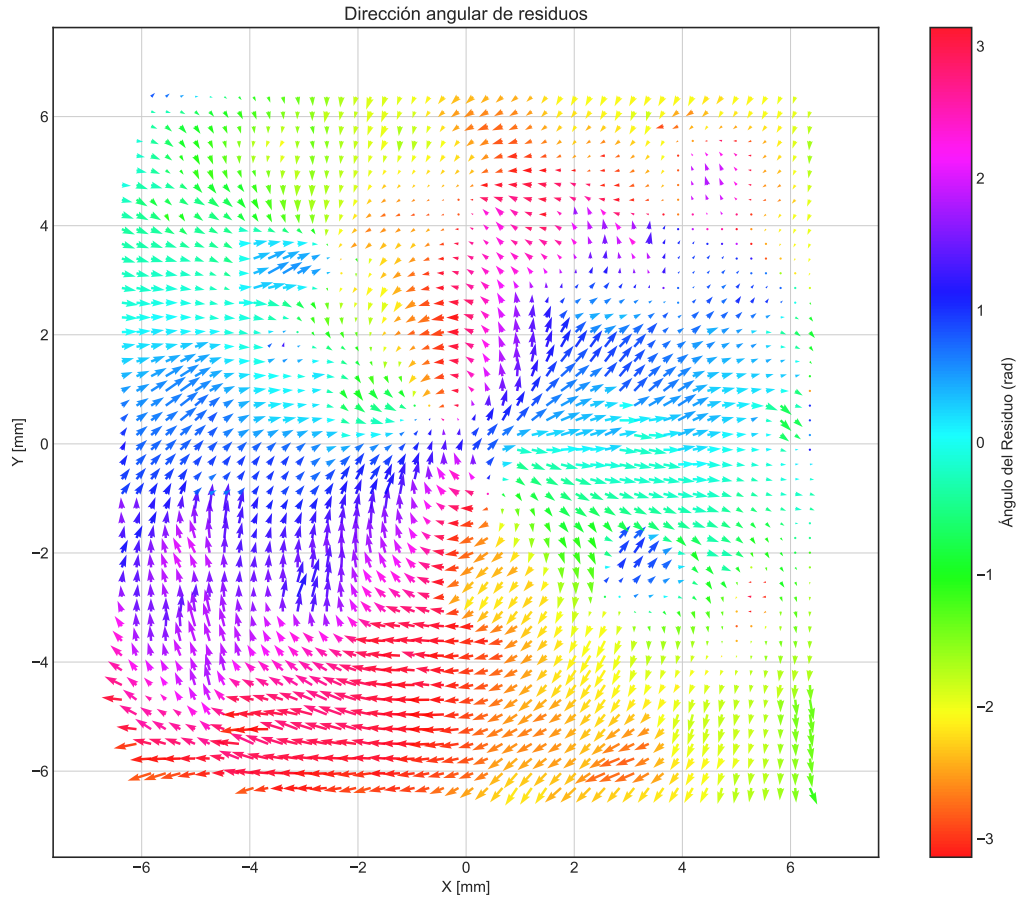


Figura 6.11: Este gráfico ilustra la dirección angular de los residuos tras la aplicación de los modelos de distorsión radial y de placa en el sistema óptico del telescopio FALCON-ULS. Cada flecha representa un vector residual, donde su orientación muestra la dirección del error residual en el plano focal, y la coloración indica el ángulo de dicho residuo en radianes. Los colores se distribuyen según una escala que va de -3 a 3 radianes, lo que permite identificar zonas con diferentes patrones de orientación residual. Este análisis es útil para detectar anisotropías y patrones sistemáticos que no han sido completamente corregidos por los modelos aplicados.

de las diferencias entre las coordenadas corregidas y las coordenadas originales (medidas en segundos de arco). Estas diferencias dan una idea de cuánto cambian las posiciones de los objetos después de aplicar la corrección o ajuste.

Estos valores son particularmente significativos cuando se consideran observaciones donde la precisión es fundamental. Por ejemplo, el tamaño aparente de estrellas en imágenes CCD puede ser tan solo de $1.0''$, lo que significa que un error de $0.91''$ puede resultar en una estimación errónea del tamaño real o la forma de los cuerpos celestes, afectando directamente a la clasificación y al análisis de sus características físicas.

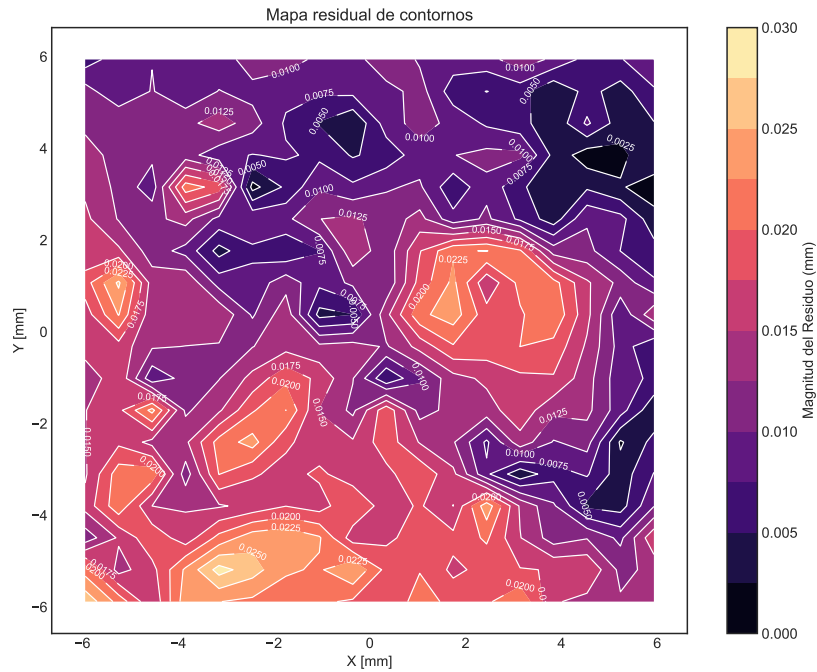


Figura 6.12: Mapa residual de contornos tras la aplicación de los modelos de distorsión radial y de placa al sistema óptico del telescopio FALCON-ULS. Este gráfico ilustra la distribución de los residuos astrométricos en el plano focal, derivada de la calibración del campo estelar observado. Las líneas de contorno, representadas en milímetros, indican niveles equidistantes de discrepancia entre las posiciones observadas y las referencias teóricas previamente establecidas. La gradación de colores, que varía de 0 a 0.030 mm, permite identificar visualmente las zonas del campo focal con mayores magnitudes residuales, reflejando las áreas donde la corrección aplicada no ha sido completamente efectiva. Este análisis revela la estructura de los errores sistemáticos intrínsecos al sistema óptico, destacando una concentración progresiva de desviaciones desde el núcleo central hacia los extremos del campo de visión.

Además, en el campo de la astrometría satelital, donde la localización exacta de los satélites es esencial para la navegación y la comunicación, un desajuste de $0.91''$ en Declinación podría implicar problemas para el seguimiento y el mantenimiento de las órbitas satelitales. Esto podría resultar en una disminución de la precisión en el posicionamiento global y en la sincronización, lo que a su vez afectaría a una multitud de aplicaciones dependientes de tecnología satelital.

El impacto de tales errores se amplifica cuando se considera el volumen de datos recopilados durante las observaciones astronómicas extensivas. La acumulación de estas desviaciones puede sesgar los resultados de estudios a gran escala, como las encuestas de cartografía del cielo, donde la precisión en la localización de cada objeto es crucial para la construcción de mapas celestes exactos y el análisis de grandes estructuras del universo.

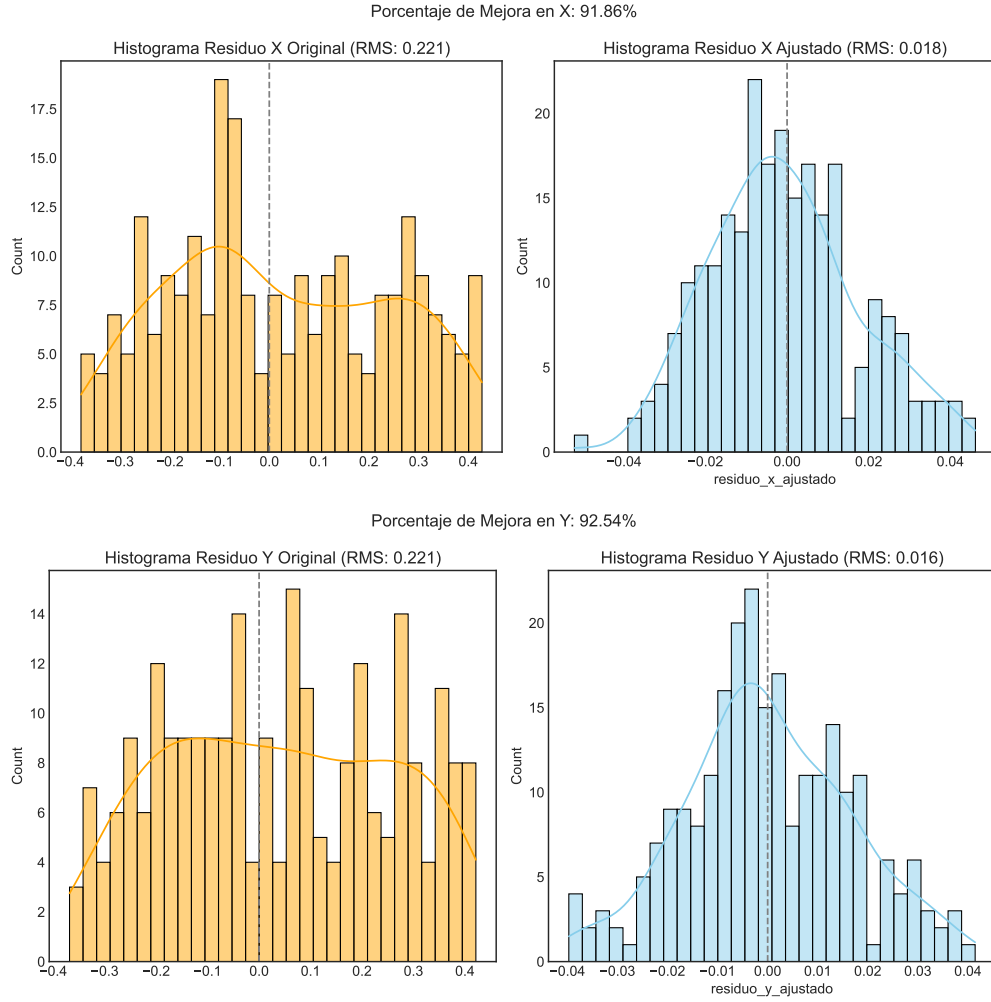


Figura 6.13: Comparación de los histogramas de residuos antes y después de aplicar el modelo de corrección astrométrica en las componentes X e Y . Los histogramas ajustados muestran una reducción significativa en la dispersión, con una mejora del 91.86 % en X y del 92.54 % en Y , lo que destaca la efectividad del modelo correctivo en la mejora de la precisión astrométrica.

Por tanto, la corrección de estos errores sistemáticos es de suma importancia. Nuestro trabajo apela a la necesidad de un calibrado meticuloso y una validación constante de los sistemas ópticos utilizados en astronomía. La implementación de modelos de corrección más refinados, junto con algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes, promete disminuir estas desviaciones y mejorar la precisión de nuestras mediciones astronómicas.

Finalmente, la aplicación del modelo de corrección astrométrica ha demostrado una mejora significativa en las posiciones medidas, tal como se evidencia en la comparación de los histogramas de residuos antes y después del ajuste (ver Fig.

6.13). Los residuos originales (después del ajuste por refracción atmosférica), con un RMS de 0.221 tanto en X como en Y , reflejaban una considerable dispersión en torno a cero, sugiriendo la presencia de errores sistemáticos y aleatorios que afectaban la precisión de las posiciones estelares.

Con la implementación del modelo de corrección, los residuos ajustados presentan una reducción notable en su dispersión, con un RMS reducido a 0.018 en X y 0.016 en Y . Esto corresponde a un porcentaje de mejora del 91.86 % y 92.54 % en las componentes X e Y , respectivamente. Esta reducción en la dispersión indica que el modelo ha sido altamente efectivo en minimizar los errores presentes, acercando los residuos a una distribución normal ideal centrada en cero.

El impacto de estas mejoras es crucial en astrometría, ya que una reducción en la dispersión de los residuos se traduce directamente en una mayor precisión en la determinación de posiciones estelares. El análisis comparativo de los histogramas subraya la capacidad del modelo para corregir las distorsiones presentes en los datos originales, proporcionando mediciones más confiables y precisas para futuras observaciones y estudios astrométricos.

Complementando el trabajo, se realiza la creación de máscaras astrométricas (ver Fig 6.14) de corrección que pueden ser generadas individualmente para cada sistema al que sea probado el código. Esto emerge como una estrategia clave para asegurar la precisión requerida en el seguimiento astronómico y satelital, facilitando así la consecución de precisiones uniformes a lo largo de toda la red FALCON y otros sistemas ópticos. Este procedimiento resulta especialmente beneficioso para las observaciones bi-hemisféricas, permitiendo el manejo de deltas de posición calculados y controlados, los cuales revisten gran importancia para la optimización y el rendimiento global de la red.

Este esfuerzo para alcanzar la precisión astrométrica no solo es un desafío técnico, sino también una necesidad imperativa en la era de la astronomía de precisión. A medida que avanzamos hacia la exploración de fenómenos celestes con escalas de tiempo y espaciales cada vez más finas, la demanda de exactitud en nuestras mediciones es intransigente. Con este fin, la investigación y el desarrollo continuo en técnicas astrométricas, alineadas con la evolución de la tecnología de sensores y procesamiento de datos, se convierten en un pilar central de la astronomía contemporánea y de nuestro empeño por comprender el cosmos con la mayor fidelidad posible.

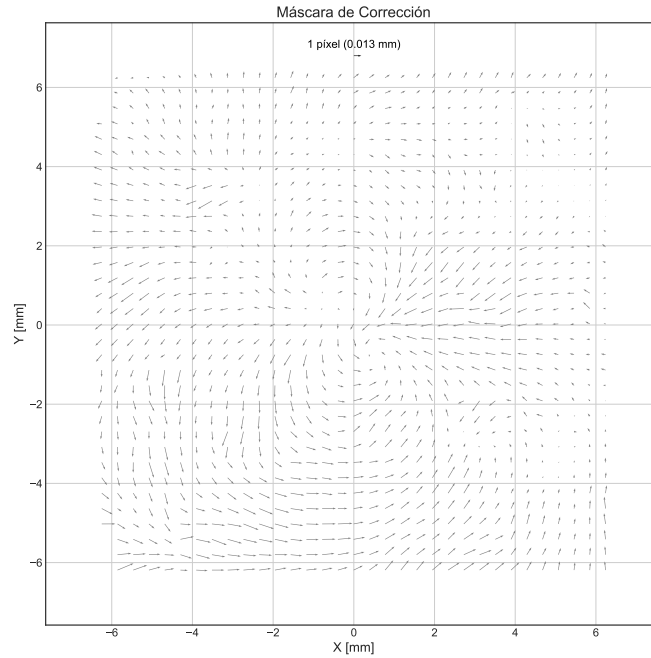


Figura 6.14: Máscara de Corrección derivada de los datos observacionales procesados mediante el sistema de reducción astrométrica. Este campo vectorial representa las correcciones necesarias que deben aplicarse a las posiciones medidas de los objetos astronómicos para que coincidan con las posiciones teóricas en un sistema de referencia dado. La longitud de cada vector indica la magnitud de la corrección en términos de desplazamiento, mientras que la dirección muestra el sentido de la desviación de las posiciones originales. El campo se presenta sobre una grilla en el plano XY (en milímetros), permitiendo una visualización clara de cómo las distorsiones varían espacialmente a lo largo del campo. En la parte superior se muestra una escala de referencia de 1 píxel, correspondiente a 0.013 mm, que proporciona un punto de referencia para la interpretación de la magnitud de las correcciones. Este análisis es crucial para la calibración y mejora de la precisión astrométrica, especialmente en sistemas donde se requiere alta exactitud. La implementación efectiva de este campo de corrección tiene la capacidad de mitigar adecuadamente las distorsiones presentes en el sistema óptico y las posibles no-linealidades asociadas con la geometría de la imagen.

6.2. Análisis FALCON-CMU

Tras la conclusión de nuestras observaciones iniciales con la unidad local de la Red de Telescopios FALCON, nos propusimos explorar las características astrométricas de otras unidades de la red. A pesar de la homogeneidad técnica entre los 12 telescopios, las diferencias sutiles en las distorsiones ópticas de cada unidad pueden ofrecer una rica fuente de información sobre la influencia de variables externas, tales como las condiciones climáticas y los efectos acumulativos del uso en la precisión astrométrica. Con este fin, se estableció una colaboración con los encargados de un observatorio hermano en Colorado, Estados Unidos,

desde el cual se obtuvieron datos de un campo estelar que presentaba similitudes con los observados por el FALCON-ULS. Aunque los datos recopilados no reproducían completamente el conjunto de condiciones de nuestras observaciones locales, se realizó un ajuste basado en el código presentado anteriormente para asegurar la comparabilidad de los resultados. La implementación de nuestro algoritmo de procesamiento de datos sobre este nuevo conjunto de observaciones ha permitido identificar gran parte de las variaciones instrumentales de la unidad, que se discutirán en las secciones siguientes. Esta comparación inter-observatorio no solo valida nuestra metodología en diferentes condiciones, sino que también proporciona conocimientos cruciales para la calibración futura de la red global de telescopios. Apreciamos profundamente la asistencia y cooperación de Timothy Giblin y Francis Chun de la USAFA, cuya contribución fue indispensable para ampliar el alcance de nuestro estudio astrométrico.

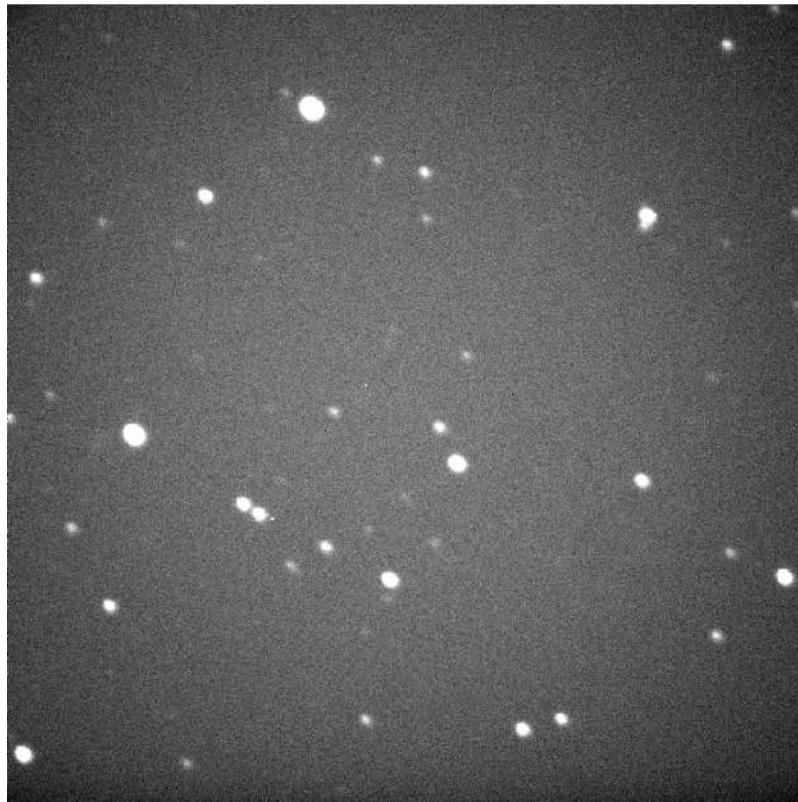


Figura 6.15: Registro de datos obtenidos por la unidad FALCON-CMU utilizando el filtro R. La exposición fue de 30 segundos en condiciones ambientales controladas, con una temperatura de 22.8°C y una humedad relativa del 28 %,s. La imagen documenta la distribución de las fuentes estelares en el campo visual y es fundamental para la calibración astrométrica y fotométrica del sistema óptico. Los parámetros atmosféricos registrados son cruciales para la corrección de la refracción astronómica y se toman en cuenta en el procesamiento subsecuente de los datos.

Como se mencionó previamente, la adquisición de la imagen se efectuó bajo parámetros distintos a los de la unidad local. En particular, se empleó el filtro R de Johnson, que forma parte del conjunto estándar de filtros en las unidades de la red. El tiempo de integración se estableció en 30 segundos. El observatorio FALCON-CMU está situado en Colorado, con coordenadas geográficas de $+38^{\circ} 57' 48.12''$ de latitud y $+108^{\circ} 14' 15.84''$ de longitud, ubicado en The Grand Mesa Observatory a una altitud aproximada de 1800 metros sobre el nivel del mar. Las observaciones se llevaron a cabo el día 2023-08-05T06:53:47.518 y el objeto presentaba coordenadas en Ra: $+17\ 38\ 35.548$, Dec: $+41\ 52\ 31.73$. Las condiciones climáticas registradas incluyeron una temperatura de 22.8°C , y una humedad relativa de 28 %.

Es imperativo esclarecer que la imagen inicial mostraba signos de contaminación significativa y una geometría estelar distorsionada. Es por este motivo que no fue posible obtener una astrometría tan precisa como la mostrada en la unidad anterior. La razón principal de esto fue que tanto la propagación de errores en las posiciones iniciales desde el momento de la extracción de fuentes, estaba limitada por la calidad de la imagen.

Es por esto, que se aclara el uso de una versión menos exigente de la reducción mostrada anteriormente, aún así el algoritmo del código fue el mismo. Se procedió con el análisis astrométrico siguiendo el procedimiento estandarizado descrito en el Capítulo 5. Se utilizó el software SExtractor con la configuración especificada para identificar fuentes astronómicas. De este modo, se detectaron 136 fuentes, de las cuales 108 fueron extraídas satisfactoriamente y 95 coincidieron con entradas en el catálogo Gaia DR3.

Para compensar la influencia de los movimientos propios estelares en las mediciones astrométricas, se efectuó una actualización del catálogo de referencia a la fecha de observación. Esta actualización es importante, ya que los movimientos propios pueden introducir desviaciones significativas en las posiciones estelares a lo largo del tiempo. Adicionalmente, se implementó el mismo modelo de refracción atmosférica de la unidad Falcon-ULS, que considera las condiciones ambientales registradas para corregir el desplazamiento aparente de las posiciones estelares causado por la variación del índice de refracción del aire con la altitud. Un aspecto importante fue que al ejecutar el modelo tuvimos que estimar valores como la presión atmosférica del lugar con respecto a la altura, debido a que a diferencia

de los datos de la unidad FALCON-ULS no se pudo estimar o registrar la presión atmosférica al momento de la observación. Aún así, al ejecutar este modelo, se identificó una discrepancia de $1.5''$ arcosegundos en la altitud con respecto a las posiciones originales de los objetos. Esta diferencia ligada a la refracción diferencial es realmente considerable y con un grado alto de incertidumbre principalmente por la forma en que los datos fueron obtenidos.

Tras la implementación del modelo astrométrico, comparable al utilizado en el análisis del telescopio FALCON-ULS, procedimos a calcular las constantes de placas correspondientes. Sin embargo, el análisis de los residuos reveló una distribución que dista de ser aleatoria. En contraste con los resultados previamente obtenidos para el telescopio FALCON-ULS, los residuos en el caso de la unidad FALCON-CMU exhibieron tendencias sistemáticas que se desvían del origen teórico. Este patrón sugiere la presencia de errores sistemáticos residuales que aún no han sido efectivamente modelados o corregidos en el sistema óptico o en el proceso de reducción de datos.

La aplicación del modelo astrométrico detallado en el Capítulo 5, produjo resultados significativos. La calibración de este modelo se basó en la optimización de las diferencias residuales entre las coordenadas observadas y las calculadas, empleando un conjunto de estrellas de referencia bien caracterizadas al igual que en el primer modelo. Los resultados de este proceso dieron lugar a un mapa de residuos (ver Figuras 6.17, 6.18) los cuales mostraron un vórtice cerca del centro óptico del plano focal, además de una distorsión radial que crece significativamente con el radio. Al analizar la Figura 6.17, es evidente que el módulo de los vectores residuales supera con crece a los del primer modelo, lo cual despertó las alertas de errores sistemáticos sin modelar o algún agente del sistema óptico o atmosférico que no se está tomando en cuenta.

La naturaleza de la distribución de residuos sugiere la influencia de factores no contemplados en el modelo inicial, tales como alineación óptica imprecisa, variabilidad en la respuesta del detector a lo largo del campo de visión, o distorsiones inducidas por el medio ambiente que afectan la propagación de la luz a través de la atmósfera. La identificación y cuantificación de estos errores son fundamentales para mejorar la precisión de las mediciones astrométricas, lo que a su vez tiene implicaciones directas en la robustez de la calibración del instrumento y la

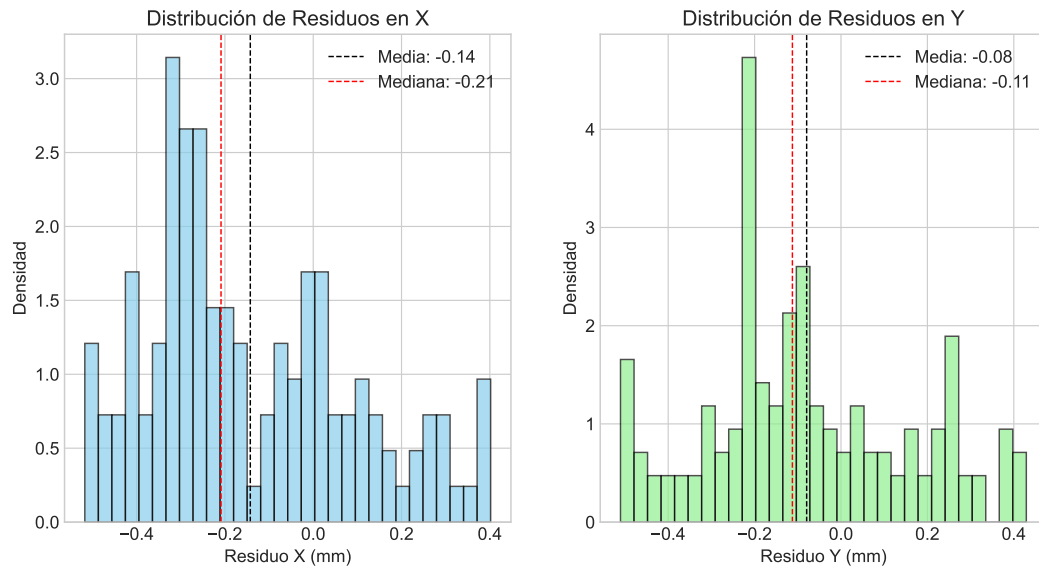


Figura 6.16: Histogramas que representan la distribución de residuos astrométricos en las coordenadas X e Y, derivados de la reducción de datos astrométricos para la unidad FALCON-CMU. Las barras azules y verdes representan la frecuencia normalizada de residuos en las direcciones X e Y, respectivamente. Las líneas discontinuas negras y rojas indican las medias y medianas de las distribuciones, situadas en -0.14 mm y -0.21 mm para X, y en -0.08 mm y -0.11 mm para Y, respectivamente. Estos valores sugieren una ligera desviación sistemática del punto de no residuo, potencialmente indicativa de errores sistémicos no corregidos en el tratamiento de datos o en la configuración instrumental. La asimetría en la distribución, particularmente en la dirección X, resalta la necesidad de revisar los modelos de calibración del instrumento y los procedimientos de reducción de datos para mejorar la precisión astrométrica.

confiabilidad de los datos astronómicos derivados.

Con el objetivo de diagnosticar y corregir estas tendencias sistemáticas, se inició un proceso de revisión de todos los posibles contribuyentes al error sistemático. Esto incluyó un análisis de la calibración de la instrumentación, así como la consideración de efectos atmosféricos adicionales que pueden haber sido subestimados. Se exploró la posibilidad de mejoras de ajustes en los algoritmos de reducción de datos o una recalibración más profunda de los parámetros del telescopio pudieran atenuar estas tendencias observadas en los residuos.

En el curso de nuestro estudio, replicamos el procedimiento astrométrico aplicado al telescopio FALCON-ULS para la unidad FALCON-CMU, ajustando las constantes de placas según el modelo establecido. Sin embargo, la persistencia de errores sistemáticos en los residuos sugiere la presencia de desviaciones no modeladas inherentes al sistema óptico. Frente a esta situación, optamos por no incrementar el orden de los polinomios en nuestro modelo de escala de placa, ni

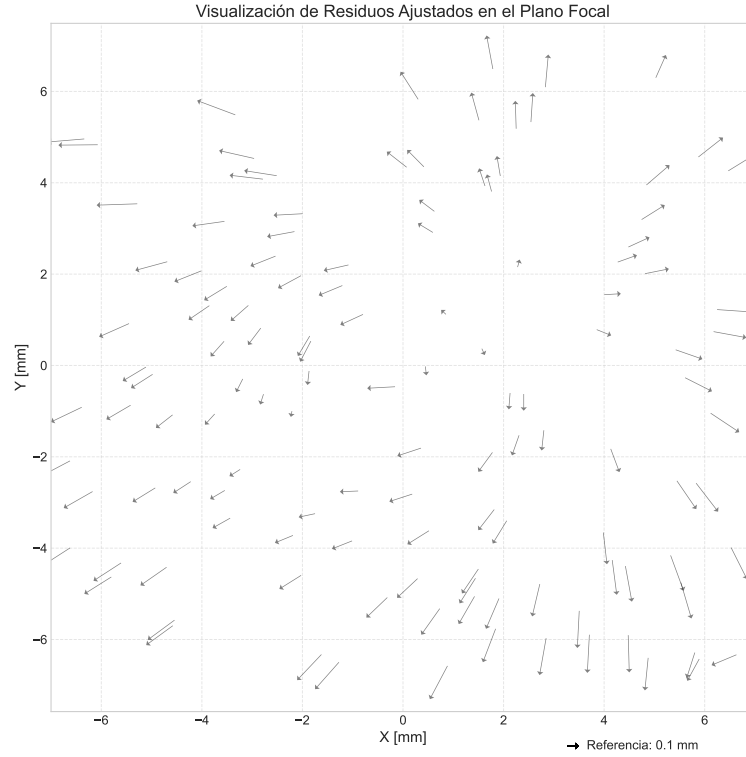


Figura 6.17: Visualización detallada de los residuos astrométricos en el plano focal tras la calibración realizada con la unidad FALCON-CMU. El diagrama vectorial muestra la magnitud y dirección de las desviaciones de las posiciones observadas de las estrellas respecto a las predichas, representadas en milímetros en el plano del detector. Una flecha de referencia situada en la parte inferior derecha indica una desviación de 0.1 mm para facilitar la interpretación visual. La distribución y orientación de las flechas sugieren patrones de error sistemático, posiblemente atribuibles a distorsiones ópticas o alineación imperfecta del telescopio. Tales patrones son cruciales para el refinamiento de modelos de calibración y para la evaluación de la idoneidad del sistema óptico para observaciones de alta precisión.

tampoco incluir términos angulares en el modelo radial.

Esta decisión se fundamenta primeramente en la consideración metodológica de que un modelo excesivamente complejo podría ocultar más que revelar, llevando potencialmente a un sobre ajuste en la modelación de las distorsiones que generan ruido en lugar de señales sistemáticas genuinas que aporten a nuestro entendimiento de los fenómenos subyacentes.

La elección de no proceder con un modelo de mayor complejidad también estuvo motivada por la ausencia de datos críticos de la placa, lo que restringe nuestra capacidad para realizar ajustes con un mayor grado de certidumbre. Asimismo, se reconoce que la exclusión de variables climáticas en el modelo de refracción representa una limitación en nuestra reducción astrométrica. Dicha omisión intro-

Tabla 6.6: Ajuste de parámetros del modelo para FALCON-CMU.

Parámetro	Valor Estimado	Error Estándar
Scale a_x	0.94	± 0.0046
Orientation b_x (rad)	-0.0045	± 0.0030
Zero Point c_x (mm)	0.0097	± 0.0035
Scale a_y	0.94	± 0.0045
Orientation b_y (rad)	-0.0047	± 0.0029
Zero Point c_y (mm)	0.16	± 0.0096
Tilt p_x (rad)	2.1×10^{-4}	$\pm 1.0 \times 10^{-4}$
Tilt q_y (rad)	0.0041	$\pm 2.8 \times 10^{-4}$

Tabla 6.7: Ajuste de parámetros de distorsiones radiales.

Parámetro	Valor Estimado (mm/deg)	Error Estándar
s_3	0.0037	$\pm 3.7\text{e-}04$
s_5	-4.6e-05	$\pm 6.9\text{e-}06$

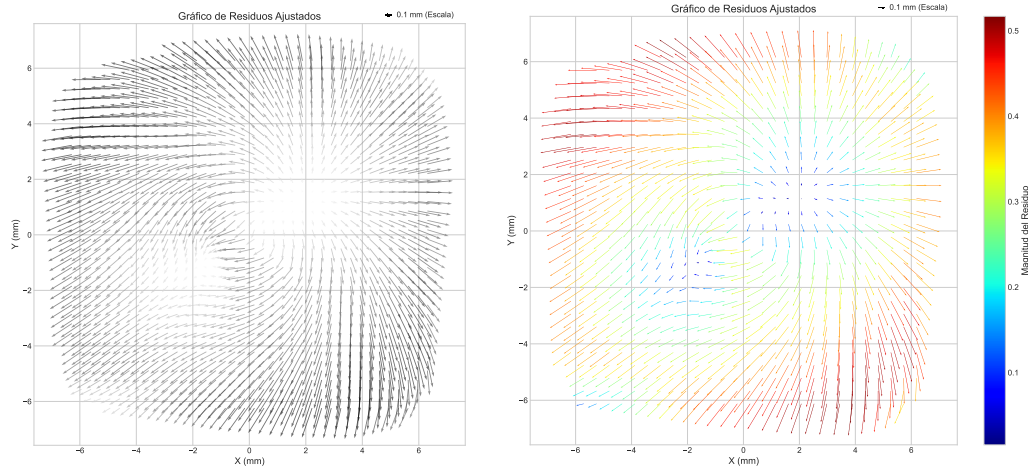


Figura 6.18: Mapa de distorsión con interpolaciones lineales en los puntos de residuos ajustados, presentado en dos paneles para comparación directa. El panel izquierdo muestra los vectores de residuos en escala de grises, indicando la dirección y magnitud de las desviaciones respecto a las posiciones predichas, sin una diferenciación cromática de la magnitud. En contraste, el panel derecho utiliza una gama de colores para representar la magnitud del residuo, con tonos más cálidos correspondientes a desviaciones mayores. Ambos paneles ilustran la distribución espacial y la magnitud de las distorsiones ópticas en un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y) expresado en milímetros, facilitando la visualización del patrón de errores sistemáticos presentes en la calibración del sistema óptico.

duce incertidumbre en los resultados finales, dejando así aspectos sin resolver que podrían afectar la precisión de nuestras mediciones.

Adicionalmente, la falta de registros detallados sobre las condiciones del espe-

jo, el 'seeing', y la transparencia atmosférica durante las observaciones, constituye una carencia significativa en nuestro conjunto de datos. Estos factores, conocidos por su influencia en la calidad de los datos astronómicos, son críticos para la interpretación precisa de las desviaciones observadas. La ausencia de esta información impide un análisis completo de las condiciones operativas y ambientales que podrían haber contribuido a los residuos observados.

En resumen, mientras que la metodología empleada ha sido robusta y en línea con las prácticas estándares en astrometría, la exclusión de ciertas variables ambientales y operativas, así como la decisión consciente de limitar la complejidad del modelo, subrayan la necesidad de recopilar datos adicionales y explorar métodos alternativos de calibración. El estudio pone de manifiesto la importancia crítica de un registro exhaustivo de las condiciones de observación y apunta hacia una futura investigación que pueda incorporar estos elementos esenciales. Ello permitiría una modelización más precisa y, potencialmente, una corrección más efectiva de los errores sistemáticos, elevando así la calidad y fiabilidad de los datos astrométricos resultantes.

Por tanto, las futuras líneas de trabajo deberán centrarse en el desarrollo de un marco de modelado más sofisticado que pueda integrar estas variables adicionales, o preferentemente en la obtención de conjuntos de datos más completos que permitan un análisis más riguroso. Esto último podría incluir la colaboración con observatorios que dispongan de registros más detallados de las condiciones de observación y que posean experiencia en la observación de datos para astrometría, junto con la implementación de protocolos mejorados para la recopilación sistemática de datos en observaciones futuras. Además, se recomienda la exploración de técnicas de análisis de datos post-observación que puedan mitigar la ausencia de información en tiempo real y compensar las deficiencias del modelo actual.

Capítulo 7

Conclusiones.

La comprensión real de la implicación que tiene una reducción astrométrica en la astronomía, así como los efectos que conlleva realizarla de forma precisa, es de suma relevancia. El trabajo astrométrico presentado en este documento reveló detalles sobre aspectos cruciales a menudo subestimados dentro de la amplia disciplina de la astronomía. Aunque la astrometría constituye un pilar fundamental en el estudio del cosmos, no siempre recibe la consideración que merece en investigaciones de alta relevancia. Esta tesis buscó abordar este tema desde un enfoque primordial en el ámbito del proyecto FALCON, evitando la tendencia preocupante de relegar variables astrométricas críticas y optando, por el uso de software de procesamiento de imágenes que operan como “cajas negras”, sin una comprensión profunda de sus algoritmos subyacentes y limitaciones.

Se ha evidenciado que cambios casi insignificantes en variables aparentemente poco relevantes, tales como cambios atmosféricos sutiles, configuraciones de software, defectos ópticos o ajustes mecánicos mínimos en los equipos, pueden tener repercusiones significativas en los datos astronómicos como se menciona en Wilson (1990). Estas influencias, a menudo ignoradas, son de vital importancia para la astronomía de posición, posicionamiento satelital y, como se ha demostrado en Utsumi et al. (2014), incluso en la cosmología, donde la astrometría cumple un rol primordial.

La mayoría de los grandes telescopios poseen rutinas de caracterización astrométrica en sus sistemas ópticos e instrumentos. Sin embargo, como revela esta tesis, en el caso de telescopios más pequeños y equipos comerciales, frecuentemente empleados en universidades y centros de investigación, las distorsiones ópticas

y errores sistemáticos no se cuantifican ni se corrigen adecuadamente. Este descuido puede propagar incertidumbres en la investigación astronómica, lo que resalta la importancia crítica de una caracterización detallada y la calibración de los instrumentos, independientemente de su escala de operación.

La presente investigación contribuyó a esta misión con un modelo astrométrico de corrección, validado a través de la observación empírica y un riguroso análisis estadístico. Este modelo no solo aborda las complejidades inherentes a las mediciones de precisión, sino que también proporciona un marco para el ajuste y la interpretación de datos astronómicos con una confiabilidad mejorada. La implementación de este modelo tiene el potencial de enriquecer el análisis en trabajos futuros y de impulsar un cambio en la metodología de observación astronómica, promoviendo una era de mayor precisión y reproducibilidad en los estudios observacionales, pero principalmente de la red de telescopios FALCON.

En estas paginas se detalla un enfoque integro hacia el proceso astrométrico, iniciando con la revitalización del telescopio FALCON-ULS tras un prolongado periodo de inactividad debido a la pandemia, seguido de la planificación y captura de imágenes astronómicas de calidad. La limpieza y preparación de los datos se efectuó utilizando Astropy, demostrando una integración fluida y eficaz, mientras que la extracción de los mismos se llevó a cabo a través de SExtractor. Esta herramienta para la detección y catalogación automática de fuentes celestes fue ajustada para optimizar la eficiencia y precisión en la identificación de objetos astronómicos. La selección y aplicación adecuadas de este software, desde una perspectiva astrométrica, presentó desafíos significativos, evidenciados durante el modelado de datos, donde distintos filtros de convolución fueron evaluados mediante diversas métricas de detección.

A pesar de que el filtro TopHat fue seleccionado por su favorable comparación en la relación de objetos extraídos frente a los identificados en el catálogo Gaia DR3, su rendimiento estadístico fue superado por otros filtros, como por ejemplo el filtro Gauss y el filtro Default logrando eficiencias de 89.20 % y 90.04 %, respectivamente. Este análisis subraya la influencia de múltiples factores en la detección de fuentes, los cuales varían significativamente en función del instrumento de observación, así como del tipo y calidad de los datos recopilados. En consecuencia, se enfatiza la importancia de llevar a cabo estudios estadísticos metódicos para cada conjunto de imágenes, como se ha presentado en este trabajo, para asegurar

una reducción astrométrica de alta precisión. Tal enfoque no solo es recomendable sino esencial para la calibración y ajuste fino de los modelos astrométricos en la investigación contemporánea.

Por otro lado se prestó especial atención al ajuste de movimientos propios de las estrellas de referencia correspondientes al catálogo Gaia DR3, un aspecto crítico para la correcta interpretación de posicionamiento de objetos, trayectorias estelares y la identificación de objetos de interés. Aunque la actualización de coordenadas del catálogo arrojó solo unos cuantos miliarcosegundos a la fecha, se debe tener en consideración para la precisión del proyecto.

En el marco de esta investigación, la modelación de la refracción atmosférica ((Damke-Calderon, 2016)) se ha abordado de manera detallada mediante el desarrollo y aplicación de un modelo basado en las recomendaciones de la Essential Routines for Fundamental Astronomy (ERFA), que incorpora variables atmosféricas en tiempo real para permitir correcciones astrométricas precisas. Este enfoque toma en cuenta la presión atmosférica, la temperatura, la humedad relativa, el tipo de filtro, entre otros aspectos, ajustando dinámicamente los cálculos de refracción para compensar los efectos de distorsión de la luz a medida que esta atraviesa las capas de la atmósfera terrestre. La implementación de este modelo ha demostrado ser fundamental, revelando diferencias de hasta $1.0''$ en las posiciones medidas. Este grado de precisión subraya la crítica necesidad de considerar las variaciones atmosféricas en tiempo real para la obtención de mediciones astrométricas de alta precisión con el modelo. Como se pudo observar en la aplicación del modelo a los datos de la unidad FALCON-CMU, la falta de registro de las condiciones al momento de la observación y la falta de experiencia en la recopilación de datos astronómicos de calidad, limitan considerablemente la eficiencia del modelo. Aun así, la capacidad del modelo ERFA para compensar efectivamente los efectos atmosféricos introdujo un avance notable en nuestra capacidad para determinar la posición real de los objetos celestes con una exactitud considerable, y estableciendo un nuevo estándar para futuras investigaciones astrométricas en el proyecto FALCON.

En este modelo también se ha profundizado en el análisis crítico de las transformaciones de coordenadas, enfatizando la importancia de variables fundamentales como la hora y ubicación exactas de las observaciones.

Esta particular atención a los detalles es crucial para la conversión precisa entre distintos sistemas de referencia, permitiendo una interpretación impecable de los datos observacionales dentro de los complejos marcos de la mecánica celeste y la dinámica orbital. Se ha implementado un enfoque estricto en la aplicación y doble corrección de técnicas avanzadas para la verificación de la exactitud astrométrica, asegurando la máxima calidad y fiabilidad de los datos recolectados. Este análisis no solo destaca la necesidad de una precisión extrema en la astrometría para interpretar correctamente las posiciones y movimientos de los cuerpos celestes, sino que también resalta cómo la precisión instrumental y la calibración se entrelazan intrínsecamente con la precisión de las mediciones.

En este estudio, se aplicó inicialmente un modelo de distorsión radial para capturar con mayor fidelidad las desviaciones del comportamiento óptico del sistema. Este modelo incluyó términos lineales y no lineales tales como s_0 , s_θ , s_3 y s_5 , permitiendo la corrección de las distorsiones presentes en el campo de visión. La profundización del análisis mediante este barrido radial complementó el modelo, facilitando la resolución de polinomios que desvelaron distorsiones caracterizadas desde el eje óptico hasta los bordes del plano focal. Posteriormente, se logró la convergencia de las placas sintéticas y observadas hacia un marco común en el plano focal mediante un enfoque astrométrico integral basado en coordenadas cartesianas. Este enfoque permitió la caracterización precisa del plano focal a través de polinomios lineales, revelando parámetros esenciales como la orientación, el punto cero, la escala y la inclinación del sensor, definidos por las constantes de placa. La combinación de ambos modelos proporcionó una descripción robusta y coherente del comportamiento del sistema óptico.

La aplicación de este modelo a 307 (298 filtradas) fuentes astronómicas desen- trañó un patrón de distorsión predominantemente radial que comparte geometría tanto de cojín como de barril, además de evidenciar características físicas del sensor como desviaciones de orientación o de punto cero. Este trabajo arrojó residuos con un RMS de aproximadamente 18 micrones en el eje X y 16 micrones en el eje Y, equivalentes a cerca de 1.5 píxeles en el sensor, constituyendo un logro notable para un telescopio de tipo comercial. Si bien esto puede manifestarse en magnitudes aparentemente pequeñas al nivel individual, culmina en un desplazamiento medio discernible y no trivial de 0.81 segundos de arco en Ascensión Recta en dirección al Este, y de 0.92 segundos de arco en Declinación hacia el Norte, asu-

miendo que el eje del CCD está orientado de manera estándar con el Norte y el Este en incrementos positivos. Este modelo permitió también una caracterización de la escala de placa efectiva en el plano focal, un hallazgo de gran relevancia dado que, como es habitual en todos los instrumentos, se maneja una escala de placa y un largo focal nominal que no concuerdan con los calculados en este modelo. Estos valores son significativos para observaciones de alta precisión como las que planea realizar la red de telescopios FALCON.

El análisis estadístico de los residuos enfatizó la importancia de comprender su distribución para asegurar la ausencia de errores sistemáticos no modelados. La elaboración de un histograma residual confirmó una distribución gaussiana centrada en cero, confirmando el modelamiento de gran parte de los errores sistemáticos y validando la robustez del modelo desarrollado.

La universalidad de nuestro modelo astrométrico, diseñado para ser aplicable a una amplia gama de sistemas ópticos astronómicos, resalta la importancia crítica de comprender detalladamente las características específicas y las condiciones ambientales en el momento de cada observación. Durante la implementación del modelo en la unidad FALCON-CMU de Colorado, enfrentamos desafíos significativos que subrayaron la necesidad de tener un conocimiento exhaustivo de las condiciones climáticas y otros factores ambientales que no estaban completamente disponibles en ese contexto. La calidad variable de las imágenes obtenidas y la falta de datos climáticos precisos introdujeron incertidumbres que afectaron la calidad de los resultados obtenidos en comparación con los de la unidad local.

Este contraste en la calidad de los resultados reveló que, mientras el modelo evidenciaba un patrón de distorsión radial creciente, el análisis de residuos indicaba la presencia de factores sistemáticos no modelados. Aunque se hizo el ejercicio de seguir añadiendo variables al modelo radial y aumentar el orden de los polinomios en el modelo de placa, la calidad de los datos y la ausencia de información detallada sobre las condiciones climáticas y operacionales limitaba nuestra capacidad para interpretar con precisión los efectos observados. Esta limitación destacó que, sin un entendimiento completo de todos los factores relevantes, la aplicación del modelo podría resultar en interpretaciones erróneas o en la modelización de artefactos sin significado científico real.

Por tanto, este escenario apela a la necesidad imperante de integrar datos

ambientales y de observación precisa y detallada en el proceso de modelización astrométrica. La experiencia adquirida resalta la importancia de adaptar y refinar continuamente nuestro modelo en función de las características únicas de cada sistema óptico y las condiciones bajo las cuales se realizan las observaciones, para asegurar la fiabilidad y precisión de los datos astrométricos generados. Este aprendizaje impulsa la evolución hacia modelos astrométricos más robustos y adaptativos, capaces de compensar una gama más amplia de variables y mejorar sustancialmente la calidad y precisión de las observaciones astronómicas

Finalmente, la aplicabilidad de estos modelos astrométricos trasciende las fronteras de la mera astrometría de precisión y la identificación de objetos celestes. Su integración en programas dinámicos de avanzada, tales como sistemas de guiado y corrección en telescopios, así como su incorporación en proyectos de big data astronómico, como surveys, evidencia su potencial. Un ejemplo paradigmático de su utilidad se observa en el Sloan Digital Sky Survey (SDSS) con su nuevo instrumento Focal Plane System (FPS) (Pogge et al. (2020)), que implementa un algoritmo similar al usado en esta tesis a 6 cámaras de guiado simultáneo en el telescopio du Pont de 2.5 metros, situado en el Observatorio Las Campanas, Chile. Este algoritmo, que guarda parecido con el esquema inicial propuesto en nuestro modelo, optimiza el proceso de guiado y corrección del telescopio ejecutándose cada 15 segundos.

Este caso ilustra la versatilidad y el valor inmenso que los modelos de corrección y cálculo astrométrico pueden aportar a la comunidad científica, cuando se aplican con un enfoque riguroso. La implementación de tales modelos periódicamente como describe Freeman et al. (2023) y Damke-Calderon (2016) no solo mejora significativamente la eficiencia y precisión de las observaciones astronómicas sino que también abre nuevas avenidas para la exploración del cosmos, reforzando la capacidad de los telescopios para adaptarse y corregir en tiempo real las variaciones observacionales. Así, este trabajo no solo aporta a la astrometría de precisión sino que también establece un precedente para la aplicación de estos modelos en contextos más amplios.

En lo que concierne a la implementación práctica dentro de la red de telescopios FALCON, el paso subsecuente implicaría la aplicación de este modelo astrométrico de manera extensiva a toda la red y ala nueva generación de telescopios de la red FALCON, bajo condiciones controladas. Tal enfoque garantizaría una

homogeneidad en los conjuntos de datos obtenidos, elemento fundamental para alcanzar los objetivos primordiales de la red. La creación de máscaras astrométricas (ver Figura 6.13) de corrección individualizadas para cada telescopio emergen como una estrategia clave para asegurar la precisión requerida en el seguimiento astronómico y satelital, facilitando así la consecución de precisiones uniformes a lo largo de toda la red FALCON. Este procedimiento resulta especialmente beneficioso para las observaciones bi-hemisféricas, permitiendo el manejo de deltas de posición calculados y controlados, los cuales revisten gran importancia para la optimización y el rendimiento global de la red.

Por otro lado, sería sumamente interesante replicar el modelo presentado para cada uno de los filtros disponibles de la red y para cada uno de los telescopios, y así verificar si existen aportes adicionales en las distorsiones o en las modificaciones del largo focal en cada uno de ellos.

Esta perspectiva no solo eleva la importancia de una calibración precisa y la estandarización de procedimientos dentro de una infraestructura de observación distribuida, sino que también resalta cómo tales medidas pueden influir significativamente en la calidad y la fiabilidad de los datos astronómicos recopilados.

En el año 2024 se instalará la nueva generación de telescopios en la red FALCON, con modificaciones notables en gran parte de su sistema óptico. Con vistas hacia el futuro, el presente código quedará actualizado para poder aplicarse potencialmente a los nuevos sistemas. Con esto será posible por una parte contribuir nuevamente a la caracterización de estos nuevos instrumentos y también realizar estudios comparativos de las mejoras sustanciales que conlleva esta actualización.

Finalmente dentro del impacto de este trabajo, se destaca la complejidad intrínseca de las reducciones astrométricas realizadas con telescopios comerciales, un dominio en el que la literatura previa a menudo no proporciona claridad sobre cómo se llevan a cabo estos procedimientos, ni sobre las especificaciones precisas de configuraciones y parámetros operativos necesarios. Este estudio trasciende estas limitaciones, presentando no solo una solución a las lagunas identificadas sino también proponiendo un marco metodológico robusto, replicable y adaptable a una variedad de contextos investigativos en astrometría. Al hacerlo, esta investigación contribuye de manera sustancial al enriquecimiento de este tópico, facilitando avances significativos en la metodología de la observación astronómica.

Bibliografía

- Abad, C. 1993, *Astron. Astroph. Supplement (Journal)*, 98, 1
- Albrecht, E. M., Jensen, A. M., Jensen, E. G., et al. 2022, *Journal of the Astronomical Sciences*, 69, 120, doi: [10.1007/s40295-021-00292-x](https://doi.org/10.1007/s40295-021-00292-x)
- Anderson, J., Bedin, L. R., Piotto, G., Yadav, R. S., & Bellini, A. 2006, *Astron. Astrph.*, 454, 1029, doi: [10.1051/0004-6361:20065004](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065004)
- Bertin, E., & Arnouts, S. 1996, *Astron. Astroph. Supplement (Journal)*, 117, 393, doi: [10.1051/aas:1996164](https://doi.org/10.1051/aas:1996164)
- Bessell, M. S. 1990, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 102, 1181, doi: [10.1086/132749](https://doi.org/10.1086/132749)
- Bouquillon, S., Mendez, R. A., & Altmann, M. 2018, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, Vol. 50, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, 29–30
- Brown, T. M., Baliber, N., Bianco, F. B., et al. 2013, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 125, 1031, doi: [10.1086/673168](https://doi.org/10.1086/673168)
- Casetti-Dinescu, D. I., Girard, T. M., Méndez, R. A., & Petronchak, R. M. 2018, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, Vol. 50, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, 31–33
- Chambers, G. F. 1891, *Sidereal Messenger*, 10, 457
- Chun, F., Tippetts, R., Dearborn, M., et al. 2014, in *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, ed. S. Ryan, E64
- Chun, F. K., Tippetts, R. D., Strong, D. M., et al. 2018, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 130, 095003, doi: [10.1088/1538-3873/aad03f](https://doi.org/10.1088/1538-3873/aad03f)

- Cudworth, K. M., & Rees, R. F. 1991, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 103, 470, doi: [10.1086/132845](https://doi.org/10.1086/132845)
- Damke-Calderon, G. 2016, PhD thesis, University of Virginia
- Diolatzis, I. S., & Pavlogeorgatos, G. 2019, , 67, 29, doi: [10.1016/j.newast.2018.09.003](https://doi.org/10.1016/j.newast.2018.09.003)
- Eichhorn, H. 1971, *Astronomische Nachrichten*, 293, 127, doi: [10.1002/asna.19712930307](https://doi.org/10.1002/asna.19712930307)
- . 1985, *Astron. Astrph.*, 150, 251
- Freeman, M. S. R., Lu, J. R., Lyke, J., et al. 2023, *Astron. J.*, 166, 125, doi: [10.3847/1538-3881/aceaf7](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aceaf7)
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., et al. 1996, *Astron. J.*, 111, 1748, doi: [10.1086/117915](https://doi.org/10.1086/117915)
- Gai, M., Qi, Z., Lattanzi, M. G., et al. 2020, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 11451, *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV*, ed. R. Navarro & R. Geyl, 114514I, doi: [10.1117/12.2562671](https://doi.org/10.1117/12.2562671)
- Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., et al. 2023, *Astron. Astrph.*, 674, A1, doi: [10.1051/0004-6361/202243940](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940)
- Galilei, G. 1610, *Sidereus Nuncius*
- Gingerich, O., & van Helden, A. 2003, *Journal for the History of Astronomy*, 34, 251, doi: [10.1177/002182860303400301](https://doi.org/10.1177/002182860303400301)
- Gomes, T. M., & Marques, I. A. 2023, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 45, 1, doi: [10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0307](https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0307)
- Høg, E. 2014, arXiv e-prints, arXiv:1408.2122, doi: [10.48550/arXiv.1408.2122](https://doi.org/10.48550/arXiv.1408.2122)
- IAU SOFA Center. 2014, *SOFA: Standards of Fundamental Astronomy, Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1403.026
- Irwin, M. J. 1985, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 214, 575, doi: [10.1093/mnras/214.4.575](https://doi.org/10.1093/mnras/214.4.575)

- Kasliwal, M. 2017, Global Relay of Observatories Watching Transients Happen, Keck Observatory Archive C283
- Kılıç, Y., Erece, O., & Kaplan, M. 2018, in *Astrometry and Astrophysics in the Gaia Sky*, ed. A. Recio-Blanco, P. de Laverny, A. G. A. Brown, & T. Prusti, Vol. 330, 94–95, doi: [10.1017/S174392131700552X](https://doi.org/10.1017/S174392131700552X)
- Lacruz, E., & Abad, C. 2015, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, Vol. 46, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, 87
- Lacruz, E., Abad, C., Downes, J. J., et al. 2018, , 54, 209
- Mendez, R. A., Echeverria, A., Silva, J., & Orchard, M. 2017, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, Vol. 49, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, 52–52
- Monet, D. G. 1992, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 23, *Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques*, ed. S. B. Howell, 221
- Nelder, J. A., & Mead, R. 1965, *Computer Journal*, 7, 308
- Ning, X., Wang, L., Bai, X., & Fang, J. 2013, *Advances in Space Research*, 51, 1761, doi: [10.1016/j.asr.2012.12.008](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.12.008)
- Pizzone, R. G. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2005.07411, doi: [10.48550/arXiv.2005.07411](https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.07411)
- Pogge, R. W., Derwent, M. A., O’Brien, T. P., et al. 2020, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 11447, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VIII*, ed. C. J. Evans, J. J. Bryant, & K. Motohara, 1144781, doi: [10.1117/12.2561113](https://doi.org/10.1117/12.2561113)
- Robichon, N., Turon, C., Makarov, V. V., et al. 1995, *Astron. Astrph.*, 304, 132
- Rosenberg, M., Russo, P., Bladon, G., & Lindberg Christensen, L. 2013, arXiv e-prints, arXiv:1311.0508, doi: [10.48550/arXiv.1311.0508](https://doi.org/10.48550/arXiv.1311.0508)
- Ruggles, C. 1999, *Journal for the History of Astronomy Supplement*, 30, S83

- Schuyer, M. 1992, *L'Aeronautique et L'Astronautique*, 154-155, 107
- Short, A., Hopkinson, G., Laborie, A., et al. 2005, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 5902, *Focal Plane Arrays for Space Telescopes II*, ed. T. J. Grycewicz & C. J. Marshall, 31–44, doi: [10.1117/12.616999](https://doi.org/10.1117/12.616999)
- Shupe, D. L., Laher, R. R., Storrie-Lombardi, L., et al. 2012, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 8451, *Software and Cyberinfrastructure for Astronomy II*, ed. N. M. Radziwill & G. Chiozzi, 84511M, doi: [10.1117/12.925460](https://doi.org/10.1117/12.925460)
- Soubiran, C. 1992, *Astron. Astrph.*, 259, 394
- Stock, J. 1981, , 6, 115
- Taylor, M. 2011, TOPCAT: Tool for OPERations on Catalogues And Tables, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1101.010
- Thome, J. M. 1890, *Astron. J.*, 10, 105, doi: [10.1086/101455](https://doi.org/10.1086/101455)
- Tody, D. 1986, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 627, *Instrumentation in astronomy VI*, ed. D. L. Crawford, 733, doi: [10.1117/12.968154](https://doi.org/10.1117/12.968154)
- Tyson, A., & Angel, R. 2001, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 232, *The New Era of Wide Field Astronomy*, ed. R. Clowes, A. Adamson, & G. Bromage, 347
- Utsumi, Y., Miyazaki, S., Geller, M. J., et al. 2014, *Astrophys. J.*, 786, 93, doi: [10.1088/0004-637X/786/2/93](https://doi.org/10.1088/0004-637X/786/2/93)
- Wilson, R. N. 1990, *The Messenger*, 61, 22

