

Tesis Doctoral

Calibración radiométrica de pre-lanzamiento de la cámara infrarroja NIRST a bordo del SAC-D

Ganopol, Abigail

2015-02-13

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Ganopol, Abigail. (2015-02-13). Calibración radiométrica de pre-lanzamiento de la cámara infrarroja NIRST a bordo del SAC-D. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Cita tipo Chicago:

Ganopol, Abigail. "Calibración radiométrica de pre-lanzamiento de la cámara infrarroja NIRST a bordo del SAC-D". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2015-02-13.

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física

Calibración radiométrica de pre-lanzamiento de la cámara infrarroja NIRST a bordo del SAC-D

Trabajo de Tesis presentado para optar al título de
Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área Ciencias Físicas

Lic. Abigail Ganopol

Director: Dr. Hugo Marraco

Consejero de Estudios: Dr. Daniel Gómez

Lugar de trabajo: Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)

Septiembre de 2014

Fecha de defensa: Viernes 13 de febrero de 2015

*Dedicado a Poly, Dita, Papá y Mamá
por el amor que me brindaron
y por hacer de mí la persona que soy hoy.*

*Dedicado a Pabli
por compartir tu vida conmigo,
comprender mis locuras y elegirme cada día
a pesar de todos mis defectos.*

*Dedicado finalmente a mis nenitos
por su amor incondicional
que ilumina y da sentido a mi vida.*

*Para los que ya se fueron y los que aún están,
este trabajo es mi pequeño homenaje...*

Simplemente GRACIAS.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todos aquellos que de una u otra forma me acompañaron haciendo posible este momento.

- A CONAE. No sólo es el lugar donde pude llevar adelante mi doctorado. Es además un lugar donde puedo desarrollarme y crecer profesionalmente, donde los desafíos son constantes y todos los días aprendo algo nuevo. Agradezco además a mi director Hugo Marraco por las valiosas discusiones sobre la calibración de NIRST.

- A todo el equipo de GSO por ser los mejores compañeros de trabajo que se pueda tener. Porque es muy valioso poder trabajar con seriedad y responsabilidad, y al mismo tiempo que el clima sea divertido. Porque realmente somos un equipo. Gracias por hacerme el aguante en estos últimos tiempos.

- A Beatriz. gracias por acompañarme, contenerme y ayudarme a crecer de la forma que lo hiciste. Gracias por tu dulzura y tu bondad. No es lo mismo sin vos.

- A Bar y Ligius, mis amigas de la vida, por ser mis hermanas del corazón. Gracias por todos los momentos compartidos, por escucharme, por contarme, por la diversión, la alegría y por tantas cosas que no logro resumir en pocas palabras.

- A Lita y Fer, por ser mi familia postiza, por las clases en el ICB, por la comida casera que añoraba después de meses comiendo en hoteles o restaurants.

- A An gracias por tu amistad, por tu constante buen humor, gracias por tantos y tan lindos momentos compartidos. Gracias por compartir conmigo tu escritura!

- A Fernando gracias por estar presente, por tus consejos, por tu sentido del humor ácido y por ser parte de mi vida.

- A Gra, Carloncho y Ceci y Parma gracias por recibirme en su familia, literalmente, desde el primer día o el segundo.

- A Marcelo, gracias por ser como sos, por creer en mí y por un mundo de posibilidades que no sabía que existía.

- A Dita, Poly, Mamá y Papá, reforzando lo que dice la dedicatoria, gracias por haberme criado con tanto amor y por estimularme permanentemente. Hoy no estaría acá si no fuera gracias a todo lo que hicieron por mí.

- A Pabli, además de lo que dice la dedicatoria, que aplica en general, gracias en particular por cuidar a los nenes y llevarlos de paseo mientras yo escribía y también gracias por alentarme siempre a seguir adelante.

- A mis nenes gracias por su amor permanente e incondicional. En especial, gracias al Jazz, al Mito y a la Oli por ser mis compañeros fieles e inseparables durante el período de escritura de la tesis.

- Finalmente, aunque no por eso menos importante, gracias a Dios.

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar la calibración radiométrica de pre lanzamiento de la cámara infrarroja *New Infrared Sensor Technology* (NIRST). NIRST es uno de los ocho instrumentos a bordo de la misión SAC-D/Aquarius puesta en órbita el 10 de junio de 2011. Está compuesta por una cámara en el infrarrojo medio (*Middle Wave Infrared*) y otra en el infrarrojo térmico (*Long Wave Infrared*), cada una con 3 arreglos de 512 microbolómetros. NIRST además cuenta con un espejo móvil de berilio con el fin de reducir el período de revisita del instrumento.

Con el propósito de calibrar radiométricamente la NIRST en tierra, se llevó a cabo una serie de mediciones en laboratorio utilizando fuentes de cuerpo negro. La calibración absoluta del instrumento se realizó mediante ajustes polinomiales de los datos obtenidos, relacionando la temperatura sensada y la potencia recibida por los detectores con las cuentas digitales. También se realizó la calibración relativa con el fin de obtener una respuesta ecualizada en cada uno de los arreglos. En este caso, se realizaron ajustes polinomiales relacionando las cuentas medidas en cada uno de los microbolómetros de un dado arreglo con respecto a un detector de referencia dentro del mismo arreglo. El grado del polinomio para las calibraciones absoluta y relativa de NIRST, así como la elección del detector de referencia son objeto de análisis en el presente trabajo. También se llevó a cabo la caracterización del espejo estudiando la respuesta en función del ángulo de apuntamiento.

El análisis de los datos obtenidos durante la calibración radiométrica puso en evidencia la no uniformidad en la sensibilidad de los microbolómetros que conforman cada arreglo. Por otro lado, resultó necesario utilizar grados elevados en los polinomios de calibración absoluta y relativa indicando esto la no linealidad de los detectores. Con respecto al espejo, si bien el mismo presenta una respuesta lineal, se observó que ésta se depende del ángulo de apuntamiento β . Asimismo, los resultados correspondientes a la caracterización del espejo permitieron descubrir la existencia de un gradiente de temperatura en la superficie emisora de los cuerpos negros de laboratorio empleados durante la calibración radiométrica.

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se proveen algunas recomendaciones con el objetivo de contribuir a futuras misiones espaciales de la CONAE. Estas sugerencias son aplicables tanto al diseño del instrumento como a las metodologías de calibración radiométrica de cámaras infrarrojas.

Palabras clave: Cámara infrarroja; calibración radiométrica absoluta; calibración radiométrica relativa; calibración de pre-lanzamiento; microbolómetros; cuerpo negro

Title: On ground radiometric calibration of NIRST infrared camera on board of SAC-D

Abstract: The aim of this work is to present the pre-launch radiometric calibration of the New InfraRed Sensor Technology (NIRST) infrared camera. NIRST is one of the eight instruments on board of SAC-D/Aquarius mission, launched on June 10th 2011. It is composed of a *Middle Wave Infrared* camera in the mid-infrared region and a *Long Wave Infrared* camera in the thermal region, with 3 arrays of 512 microbolometers each. NIRST also has a pointing beryllium mirror to reduce instrument' s revisit time.

In order to achieve on ground radiometric calibration, several measurements were performed using blackbody sources. The instrument absolute calibration was performed by means of polynomial fits that relate the sensed temperature and its equivalent radiated power to digital numbers. Relative calibration was also performed in order to obtain an equalized response for each array. In this case, polynomial fits relate the counts of an arbitrary detector to those of a reference detector within a given array. Absolute and relative calibration polynomial orders as well as the reference detector selection are matter of analysis in the present work. The mirror characterization studying the response versus scan angle is presented as well.

The analysis of the data obtained during the radiometric calibration revealed that microbolometers sensibility within each array is not uniform. High polynomial orders for both absolute and relative calibrations were found necessary, revealing detectors nonlinearity. The mirror presents a linear response that was found to depend on the pointing angle β . The on ground mirror characterization revealed that the laboratory blackbody sources used present a temperature gradient on their emitting surfaces.

Considering the results provided in this work, some recommendations for future CO-NAE missions are presented. These suggestions apply to the instrument design as well as to infrared cameras calibration methodologies.

Keywords: *Infrared camera; absolute radiometric calibration; relative radiometric calibration; pre-launch calibration; microbolometers; blackbody*

Índice general

1. Introducción	15
1.1. Misión SAC-D/Aquarius	15
1.2. El instrumento NIRST	17
1.2.1. Antecedentes del tema	17
1.2.2. Descripción del instrumento	18
1.3. Objetivos de la tesis y resultados principales	22
1.4. Estructura de la tesis	24
1.5. Terminología empleada en la tesis	25
2. Marco físico y enfoque matemático	27
3. Calibración radiométrica en laboratorio	33
3.1. Requerimientos clave	33
3.2. Equipamiento utilizado	34
3.3. Setup experimental	35
3.4. Mediciones previas a la adquisición de datos	36
3.5. Proceso de adquisición de datos	38
4. Calibración absoluta	43
4.1. Estudio del rango dinámico	44
4.2. Definición del grado del polinomio de calibración absoluta	51
4.3. Función de transferencia	55
4.4. Estudios complementarios	57
5. Calibración relativa	59
5.1. Determinación del píxel de referencia	59
5.2. Determinación del grado del polinomio	61

5.3. Análisis de la ecualización	65
6. Caracterización del espejo	75
6.1. Actividades realizadas en laboratorio	75
6.2. Respuesta en función del ángulo de apuntamiento	76
6.3. Análisis de los coeficientes de caracterización	80
6.3.1. Resultados	80
6.3.2. Discusión	82
7. Trabajo futuro y sugerencias para futuras misiones	85
7.1. Trabajo futuro de NIRST	85
7.2. Sugerencias para futuras misiones	88
7.2.1. NIRST	88
7.2.2. Otras misiones	90
7.2.3. Recomendaciones	98
8. Conclusiones	101
8.1. Resumen del trabajo realizado	101
8.2. Comentarios sobre los resultados obtenidos	103
Bibliografía	107
A. Misión SAC-D/Aquarius	115
A.1. Órbita de la Misión SAC-D/Aquarius	115
A.2. Fases de la misión	116
A.3. Descripción de la Misión a nivel sistemas	117
A.3.1. Segmento de Vuelo	117
A.3.2. Lanzador	125
A.3.3. Segmento Terreno	126
B. Tópicos sobre teledetección	129
B.1. Sensado pasivo y activo	130
B.2. Pisada o <i>Swath</i>	131
B.3. Scanners <i>Across-track</i> y <i>Along-track</i>	132
C. Lista de acrónimos y abreviaturas	135

Índice de figuras

1.1.	Figura 1.1a: CAD del SAC-D donde puede apreciarse la ubicación de la NIRST en la cara $+z$ de la Plataforma de Servicios. Figura 1.1b: Instrumento NIRST montado en la Plataforma de Servicios durante la etapa de integración del SAC-D en Bariloche.	16
1.2.	Descripción global del instrumento. Figura 1.2a: Diagrama simplificado del instrumento. Figura 1.2b: CAD de NIRST donde se aprecian las cámaras MWIR y LWIR así como el espejo de Be y el Dispositivo de Verificación Funcional (DVF). El sistema de referencia indicado es el del SAC-D. Figura 1.2c: Vista frontal de las cámaras. Figura 1.2d: Vista explotada de la cámara MWIR. Se aprecian el sistema óptico (sin el espejo), el <i>Radiometric Package</i> y la electrónica. Figura 1.2e: Diagrama mostrando los arreglos de microbolómetros de MWIR y LWIR y las 3 bandas. Figura 1.2f: Diagrama simplificado de un arreglo donde se muestra la disposición de los microbolómetros.	20
3.1.	Izquierda: Setup utilizado durante la calibración radiométrica en laboratorio: se observa el instrumento con su cara $-z$ sujeta al brazo del robot FANUC M-710iC50 (en amarillo, al fondo) y una de las fuentes de cuerpo negro colocada sobre el banco óptico, frente a la cara $+z$ del instrumento. También se distingue la conexión de la bomba de vacío a los <i>Radiometric Packages</i> . Derecha: Foto de NIRST tal como se ve desde la ubicación de la fuente utilizada. . . .	37
3.2.	Potencia en función de la temperatura de las bandas de $3.8\mu\text{m}$ (panel izquierdo), $10.85\mu\text{m}$ (panel derecho, círculos rojos) y $11.85\mu\text{m}$ (panel derecho, cruces azules).	40
4.1.	Temperatura vs. cuentas (paneles superiores) y potencia vs. cuentas (paneles inferiores) del píxel 255 de la cámara MWIR. Izquierda: Arreglo MWIR1. Centro: Arreglo MWIR2. Derecha: Arreglo MWIR3. Las temperaturas son medidas en Kelvin ([K]) y la potencia en μW	45

4.2.	Temperatura vs. cuentas (paneles superiores) y potencia vs. cuentas (paneles inferiores) del píxel 255 de la cámara LWIR. Izquierda: Arreglo LWIR1. Centro: Arreglo LWIR2. Derecha: Arreglo LWIR3. Las temperaturas son medidas en Kelvin ([K]) y la potencia en μW	46
4.3.	Rango dinámico en cuentas (DN) para las cámaras MWIR (paneles izquierdos) y LWIR (paneles derechos). Se observa el rango dinámico de los píxeles pares (verde) e impares (azul) de los arreglos MWIR1 (a), MWIR2 (c), MWIR3 (e), LWIR1 (b), LWIR2 (d) y LWIR3 (f).	47
4.4.	Temperatura vs. cuentas de los píxeles atípicos de las cámaras MWIR y LWIR. Se observan los píxeles <i>no-standard</i> de los arreglos MWIR1 (a), MWIR2 (b), MWIR3 (d, e) y LWIR2 (f, g). Se presentan los píxeles <i>anómalos</i> de los arreglos MWIR3 (c) y LWIR 3 (h). Se muestra el píxel <i>muerto</i> del arreglo LWIR3 (i).	48
4.5.	Temperatura vs. cuentas de los píxeles atípicos del arreglo LWIR1. Se observan los píxeles <i>anómalos</i> (a - g), el píxel <i>no-standard</i> (h) y unos de los píxeles <i>muertos</i> (i).	49
4.6.	Temperatura vs. cuentas de los píxeles atípicos del arreglo LWIR1. Se observa el resto de los píxeles <i>muertos</i> (a - i) de dicho arreglo.	50
4.7.	Desviación standard de los residuos en temperatura (paneles superiores) y potencia (paneles inferiores) promediada sobre todos los píxeles (rojo), sobre los píxeles pares (verde) y sobre los píxeles impares (azul) en función del grado del polinomio utilizado para la calibración absoluta de MWIR1 (a), MWIR2(b), MWIR3(c), LWIR1 (d), LWIR2 (e) y LWIR3 (f), para un ángulo de apuntamiento del espejo de 45° . Las temperaturas son medidas en Kelvin ([K]) y la potencia en μW	53
4.8.	Función de transferencia (SiTF) en K/DN promediada sobre píxeles pares (verde) e impares (azul) en función de la temperatura de cuerpo negro utilizada en laboratorio. El SiTF mostrado corresponde a los polinomios de calibración absoluta $\mathcal{O} = 4$, $\mathcal{O} = 8$ y $\mathcal{O} = 6$ para las bandas de $3.8 \mu\text{m}$, $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$ respectivamente.	56
4.9.	Temperatura del <i>Radiometric Package</i> en función de la temperatura de cuerpo negro de las cámaras MWIR (izquierda) y LWIR (derecha).	58
5.1.	Respuesta en DN de los píxeles #160 y #253 de la cámara MWIR, tomando en cada arreglo los píxeles de referencia par (PRP) e impar (PRI) presentados en la Tabla 5.1 y siendo $\beta = 45^\circ$	62

5.2.	Respuesta en DN de los píxeles #160 y #253 de la cámara LWIR, tomando en cada arreglo los píxeles de referencia par (PRP) e impar (PRI) presentados en la Tabla 5.1 y siendo $\beta = 45^\circ$	62
5.3.	Desviación standard $\ r\ _{DN}$ promediada sobre todos los píxeles tomando un PRP (rojo) o un PRI (fucsia), promediada sobre los píxeles pares tomando un PRP (verde) y promediada sobre los píxeles impares tomando un PRI (azul) en función del grado \mathcal{O} del polinomio de calibración relativa de las cámaras MWIR (paneles superiores) y LWIR (paneles inferiores). siendo $\beta = 45^\circ$. En cada arreglo se tomaron los píxeles de referencia indicados en la Tabla 5.1.	63
5.4.	Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo MWIR1 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 4$ para $T = 373K$ (Figura 5.4a) y $T = 600K$ (Figura 5.4b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Todos-Par</i> , los paneles superiores derechos corresponden a la configuración <i>Todos-Impar</i> , los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Par-Par</i> y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración <i>Impar-Impar</i> . Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.	66
5.5.	Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo MWIR2 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 4$ para $T = 373K$ (Figura 5.5a) y $T = 600K$ (Figura 5.5b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Todos-Par</i> , los paneles superiores derechos corresponden a la configuración <i>Todos-Impar</i> , los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Par-Par</i> y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración <i>Impar-Impar</i> . Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.	67
5.6.	Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo MWIR3 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 4$ para $T = 373K$ (Figura 5.6a) y $T = 600K$ (Figura 5.6b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Todos-Par</i> , los paneles superiores derechos corresponden a la configuración <i>Todos-Impar</i> , los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Par-Par</i> y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración <i>Impar-Impar</i> . Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.	68

5.7.	Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo LWIR1 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 8$ para $T = 273K$ (Figura 5.7a) y $T = 520K$ (Figura 5.7b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Todos-Par</i> , los paneles superiores derechos corresponden a la configuración <i>Todos-Impar</i> , los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Par-Par</i> y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración <i>Impar-Impar</i> . Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.	69
5.8.	Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo LWIR2 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 8$ para $T = 273K$ (Figura 5.8a) y $T = 520K$ (Figura 5.8b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Todos-Par</i> , los paneles superiores derechos corresponden a la configuración <i>Todos-Impar</i> , los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Par-Par</i> y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración <i>Impar-Impar</i> . Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.	70
5.9.	Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo LWIR3 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 8$ para $T = 273K$ (Figura 5.9a) y $T = 520K$ (Figura 5.9b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Todos-Par</i> , los paneles superiores derechos corresponden a la configuración <i>Todos-Impar</i> , los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración <i>Par-Par</i> y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración <i>Impar-Impar</i> . Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.	71
6.1.	Respuesta de los píxeles 4, 5, 255, 256, 509 y 510 de la cámara MWIR1 (izquierda), MWIR2 (centro) y MWIR3 (derecha) para $\beta = 30^\circ$ (estrellas rojas) y $\beta = 60^\circ$ (asteriscos azules) tomando como referencia los datos obtenidos con $\beta = 45^\circ$	77
6.2.	Respuesta de los píxeles 4, 5, 255, 256, 509 y 510 de la cámara LWIR1 (izquierda), LWIR2 (centro) y LWIR3 (derecha) para $\beta = 30^\circ$ (estrellas rojas) y $\beta = 60^\circ$ (asteriscos azules) tomando como referencia los datos obtenidos con $\beta = 45^\circ$	78

6.3.	Desviación standard $\ r\ _{DN}$ promediada sobre todos los píxeles (asteriscos rojos), sobre los píxeles pares (estrellas verdes) y sobre los píxeles impares (triángulos azules) en función del grado del polinomio utilizado para la caracterización del apuntamiento del espejo. Se muestran los resultados obtenidos para los arreglos MWIR1 (izquierda), MWIR2 (centro) y MWIR3 (derecha), para $\beta = 30^\circ$ (paneles superiores) y $\beta = 60^\circ$ (paneles inferiores).	79
6.4.	Desviación standard $\ r\ _{DN}$ promediada sobre todos los píxeles (asteriscos rojos), sobre los píxeles pares (estrellas verdes) y sobre los píxeles impares (triángulos azules) en función del grado del polinomio utilizado para la caracterización del apuntamiento del espejo. Se muestran los resultados obtenidos para los arreglos LWIR1 (izquierda), LWIR2 (centro) y LWIR3 (derecha), para $\beta = 30^\circ$ (paneles superiores) y $\beta = 60^\circ$ (paneles inferiores).	79
6.5.	Pendiente (paneles izquierdos) y ordenada al origen (paneles derechos) correspondientes al ajuste lineal de los ángulos de apuntamiento $\beta = 30$ (estrellas rojas) y $\beta = 60$ (asteriscos azules) en función del apuntamiento nadiral $\beta = 45$ para cada uno de los microbolómetros de ambas cámaras. Las figuras corresponden a los arreglos MWIR1(a,b), MWIR2 (c,d), MWIR3 (e,f), LWIR1 (g,h), LWIR2 (i,j) y LWIR3 (k,l).	81
6.6.	No uniformidad de la superficie emisora del cuerpo negro BBB. Izquierda: Foto del BBB. Derecha: Superficie del BBB vista por la cámara LWIR.	83
6.7.	Diagrama de NIRST mostrando la posición relativa de las cámaras y el espejo. Debido a que el eje de rotación del espejo se encuentra ubicado próximo a uno de sus extremos, la distancia media entre el espejo y el módulo de cámaras aumenta al rotar de $\beta = 30^\circ$ a $\beta = 60^\circ$	84
A.1.	El Observatorio SAC-D/Aquarius (Ref. [1]). Puede apreciarse el sistema de referencia en donde el eje $+x$ (roll) corresponde a la dirección de vuelo, el eje $+y$ (pitch) apunta en el sentido contrario a la normal a la órbita y el eje $+z$ (yaw) esta orientado en la dirección nadiral.	118
A.2.	CAD representando los instrumentos de CONAE y sus socios montados en la Plataforma de Servicios del SAC-D (Ref. [1]). En la figura de la izquierda pueden apreciarse la caja electrónica y la antena de ROSA, DCS, HSC, MWR y TDP, así como tambien los detectores SODAD-1 y SODAD-2 de CARMEN. En la figura de la derecha se aprecian los instrumentos NIRST, ICARE, el detector SODAD-3 de CARMEN y ambas PAD.	123

A.3.	Configuración del Lanzador DELTA II 7320 para la misión SAC-D/Aquarius (Ref. [1]).	125
A.4.	Configuraciones del Observatorio SAC-D/Aquarius (Ref. [1]). Izquierda: dentro de la cofia del Lanzador, con el reflector del Aquarius y los paneles solares plegados. Derecha: Reflector del Aquarius y paneles solares desplegados. . .	126
B.1.	Diagrama del proceso de sensado remoto (Ref. [64]).	130
B.2.	Izquierda: Sensado pasivo. Derecha: Sensado activo (Ref. [64]).	131
B.3.	Izquierda: pisada en tierra o <i>swath</i> en una órbita. Derecha: cobertura de la superficie terrestre al cabo de varias órbitas (Ref. [64]).	132
B.4.	Izquierda: Sensores <i>across-track</i> . Derecha: Sensores <i>along-track</i> (Ref. [64]). . .	132

Índice de tablas

3.1.	Características de los cuerpos negros SBIR 2004 y SBIR 4006.	35
3.2.	Relación entre los pasos comandados al espejo de Be y los ángulos de apuntamiento: posición comandada en pasos (columna 1), ángulo de apuntamiento asociado en ° (columna 2), posición del espejo (columna 3) y apuntamiento final de NIRST (columna 4).	38
3.3.	Múltiples adquisiciones fueron realizadas con el propósito de "inundar" cada uno de los 512 microbolómetros ya que el área de los cuerpos negros no cubría por completo cada arreglo. La cantidad de reposicionamientos dependió del ángulo de apuntamiento β del espejo de Be y del tamaño de la superficie emisora del cuerpo negro. En el caso de MWIR no se realizaron adquisiciones con la fuente SBB por lo cual se indicó con N/A (No Aplicable).	39
3.4.	Adquisiciones realizadas con cada cámara. La columna 1 muestra el setpoint T_{bb} del cuerpo negro, en Kelvin (K). La columna 2 especifica el cuerpo negro utilizado en cada medición (SBB o BBB). Las columnas 3 y 4 corresponden a las mediciones realizadas con las cámaras LWIR y MWIR indicando el ángulo de apuntamiento β medido en grados (°) en cada caso.	41
4.1.	Píxeles atípicos de las cámaras MWIR y LWIR. Se observan los píxeles no-standard (columna 2), los píxeles <i>anómalos</i> (columna 3) y los píxeles <i>muertos</i> (columna 4) de cada uno de los arreglos.	51
5.1.	Píxeles de referencia par e impar seleccionados en cada arreglo y valor de $ \Delta_{DN}^{normal} $ asociado.	60
6.1.	Regiones de microbolómetros que presentan un mismo comportamiento en pendiente y ordenada al origen en cada cámara, para $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$. Los valores entre corchetes indican los píxeles que delimitan cada región.	82

- A.1. Instrumentos a bordo de la misión SAC-D/Aquarius. La columna 1 provee el nombre del instrumento, la columna 2 muestra los objetivos de ciencia principales, la columna 3 indica las especificaciones técnicas, la columna 4 detalla la resolución y la columna 5, la institución que desarrolló el instrumento. 124
- C.1. Lista de acrónimos y abreviaturas utilizados. 136

Capítulo 1

Introducción

La cámara infrarroja *New Infrared Sensor Technology* (NIRST) es uno de los ocho instrumentos del Observatorio SAC-D/Aquarius. En la Sección 1.1 se brinda una breve descripción de la Misión SAC-D/Aquarius. En la Sección 1.2 se describe el instrumento NIRST. En las Secciones 1.3 y 1.4 se proveen los objetivos y la estructura de esta tesis.

1.1. Misión SAC-D/Aquarius

La Misión SAC-D/Aquarius, un proyecto cooperativo entre la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y la National Aeronautic and Space Administration (NASA), fue puesta en órbita el 10 de Junio de 2011.

El proyecto SAC-D/Aquarius (Ref. [1]) consta de los siguientes instrumentos montados sobre la Plataforma de Servicios (*Service Platform*, SP):

- Aquarius
- Microwave Radiometer (MWR)
- New Infrared Sensor Technology (NIRST)
- High Sensitivity Camera (HSC)
- Data Collection System (DCS)
- Radio Occultation Sounder for Atmosphere (ROSA)
- Caractérisation et Modélisation de l' Environnement (CARMEN)

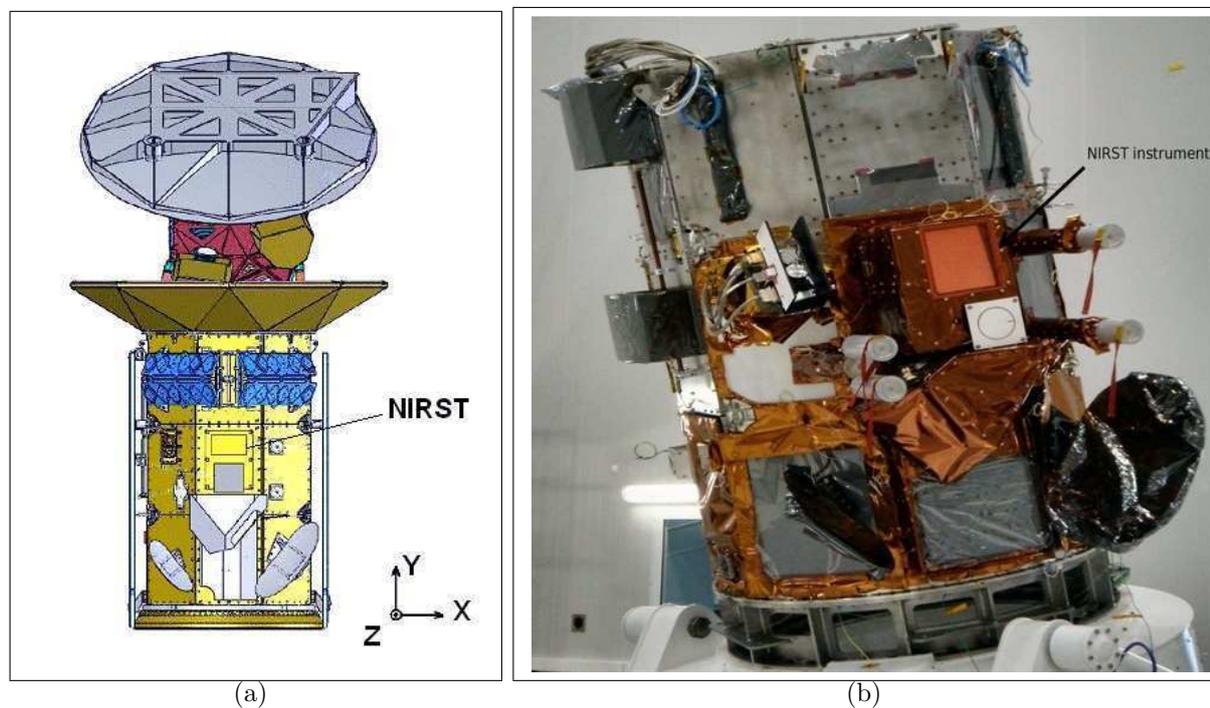


Figura 1.1: Figura 1.1a: CAD del SAC-D donde puede apreciarse la ubicación de la NIRST en la cara $+z$ de la Plataforma de Servicios. Figura 1.1b: Instrumento NIRST montado en la Plataforma de Servicios durante la etapa de integración del SAC-D en Bariloche.

- Technological Demonstration Package (TDP)

Los objetivos de ciencia primarios del Observatorio SAC-D/Aquarius son contribuir a la comprensión del sistema global del planeta y los efectos generados por el Hombre y la Naturaleza en el medio ambiente. La misión Aquarius contribuye a mejorar el conocimiento de la circulación de los océanos y la predicción de cambios en la circulación, así como también su impacto en el clima de la Tierra y el ciclo de agua. La misión SAC-D aborda los Ciclos de Información Espacial (CIE) II y III del Plan Espacial Nacional (Ref. [2]). El CIE II se enfoca en la oceanografía, el clima y la hidrología costeros mientras que el CIE III está destinado a manejo de emergencias.

Las Figuras 1.1a y 1.1b presentan un CAD del SAC-D y una foto de la SP durante la etapa de integración de los instrumentos respectivamente. Para mayor información sobre la Misión SAC-D/Aquarius referirse al Apéndice A.

1.2. El instrumento NIRST

La NIRST es un instrumento desarrollado colaborativamente por la CONAE y la Agencia Espacial Canadiense (*Canadian Space Agency, CSA*). Se trata de una cámara infrarroja basada en la tecnología de microbolómetros no enfriados cuyos objetivos principales son el monitoreo de eventos de alta temperatura (*High Temperature Events, HTE*) como el fuego y la ceniza volcánica, así como también la medición de temperatura superficial del mar.

1.2.1. Antecedentes del tema

Los detectores infrarrojos pueden clasificarse en detectores de fotones y detectores térmicos (Ref. [3]). En los detectores de fotones la radiación es absorbida por el material mediante la interacción con electrones. La señal eléctrica de salida resulta del cambio en la distribución de energía de los mismos. Este tipo de detectores exhibe una elevada performance en la relación señal ruido y una respuesta rápida, pero, para lograrlo, requieren ser enfriados criogénicamente. Los requerimientos de enfriamiento criogénico traen aparejados tamaño, masa, consumo de potencia y costos elevados.

En los detectores térmicos la radiación incidente es absorbida modificando la temperatura del material; la señal eléctrica de salida se obtiene como el resultado de un cambio en la propiedades físicas. En contraste con los detectores de fotones, poseen una menor sensibilidad y tiempo de respuesta más lento (del orden de los milisegundos). Sin embargo entre sus principales ventajas con respecto a los detectores de fotones, los detectores térmicos operan a temperatura ambiente (i.e., no requieren ser enfriados criogénicamente) son más pequeños, livianos, baratos y presentan un menor consumo de potencia (Refs.[3], [4], [5], [6]).

Los bolómetros son un tipo de sensor térmico que detecta el calor incidente y lo convierte en una magnitud física medible tal como tensión, corriente o resistencia (Refs. [3], [7]). Un microbolómetro es un conjunto de plano focal (*Focal Plane Array, FPA*) de píxeles individuales, cada uno midiendo radiación infrarroja. En comparación con los detectores enfriados criogénicamente (por ejemplo MODIS, y los SWIR y TIR a bordo de la misión ASTER), los microbolómetros no enfriados en el ámbito aeroespacial (por ejemplo THEMIS a bordo del Mars Odyssey y DARPA Orbital Express Mission a bordo del ASTRO) tienen un uso menor y más reciente. Esto se debe principalmente a la necesidad de aprovechar la herencia de los sistemas de vuelo.

Aunque los arreglos de microbolómetros no requieren ser enfriados criogénicamente, ope-

ran más eficientemente en ambientes térmicamente estables. Esto se logra aislando térmicamente el *Radiometric Package* de la electrónica utilizando un blindaje de aluminio (Ref. [5]).

Conforme la tecnología en microbolómetros avanza, el desafío radica en crear detectores no enfriados mejorando la performance pero manteniendo tamaño, consumo de potencia y costo reducidos en comparación con los detectores enfriados criogénicamente. Los detectores no enfriados han ganado terreno en los desarrollos espaciales en la región del infrarrojo térmico. Sin embargo, a pesar de los avances significativos, este tipo de tecnología sigue presentando limitaciones en la performance, en particular en la región del infrarrojo medio (Ref. [5]).

Otro aspecto clave en lo que respecta a este tipo de tecnología radica en la calibración del instrumento en vuelo debido a que la incorporación de calibradores a bordo suele traer aparejados tamaño y consumo de potencia elevados (Ref. [5]).

La cámara infrarroja NIRST representa un desafío tecnológico para la CONAE pues se trata del primer instrumento espacial a bordo de una misión argentina en utilizar la tecnología de microbolómetros no enfriados. García Blanco et al. 2009 (Ref. [8]) proveen una descripción del diseño de los detectores de NIRST y de la performance del instrumento.

Por ser la primera vez que se utiliza este tipo de tecnología, NIRST también representa un reto en cuanto a las técnicas de calibración radiométrica cuya implementación y resultados se discuten en esta tesis (ver Sección 1.3).

1.2.2. Descripción del instrumento

Los trabajos realizados por Marraco & Ngo Phong 2006 (Ref. [9]), Chateaufeuf et al. 2008 (Ref. [10]) y Gauvin et al. 2009 (Ref. [11]) proveen una descripción técnica detallada sobre el diseño de la NIRST. La misma se compone de dos cámaras: una en el infrarrojo medio, denominada MWIR (del inglés, *Middle Wave Infrared*) y otra en el infrarrojo térmico, denominada LWIR (del inglés, *Long Wave Infrared*), cada una con 3 arreglos (o líneas) de 512 microbolómetros (o píxeles). Con el objetivo de reducir el tiempo de revisita la NIRST posee un espejo móvil que puede ser rotado dentro de un rango de $\pm 15^\circ$ alrededor de la posición 45° correspondiente a un apuntamiento nadiral. La NIRST no posee un calibrador a bordo (*On-Board Calibrator*, OBC). Sin embargo, con el objetivo de verificar en forma periódica la estabilidad de sus detectores una vez en órbita, se implementó un Dispositivo de Verificación Funcional (DVF). La Figura 1.2 permite apreciar diversas características del instrumento. En la Figura 1.2a se muestra un diagrama simplificado con los tres sistemas fundamentales:

el sistema óptico, el detector y la electrónica. Las flechas indican la dirección del flujo, desde la energía incidente al sistema óptico hasta la señal digital a la salida de la electrónica. La Figura 1.2b presenta un CAD de NIRST donde se distinguen el módulo de las cámaras MWIR y LWIR así como el espejo y el DVF. En la Figura 1.2c se observa el módulo de las cámaras y la Figura 1.2d brinda una vista explotada de la cámara MWIR donde es posible apreciar el sistema óptico (sin el espejo), el *Radiometric Package* y la electrónica. La Figura 1.2e permite ver un diagrama simplificado de los arreglos de microbolómetros y la distribución de las 3 bandas en las cámaras MWIR y LWIR. En la Figura 1.2f se representa un diagrama simplificado de un arreglo donde es posible apreciar la disposición de los microbolómetros.

NIRST es un instrumento de sensado remoto pasivo que escanea la superficie terrestre en forma *along-track*, es decir, a lo largo de la pista¹. Se trata además de un instrumento multispectral ya que adquiere datos en distintas longitudes de onda. Los tres arreglos de microbolómetros de la cámara MWIR operan en la banda espectral de $[3.4, 4.2] \mu\text{m}$ con una longitud de onda central de $3.8 \mu\text{m}$ mientras que en el caso de la cámara LWIR, los arreglos 1 y 2 operan en la banda $[10.4, 11.3] \mu\text{m}$ y el arreglo 3 opera en la banda $[11.4, 12.3] \mu\text{m}$ siendo las longitudes de onda centrales $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$ respectivamente.

Objetivos de ciencia: La combinación de las bandas de $3.8 \mu\text{m}$ y $10.85 \mu\text{m}$ permite la detección de eventos de alta temperatura mediante la utilización del algoritmo de doble banda, o *dual-band algorithm* (Refs. [12], [13], [14]). Utilizando apropiadamente las temperatura de brillo y color de las bandas de $3.8 \mu\text{m}$ y $10.85 \mu\text{m}$ es posible determinar la potencia de fuego radiada (*Fire Radiated Power*, FRP).

Empleando esta información conjuntamente con el tamaño de la superficie quemada puede determinarse la energía de fuego radiada (*Fire Radiated Energy*, FRE). El conocimiento de estos parámetros permite estimar la tasa de emisión de aerosoles y gases residuales, de gran importancia para predicciones acerca del cambio climático global.

Otro objetivo de ciencia de la NIRST es proveer datos adicionales para los experimentos del instrumento Aquarius, midiendo la temperatura superficial del mar. Para ello se utiliza el algoritmo *split window* (Refs. [15],[16], [17], [18]) mediante los datos obtenidos a partir de las bandas de $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$.

Diseño mecánico: Las cámaras se encuentran albergadas en un compartimento de aluminio de $35 \times 40 \times 50 \text{cm}^3$, el cual está montado sobre la cara $+z$ de la Plataforma de Servicios del SAC-D (ver Figuras 1.1a y 1.1b). El compartimento de la NIRST se halla aislado térmi-

¹Ver Apéndice B sobre conceptos generales de teledetección.

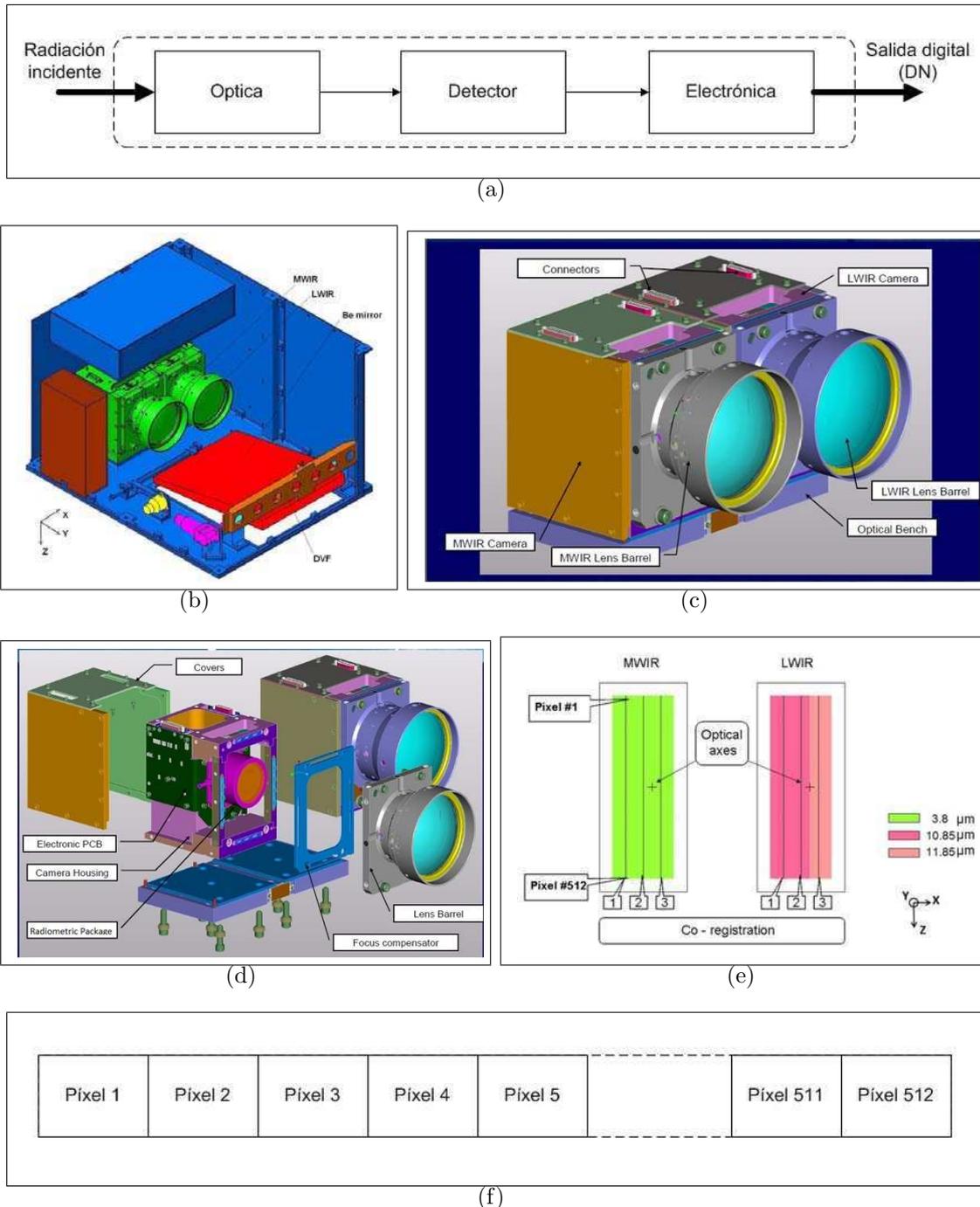


Figura 1.2: Descripción global del instrumento. Figura 1.2a: Diagrama simplificado del instrumento. Figura 1.2b: CAD de NIRST donde se aprecian las cámaras MWIR y LWIR así como el espejo de Be y el Dispositivo de Verificación Funcional (DVF). El sistema de referencia indicado es el del SAC-D. Figura 1.2c: Vista frontal de las cámaras. Figura 1.2d: Vista explotada de la cámara MWIR. Se aprecian el sistema óptico (sin el espejo), el *Radiometric Package* y la electrónica. Figura 1.2e: Diagrama mostrando los arreglos de microbolómetros de MWIR y LWIR y las 3 bandas. Figura 1.2f: Diagrama simplificado de un arreglo donde se muestra la disposición de los microbolómetros.

camente de los compartimentos principales de la Plataforma de Servicios, y sus paredes exteriores están cubiertas por mantas térmicas de *Multi Layer Insulation* (MLI) tal como puede apreciarse en la Figura 1.1b.

Las cámaras MWIR y LWIR se encuentran ubicadas una al lado de la otra compartiendo un banco óptico común que constituye la interfaz estructural y térmica con el compartimento del instrumento (Figuras 1.2b y 1.2c).

Cada cámara se compone de una cubierta, un barril de lentes y un *housing* que contiene el *Radiometric Package* y el cabezal óptico (ver Figura 1.2d). El propósito del *Radiometric Package* es proveer un entorno térmicamente estable donde las variaciones de temperatura del entorno tengan una influencia reducida en la respuesta del sensor.

Diseño óptico: La dificultad principal del diseño óptico de un instrumento infrarrojo reside en la selección de un material tolerante a las condiciones ambientales en las que se encuentra el satélite una vez puesto en órbita.

El diseño del módulo de cámaras de NIRST minimiza el espesor de los materiales ópticos optimizando la transmitancia y minimizando la emisividad del fondo térmico. El conjunto de lentes de la cámara MWIR se basa en una combinación de lentes de Silicio y Germanio mientras que el conjunto de lentes de la cámara LWIR se compone de lentes de Seleniuro de Zinc y Silicio.

El eje óptico de los arreglos coincide con el eje y y se encuentra contenido en el plano normal a la dirección nadiral y al vector velocidad del satélite. En cada línea o arreglo, los microbolómetros se numeran de 1 a 512 en el sentido $-z$ a $+z$ (Figuras 1.2e y 1.2f).

El espejo plano de Berilio utilizado para ampliar el *Field Of View* (FOV) de las cámaras constituye el otro componente óptico del instrumento. En la Figura 1.2b se observa el espejo en su posición *home*.

Diseño electrónico: El diseño eléctrico del módulo de las cámaras se compone de la electrónica de proximidad (ver Figura 1.2d) que interfiere con la electrónica de control del instrumento (en marrón en la Figura 1.2b). Las funciones principales de la electrónica de proximidad son abastecer el FPA de los microbolómetros y proveer una interfaz digital apropiada con la electrónica de control del instrumento.

Debido a la necesidad de mantener los microbolómetros estabilizados en temperatura, la electrónica de proximidad provee una interfaz para el monitoreo del FPA.

Operación: La Figura 1.2e muestra la configuración de arreglos de microbolómetros de la NIRST. La selección de líneas operativas de la NIRST es configurable por comando desde el

Segmento Terreno. Cabe destacar que sólo es posible seleccionar simultáneamente tres arreglos, cualquiera sea la combinación elegida. Sin embargo, para lograr los objetivos de ciencia del instrumento, debe elegirse un arreglo operativo por cada banda, teniendo en cuenta que dicha selección tiene como principal condicionante la disponibilidad de redundancias. Existe una configuración nominal por defecto en la cual las siguientes líneas se hallan operativas: MWIR2 (i.e., el arreglo 2 de MWIR), LWIR2 (i.e., el arreglo 2 de LWIR) y LWIR3 (i.e., el arreglo 3 de LWIR). Cabe destacar que la banda de 3.8 micrones tiene dos líneas redundantes (MWIR1 y MWIR3), mientras que la banda de 10.85 micrones sólo tiene una (LWIR1) y la banda de 11.85 micrones no posee ninguna redundancia. En caso de detectarse la falla de alguna de las líneas configuradas por defecto, la redundancia será puesta operativa.

La componente eléctrica del DVF que actúa como una fuente infrarroja de alta estabilidad es una Pt100K2515 Clase B. En vuelo el espejo de Be es enviado a su posición de *home* y el DVF es encendido, proveyendo radiación infrarroja estable a las cámaras MWIR y LWIR. El DVF es operado a una tensión regulada y se emplea para el chequeo de la estabilidad de la cámara, pero no es adecuado para calibración a bordo.

1.3. Objetivos de la tesis y resultados principales

El objetivo de esta tesis es presentar la calibración radiométrica de pre lanzamiento del instrumento NIRST. El trabajo realizado y los resultados obtenidos han sido presentados por Ganopol et al. 2013 (Ref. [19]) y Ganopol & Marraco 2014 (Ref. [20]). A continuación se resumen los aspectos más significativos de la tesis haciendo hincapié en el marco teórico que sustentó las mediciones en laboratorio y los resultados obtenidos durante la fase experimental. También se proveen recomendaciones basadas en lecciones aprendidas.

Marco teórico: En el ámbito del sensado remoto, dos tipos de calibración radiométrica son comunes: la calibración absoluta y la calibración relativa del instrumento. Durante la calibración absoluta, la respuesta del instrumento es comparada con una fuente conocida y uniforme de radiación, mientras que la calibración relativa consiste en equalizar la señal de salida cuando el sensor es irradiado por una fuente de radiancia uniforme. En el caso de NIRST, se calibraron radiométricamente los 512 microbolómetros de cada arreglo en ambas cámaras.

El modelo utilizado para la calibración absoluta del instrumento se basa en la utilización de ajustes polinomiales que relacionan la temperatura sensada y la potencia recibida por los

detectores con las cuentas digitales obtenidas a la salida de la electrónica.

El enfoque empleado para abordar la calibración relativa consistió en realizar ajustes polinomiales relacionando las cuentas medidas en cada uno de los microbolómetros de un dado arreglo con respecto a un microbolómetro de referencia dentro del mismo arreglo.

Debido a que las cámaras MWIR y LWIR reciben la radiación reflejada por el espejo, también se llevó a cabo la caracterización del mismo estudiando la respuesta en función del ángulo de apuntamiento relacionando las cuentas digitales obtenidas con un ángulo de apuntamiento arbitrario en comparación con un ángulo de referencia seleccionado.

Marco experimental: El trabajo en laboratorio se llevó a cabo en sala limpia a temperatura ambiente. Las mediciones necesarias para las calibraciones absoluta y relativa, así como para la caracterización del espejo se llevaron a cabo conjuntamente. Se iluminó el instrumento con fuentes de cuerpo negro configurándolas a distintas temperaturas, adquiriendo datos para ambas cámaras y 3 ángulos de apuntamiento del espejo correspondientes al apuntamiento nadiral (45°) y los apuntamientos extremos (30° y 60°).

Resultados obtenidos: El análisis de los resultados obtenidos en la calibración absoluta del instrumento reveló una diferencia intrínseca en el comportamiento de los píxeles pares e impares siendo esto aplicable a todos los arreglos de microbolómetros. Además, la definición del grado del polinomio ajustado en cada arreglo fue objeto de estudio obteniéndose en todos los arreglos de microbolómetros grados considerablemente más elevados que lo habitual en instrumentos infrarrojos a bordo de otras misiones espaciales.

El análisis de los resultados obtenidos en la calibración relativa del instrumento tiene dos ejes: uno es la selección del píxel de referencia y el otro es la definición del grado del polinomio de ajuste y el estudio de la ecualización obtenida. Debido a las diferencias intrínsecas entre píxeles pares e impares, se trabajó con dos píxeles de referencia en cada uno de los arreglos. El proceso de ecualización realizado muestra que las mayores contribuciones al efecto indeseado de barrado o *stripping* provienen fundamentalmente de la respuesta de los píxeles pares. Al igual que en la calibración absoluta, la calibración relativa requirió la utilización de polinomios de grado más elevado que el que ha sido necesario utilizar en cámaras infrarrojas en otras misiones espaciales.

El análisis realizado en cuanto a la caracterización del espejo mostró la conveniencia de utilizar una función lineal para ajustar su respuesta en función del ángulo de apuntamiento en cada arreglo de microbolómetros. Se observaron patrones característicos en las tendencias de las pendientes y ordenadas al origen resultantes de dichos ajustes, atribuyéndose los mismos

a la combinación entre la no uniformidad en temperatura radiada por las superficies de los cuerpos negros y el método de adquisición de datos empleado.

Recomendaciones para futuras misiones: Se proveen sugerencias para futuras misiones espaciales de la CONAE basándose en las lecciones aprendidas durante trabajo realizado en laboratorio y el análisis de los resultados obtenidos. Estas sugerencias son aplicables tanto al diseño del instrumento como a las metodologías de calibración radiométrica de cámaras infrarrojas.

1.4. Estructura de la tesis

En este trabajo se describe la calibración radiométrica de pre-lanzamiento de la NIRST. El Capítulo 2 brinda el marco físico basado en la ley de Planck y el enfoque matemático basado en ajustes de polinomios para las calibraciones absoluta y relativa. También se presenta el enfoque empleado para la caracterización de la respuesta del espejo.

El Capítulo 3 provee el marco experimental de la calibración de pre-lanzamiento.

En el Capítulo 4 se estudian características relacionadas al rango dinámico del instrumento y se discuten los resultados de la calibración absoluta del mismo.

En el Capítulo 5 se presentan y analizan los resultados de la calibración relativa.

En el Capítulo 6 se examinan los resultados de la caracterización de la respuesta del espejo de Berilio.

El Capítulo 7 propone sugerencias para futuras misiones espaciales de la CONAE en lo que respecta al diseño del instrumento y a las metodologías de calibración radiométrica de cámaras infrarrojas.

En el Capítulo 8 se brindan las conclusiones de esta tesis.

Se consideró conveniente proporcionar además tres apéndices para facilitar al lector la comprensión de algunos términos específicos y del contexto de la misión de la cual NIRST es parte. El Apéndice A brinda mayor información referida a la Misión SAC-D/Aquarius, el Apéndice B resume algunos conceptos de teledetección y el Apéndice C presenta una lista de los acrónimos y abreviaturas más utilizados en este trabajo.

1.5. Terminología empleada en la tesis

En la tesis se utilizan como sinónimos los términos **microbolómetro**, **píxel** y **detector**. Asimismo se emplean en forma equivalente **arreglo** (de microbolómetros) y **línea**. Por ejemplo: La oración: "*Cada arreglo está conformado por 512 microbolómetros*" es equivalente a "*Cada línea está conformada por 512 píxeles*".

El término **sensor** hace referencia a un conjunto integrado de detectores. Por ejemplo: En la expresión "*sensor enfriado*", "*sensor*" se refiere al *conjunto de detectores enfriados*.

El término **cámara** puede ser utilizado para referirse al instrumento NIRST como sistema completo o bien a una o ambas cámaras que lo componen, sin embargo, el significado se infiere del contexto sin ambigüedad.

Por ejemplo: En la expresión "*NIRST es una cámara infrarroja*", "*cámara*" se refiere al instrumento completo, mientras que en "*Las cámaras MWIR y LWIR*" se hace referencia a los módulos MWIR y LWIR.

Capítulo 2

Marco físico y enfoque matemático

En este capítulo se abordan el marco físico y el enfoque matemático en los cuales se basan las mediciones en laboratorio y el análisis de los resultados obtenidos en lo referido a la calibración radiométrica de pre lanzamiento de NIRST. Se presentan los tratamientos correspondientes a las calibraciones absoluta y relativa y a la caracterización de la respuesta del espejo en función del ángulo de apuntamiento.

La obtención consistente de datos a partir de mediciones físicas requiere la calibración del instrumento de medición empleado. Los instrumentos a bordo de satélites no son la excepción y debe prestarse especial atención a la degradación de los sensores en cuanto a la respuesta a la señal radiométrica medida. En el ámbito del sensado remoto dos tipos de calibración radiométrica son comunes: la calibración absoluta y la calibración relativa. Estas constituyen la principal herramienta de caracterización de un sensor (Ref. [21]). Durante la calibración absoluta, la respuesta del instrumento es comparada con una fuente conocida y uniforme de radiación (Ref. [22]) mientras que la calibración relativa se determina normalizando la señal de salida. El resultado de la normalización es que todos los detectores generan la misma salida cuando el plano focal de un sensor es irradiado con un campo de radiancia uniforme. En este caso no es necesario conocer los valores absolutos de radiancia (Ref. [21]).

Calibración absoluta: La calibración radiométrica de pre-lanzamiento permite determinar la calibración absoluta de un sensor. El enfoque usual para la calibración de sensores comienza con la formulación de un modelo de calibración que relaciona la radiancia L con la salida digital del sensor. La radiancia espectral L_{bb} de un cuerpo negro radiando a una temperatura T_b se expresa como sigue:

$$L_{bb} = \frac{2hc^2}{(e^{hc/\lambda kT_b} - 1)\lambda^5} \quad (2.1)$$

La potencia Φ recibida por cada píxel se escribe entonces según:

$$\Phi(T_b) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \epsilon L_{bb}(T_b, \lambda) \Psi(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

donde, en el caso de NIRST, λ_{min} y λ_{max} son las cotas inferior y superior que definen cada banda, $\Psi(\lambda)$ es la respuesta espectral del píxel, definida a partir del invariante óptico, producto del área de cada microbolómetro y el ángulo sólido subtendido por la pupila de entrada (Refs. [11], [23]) y ϵ es la emisividad del cuerpo negro empleado en laboratorio (ver Capítulo 3).

La ley de Planck permite transformar T_b en la potencia radiada equivalente, lo cual se traduce por una diferencia de potencial en el píxel. La electrónica de cada *Radiometric Package* convierte dicha tensión en cuentas digitales (*Digital Numbers*, DN). Es esperable entonces poder establecer una relación entre DN y T_b , o su equivalente en potencia recibida Φ por cada uno de los 512 píxeles en cada uno de los 6 arreglos de microbolómetros de NIRST.

Para los casos de MODIS y AVHRR/NOAA-16, Cao & Heidinger (Ref. [24]) convierten la radiancia espectral efectiva, calibrada a partir de DN, a temperatura efectiva T^* por medio de la inversa de la función de Planck. Luego, la temperatura de brillo T se deriva utilizando una regresión lineal entre T y T^* . En la calibración de THEMIS, Christensen (Ref. [25]) realiza un ajuste lineal convirtiendo cuentas digitales en radiancia espectral para modelar la respuesta del instrumento. Murphy-Morris & Wack (Ref. [26]) para la misión GOES N-Q Imager and Sounder y Bruegge et al. (Refs. [27] y [28]) para la misión MISR utilizan ecuaciones de calibración cuadráticas que relacionan radiancia y cuentas digitales para cada píxel de cada banda espectral. En ambas misiones la no linealidad del instrumento se indica examinando ya sea el coeficiente cuadrático o bien el porcentaje de no linealidad de la pendiente. También, como indican Dinguirard & Slater (Ref. [21]), si el sensor es lineal, la salida digital es proporcional a la radiancia, pero, con el objetivo de tomar en cuenta cualquier posible no linealidad, un modelo cuadrático puede ser adoptado.

Tomando como referencia estos análisis previos, se realizaron ajustes polinomiales $T_b(DN)$ y $\Phi(DN)$ para calibrar en forma absoluta la NIRST, siendo los grados de dichos polinomios objeto de estudio. Según estas consideraciones, se tienen la temperatura T_{bi} y la potencia radiada Φ_i de un píxel arbitrario i :

$$T_{bi} = \sum_{j=0} a_j * DN_i^j \quad (2.3)$$

y

$$\Phi_i = \sum_{j=0} b_j * DN_i^j \quad (2.4)$$

donde $\{a_j\}$ y $\{b_j\}$ son los coeficientes de calibración radiométrica absoluta de temperatura y potencia. Las ecuaciones 2.3 y 2.4 se denominan "Funciones de Calibración Radiométrica Absoluta" del píxel i para temperatura y potencia respectivamente.

Calibración relativa: La característica principal del proceso de calibración relativa es que permite la corrección de diferencias en cada píxel de un arreglo de microbolómetros. La calibración relativa se encuentra entonces motivada por la necesidad de ecualizar la respuesta de los píxeles de un sensor con el propósito de evitar el efecto de barreado o *stripping* (Ref. [21], Ref. [29], Ref. [30]). En la misión CCD/CBERS-2B, Ponzoni & Carneiro (Ref. [31]) realizan la calibración relativa obteniendo ganancias y offsets para cada detector en cada banda espectral. Por otro lado, Corsini, Diani & Walzel (Ref. [29]) en el caso de MOS-B y Carfantan & Idier (Ref. [30]) en el caso de SPOT realizan la calibración relativa utilizando modelos polinomiales.

En el presente trabajo se estableció una "Función de Calibración Relativa" para cada píxel de cada uno de los 6 arreglos de microbolómetros de NIRST. Se propuso una relación polinomial entre las cuentas DN_i de un píxel arbitrario i y las cuentas digitales del píxel de referencia en un dado arreglo, DN_{ref} :

$$DN_i = \sum_{j=0} c_j * DN_{ref}^j \quad (2.5)$$

siendo $\{c_j\}$ los coeficientes de la calibración radiométrica relativa de ese arreglo. Además de la reducción del *stripping*, la calibración relativa provee la posibilidad de utilizar un único juego de coeficientes para la calibración absoluta: i.e., el juego de coeficientes correspondientes al píxel de referencia. Sin embargo, en tierra, la calibración absoluta de todos los píxeles permite la caracterización de cada uno y la obtención de una respuesta general para cada arreglo. Cabe destacar que la selección del píxel de referencia a ser utilizado es objeto de

estudio en el presente trabajo.

Respuesta en función del ángulo de apuntamiento: Un enfoque similar es aplicable a la caracterización del espejo de Be de NIRST estudiando la respuesta en función del ángulo de apuntamiento β (*Response Versus Scan Angle*, RVS). El estudio de la RVS se halla motivado por las siguientes razones. Por un lado, dado que las cámaras reciben la radiación reflejada por el espejo, es necesario conocer la respuesta del mismo en función del ángulo de apuntamiento utilizado. Además, la caracterización del espejo en tierra permite detectar cualquier comportamiento anómalo o degradación del mismo una vez que el SAC-D se encuentre en órbita. Xiong et al. (Ref. [32]) definen la RVS como la respuesta del espejo de MODIS cuando un píxel observa la Tierra con un dado ángulo de incidencia. La RVS final de MODIS se determina mediante un ajuste cuadrático de la respuesta de los detectores como función del ángulo de incidencia en el espejo (Ref. [33]). En el presente trabajo se define la RVS como la relación entre las cuentas obtenidas con un ángulo β arbitrario tomando como referencia el ángulo de apuntamiento nadiral ($\beta = 45^\circ$) ante una misma temperatura de cuerpo negro. Para un píxel arbitrario i se obtiene entonces la siguiente relación:

$$DN_{i\beta} = \sum_{j=0} d_j * DN_{i45^\circ}^j \quad (2.6)$$

donde $DN_{i\beta}$ son las cuentas registradas por el píxel arbitrario i cuando el ángulo de apuntamiento es β , DN_{i45° son las cuentas del píxel i correspondientes al ángulo de apuntamiento de referencia y d_j son los coeficientes del ajuste realizado.

Estudio de los grados de los polinomios: El objetivo del presente trabajo es determinar los grados de polinomio más adecuados a ser utilizados por las ecuaciones 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6. Con el fin de optimizar los ajustes polinomiales, los datos han sido normalizados de acuerdo a la siguiente expresión:

$$DN_i^{norm} = \frac{DN_i - \overline{DN}_i}{\sigma_{DN_i}} \quad (2.7)$$

donde, para un píxel arbitrario i , DN_i corresponde a los datos medidos, $\overline{DN}_i = mean(DN_i)$ y σ_{DN_i} es la desviación standard:

$$\sigma_{DN_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (DN_i - \overline{DN_i})^2} \quad (2.8)$$

Tanto la media como la desviación standard son calculadas a partir del conjunto de datos obtenidos para cada temperatura de cuerpo negro utilizada durante la calibración radiométrica realizada en tierra (ver Capítulo 3). La transformación 2.7 permite mejorar las propiedades numéricas del algoritmo de calibración mediante el centrado y la normalización de datos.

Tanto en las calibraciones absoluta y relativa como en la caracterización del espejo, el grado del polinomio que mejor ajuste los datos experimentales debe ser determinado. El grado óptimo surge de minimizar la varianza de los errores de la muestra:

$$\|r\|_{var} = \frac{\overline{\|r\|_{2var}}}{\sqrt{n - m - 1 - 2}} \quad (2.9)$$

donde var es alguno de los elementos del conjunto $\{T, P, DN_i, DN_{i\beta}\}$, n es la cantidad de datos medidos, m es el grado del ajuste polinomial y $\overline{\|r\|_2}$ es el promedio de la norma 2 de los residuos sobre el conjunto de píxeles de un dado arreglo.

Capítulo 3

Calibración radiométrica en laboratorio

En este capítulo se describe el proceso de calibración radiométrica de NIRST en laboratorio. En las secciones que siguen se enumeran requerimientos clave relacionados con el diseño y la caracterización radiométrica de NIRST (Sección 3.1) y se brinda una descripción detallada sobre el equipamiento (Sección 3.2) y el setup experimental (Sección 3.3) utilizados durante la calibración radiométrica de pre-lanzamiento del instrumento. Asimismo, se describen el conjunto de mediciones previas a la adquisición de datos radiométricos (Sección 3.4) y el proceso de adquisición de datos del instrumento (Sección 3.5).

3.1. Requerimientos clave

Las especificaciones de NIRST cubren la definición del rango dinámico de temperaturas del instrumento, la longitud de onda central y ancho de banda de cada banda, la precisión de los productos de ciencia, la sensibilidad y las condiciones ambientales relacionadas con la operación del instrumento. A continuación se enumeran aquellos requerimientos relacionados con el diseño y la caracterización radiométrica de NIRST:

- NIRST debe poseer un rango dinámico de $[300K, 600K]$ para MWIR y $[250K, 500K]$ para LWIR.
- La longitud de onda central de cada una de las bandas de NIRST debe ser $3.8\mu\text{m}$, $10.85\mu\text{m}$ y $11.85\mu\text{m}$, con un ancho de banda de $0.8\mu\text{m}$ en el caso de MWIR y $0.9\mu\text{m}$ en el caso de LWIR.

- Los datos de NIRST deben tener una precisión superior a 2.5K a 300K en el caso de la cámara MWIR y superior a 2K a 200K en el caso de la cámara LWIR.
- NIRST debe tener un $NETD = 1,8K@400K$ para MWIR y $NETD = 0,6K@300K$ para LWIR, siendo 400K y 300K las temperaturas de escena típicas de las cámaras MWIR y LWIR respectivamente. El $NETD$ (*Noise Equivalent Temperature Difference*) es una medida de la menor diferencia de temperatura que se puede medir entre dos píxeles contiguos y por lo tanto es un indicador de la sensibilidad del instrumento: cuanto menor es el $NETD$ mayor es la sensibilidad del instrumento.
- Las lentes y barriles de NIRST deben operar en el rango $[10^{\circ}C, 18^{\circ}C]$.
- La presión de los *Radiometric Packages* debe ser inferior a 0.013 mBar con el fin de garantizar que las cámaras MWIR y LWIR estén operativas.

Estos requerimientos dan el marco para el diseño de los *Radiometric Packages*, la selección del equipamiento necesario para la calibración radiométrica de pre-lanzamiento y el plan de ejecución de la misma.

3.2. Equipamiento utilizado

La calibración radiométrica de pre-lanzamiento de la NIRST fue realizada en la sala limpia Clase 100.000 del Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados (GEMA), ubicado en la ciudad de La Plata, con temperatura y humedad controladas. El equipamiento principal utilizado durante la fase experimental fue el siguiente:

- Modelo de vuelo de NIRST (sin mantas térmicas colocadas).
- Sistema de adquisición de datos que simula la interfaz entre NIRST y PAD¹. El mismo está compuesto por una computadora rackeable que aloja el software de control. Dicho software, desarrollado en el entorno de National Instruments LabWindows/CVI permite la comunicación con la FPGA del instrumento, enviando comandos hacia la misma, y recibiendo los datos a través del puerto serie RS-422.
- Bomba de vacío Varian Mini - TASK AG81 turbomolecular mediante la cual se logra controlar la presión de cada uno de los *Radiometric Packages*.

¹Para detalles sobre el subsistema de Procesamiento y Adquisición de Datos, PAD, ver Apéndice A.

- Dos cuerpos negros Santa Barbara IR (SBIR) Series 2004 y 4006 cuyas propiedades principales se describen en la Tabla 3.1 y mediante los cuales se logra cubrir el rango dinámico de temperaturas que mide el instrumento.
- Robot articulado de 6 ejes FANUC M-710iC/50 para posicionar la cámara delante del cuerpo negro.
- Banco óptico.

Características	Cuerpo Negro SBIR 2004 (SBB)	Cuerpo Negro SBIR 4006 (BBB)
Superficie [pulgadas ²]	4	6
Dimensiones [mm x mm]	101.6 x 101.6	152.4 x 152.4
Rango de temperatura [K]	273 - 373	323 - 873
Emisividad	0.985 ± 0.015	0.93 ± 0.03
Estabilidad	0.003 °C (corto rango) 0.01 °C (largo rango)	0.05 °C (corto rango) 0.5 °C (largo rango)
Precisión [°C]	± 0.01	± 2
Resolución [°C]	0.001	0.1

Tabla 3.1: Características de los cuerpos negros SBIR 2004 y SBIR 4006.

3.3. Setup experimental

La calibración radiométrica de pre-lanzamiento de NIRST, descrita por Ganopol et al. (Ref. [19]) fue realizada antes de que el instrumento se encontrara completamente integrado mecánica y térmicamente. Posteriormente a la fase de calibración en tierra, NIRST fue sellada y expuesta a los tests de EMI/EMC, vibración y termovacío. Varias misiones espaciales tales como THEMIS (Ref. [25]), GEOS N-Q Imager and Sounder instruments (Ref. [26]), AIRS (Ref. [34]), ASTER (Ref. [35]), Landsat (Ref. [36]) y MODIS (Ref. [37]) realizan la calibración radiométrica de pre-lanzamiento de sus sensores infrarrojos en una cámara de termovacío. Sin embargo, los cuerpos negros comerciales como los utilizados en el caso de NIRST están diseñados para operar a presión atmosférica, de modo que no pudieron ser ingresados a la

cámara de termovacío. Debido a que esta última no posee una ventana de Ge que permita realizar las mediciones con los cuerpos negros fuera de la misma, la calibración radiométrica se llevó a cabo en laboratorio utilizando el equipamiento descrito en la Sección 3.2.

La Figura 3.1a permite apreciar el setup utilizado durante la calibración radiométrica de pre-lanzamiento de NIRST. En la Figura 3.1b se observa un primer plano del instrumento tal como se ve desde la ubicación de la fuente utilizada. El instrumento fue montado con su cara $-z$ sujeta al brazo del robot FANUC M-710iC50. Debido a que las cámaras MWIR y LWIR deben cubrir los rangos [300K, 600K] y [250K, 500K] respectivamente, dos fuentes de cuerpo negro *Santa Barbara Infrared* abarcando los rangos [273K, 373K] (*Small Blackbody*, SBB) y [323K, 873K] (*Big Blackbody*, BBB) y cuyas propiedades se describen en la Tabla 3.1 fueron ubicadas en un banco óptico, frente a la cara $+z$ del instrumento. Con el fin de cumplir con los requerimientos expuestos en la Sección 3.1, una bomba turbomolecular de vacío, Varian Mini - TASK AG81, fue conectada a los *Radiometric Packages* de NIRST. Antes de comenzar las mediciones necesarias para la calibración radiométrica se llevó a cabo el proceso de degase de estos últimos con el fin de llevarlos a la presión operativa requerida. Finalizado el degase, el fabricante de las cámaras MWIR y LWIR procedió a verificar el requerimiento relativo al NETD² comparando los valores antes y después del traslado de los *Radiometric Packages* de Canadá a la Argentina. Luego de verificar los valores de NETD de acuerdo a los requerimientos se estuvo en condiciones de iniciar las mediciones relativas a la calibración radiométrica.

Cabe destacar que durante todo el proceso de calibración la temperatura y humedad ambiente, al igual que la presión de la bomba de vacío, fueron controladas.

3.4. Mediciones previas a la adquisición de datos

Con el objetivo de establecer la calibración radiométrica de pre-lanzamiento de la NIRST, se realizaron mediciones para los 6 arreglos de microbolómetros, configurando diversos valores de temperatura de cuerpo negro y ángulo de apuntamiento del espejo. Antes de comenzar con el proceso de adquisición de datos, fue necesario establecer una relación entre los pasos comandados al espejo de Be y el ángulo de apuntamiento del mismo. Dicha relación puede ser observada en la Tabla 3.2. Aunque el ángulo de apuntamiento nadiral correspondiente a $\beta = 45^\circ$ fue empleado como el nominal durante el proceso de calibración, también se

²En el Capítulo 7 se describe como fue obtenido este valor por el fabricante.

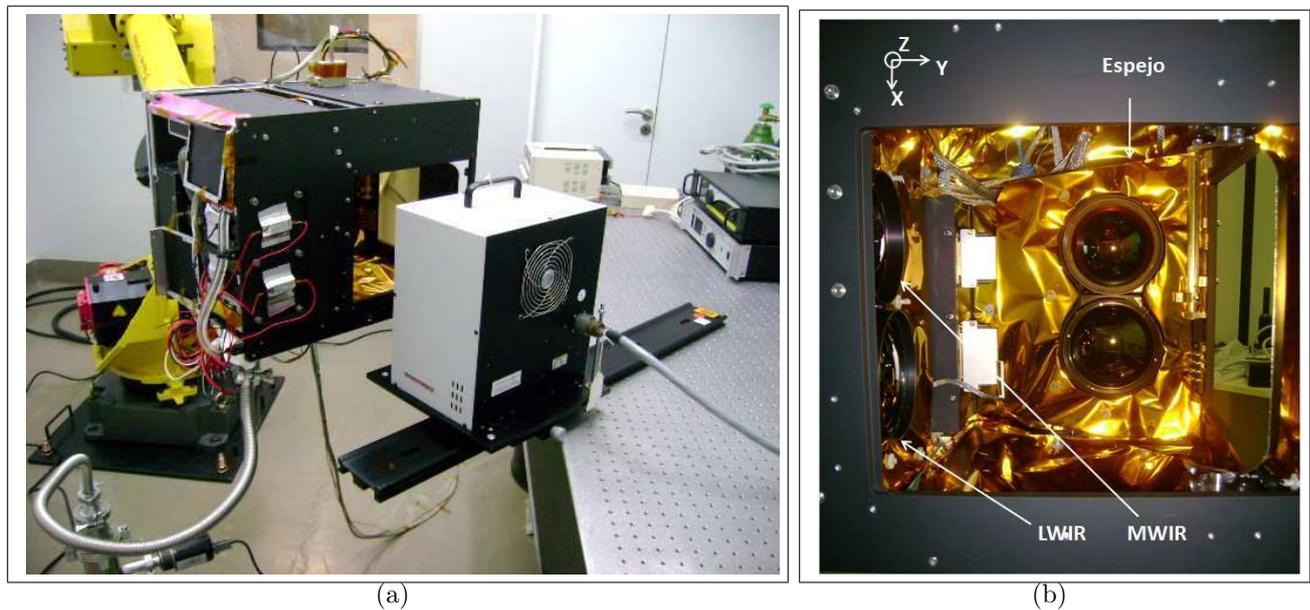


Figura 3.1: Izquierda: Setup utilizado durante la calibración radiométrica en laboratorio: se observa el instrumento con su cara $-z$ sujeta al brazo del robot FANUC M-710iC50 (en amarillo, al fondo) y una de las fuentes de cuerpo negro colocada sobre el banco óptico, frente a la cara $+z$ del instrumento. También se distingue la conexión de la bomba de vacío a los *Radiometric Packages*. Derecha: Foto de NIRST tal como se ve desde la ubicación de la fuente utilizada.

adquirieron datos para otros dos ángulos, 30° y 60° , con el fin de poder realizar posteriormente la caracterización de la respuesta en función del ángulo de apuntamiento del espejo, descrita en el Capítulo 6.

Debido a que la superficie radiante de los cuerpos negros no era suficientemente grande para cubrir, en una única medición, todo el plano focal de cada cámara, fueron necesarias múltiples mediciones del mismo arreglo para poder "inundar" los 512 microbolómetros. Por lo tanto, se procedió a establecer la relación entre los arreglos de microbolómetros y la fuente de cuerpo negro utilizada para cada ángulo de apuntamiento mencionado anteriormente. La cantidad de reposicionamientos de los cuerpos negros delante de las cámaras dependió del ángulo de apuntamiento β del espejo y del tamaño de la superficie emisora. La Tabla 3.3 presenta los píxeles que delimitan las distintas regiones BB_i iluminadas por los cuerpos negros para cada cámara y ángulo β , dependiendo de la fuente empleada (SBB o BBB)³.

³Recordar que la numeración y distribución de los píxeles en cada arreglo es la que se muestra en las

Paso comandado	β (°)	Posición del espejo	Apuntamiento de NIRST
0	-6.5	<i>Home</i>	DVF
41	0	En el plano $\{x, y\}$	-
231	30	Inicio del rango óptico útil	Posición extrema hacia el sector nocturno
325	45	Apuntamiento medio	Nadir
420	60	Fin del rango óptico útil	Posición extrema hacia el sector diurno

Tabla 3.2: Relación entre los pasos comandados al espejo de Be y los ángulos de apuntamiento: posición comandada en pasos (columna 1), ángulo de apuntamiento asociado en ° (columna 2), posición del espejo (columna 3) y apuntamiento final de NIRST (columna 4).

Debido a que no se realizarían adquisiciones con la fuente SBB para la cámara MWIR, no fue necesario establecer la relación entre ambos. Naturalmente, como la fuente SBB tiene una superficie emisora más pequeña que la fuente BBB, la cantidad de reposicionamientos al emplear la primera fue mayor que al utilizar la última.

Es relevante mencionar que en misiones como Landsat Continuity Mission (Ref. [38]) y MODIS (Ref. [39]) los cuerpos negros empleados para la calibración radiométrica en tierra fueron previamente caracterizados. Por motivos programáticos, en el caso de NIRST esta actividad no se llevó a cabo para las fuentes de estantería empleadas.

3.5. Proceso de adquisición de datos

Luego de establecer la relación entre el ángulo de apuntamiento del espejo y los pasos comandados (Tabla 3.2), y de identificar las regiones de los arreglos de microbolómetros de cada cámara (Tabla 3.3), se dio inicio a la adquisición de datos para la calibración radiométrica y caracterización de la RVS del espejo. Al igual que en el caso de la RVS de las bandas del infrarrojo térmico de MODIS (Refs. [32] y [37]), la RVS del espejo de NIRST se llevó a cabo en laboratorio a temperatura ambiente. Sin embargo, a diferencia de MODIS, la RVS de NIRST se realizó conjuntamente con el proceso de adquisición de datos de calibración

β (°)	Píxeles inundados por SBB		Píxeles inundados por BBB	
	LWIR	MWIR	LWIR	MWIR
30	BB1: 0 - 75 BB2: 76 - 125 BB3: 126 - 200 BB4: 201 - 275 BB5: 276 - 300 BB6: 301 - 400 BB7: 401 - 450 BB8: 451 - 511	N/A	BB1: 0 - 200 BB2: 201 - 375 BB3: 376 - 511	BB1: 0 - 175 BB2: 176 - 360 BB3: 361 - 511
45	BB1: 0 - 100 BB2: 101 - 275 BB3: 276 - 400 BB4: 401 - 511	N/A	BB1: 0 - 255 BB2: 256 - 511	BB1: 0 - 255 BB2: 256 - 511
60	BB1: 0 - 75 BB2: 76 - 150 BB3: 151 - 250 BB4: 251 - 350 BB5: 351 - 511	N/A	BB1: 0 - 115 BB2: 116 - 244 BB3: 245 - 400 BB4: 401 - 511	BB1: 0 - 120 BB2: 121 - 255 BB3: 256 - 400 BB4: 401 - 511

Tabla 3.3: Múltiples adquisiciones fueron realizadas con el propósito de "inundar" cada uno de los 512 microbolómetros ya que el área de los cuerpos negros no cubría por completo cada arreglo. La cantidad de reposicionamientos dependió del ángulo de apuntamiento β del espejo de Be y del tamaño de la superficie emisora del cuerpo negro. En el caso de MWIR no se realizaron adquisiciones con la fuente SBB por lo cual se indicó con N/A (No Aplicable).

radiométrica.

El procedimiento de adquisición se basó en el utilizado por Irwin et al. en el sistema MIRAGE (Ref. [40]). Se configuró la temperatura del cuerpo negro de acuerdo al *set-point* deseado a menos de 0.1K. Con el fin de establecer cada cuanto variar el *set-point* del cuerpo negro se evaluó la potencia de cada una de las bandas a partir de la Ecuación 2.2 considerando los parámetros de diseño de las mismas. En la Figura 3.2 pueden apreciarse la potencia Φ en función de la temperatura para las bandas de $3.8\mu\text{m}$ (Figura 3.2a), $10.85\mu\text{m}$ (Figura 3.2b, círculos rojos) y $11.85\mu\text{m}$ (Figura 3.2b cruces azules), donde los rangos de temperatura graficados corresponden a los rangos dinámicos de temperaturas que mide cada una de las cámaras. En el caso de la cámara MWIR no se observan variaciones significativas por debajo

de los 400K. Por tal motivo, y teniendo en cuenta un cronograma de misión ajustado, en el caso de la cámara MWIR sólo se realizaron adquisiciones para temperaturas de cuerpo negro $T_{bb} \geq 373K$. De acuerdo a esto, sólo la fuente BBB fue empleada en la calibración radiométrica de MWIR, mientras que ambas fuentes SBB y BBB fueron necesarias en el caso de la cámara LWIR. Los siguientes rangos de temperaturas de cuerpo negro fueron empleados en cada una de las cámaras:

- $T_{bb} = [373K, 600K]$ para la cámara MWIR
- $T_{bb} = [273K, 520K]$ para la cámara LWIR

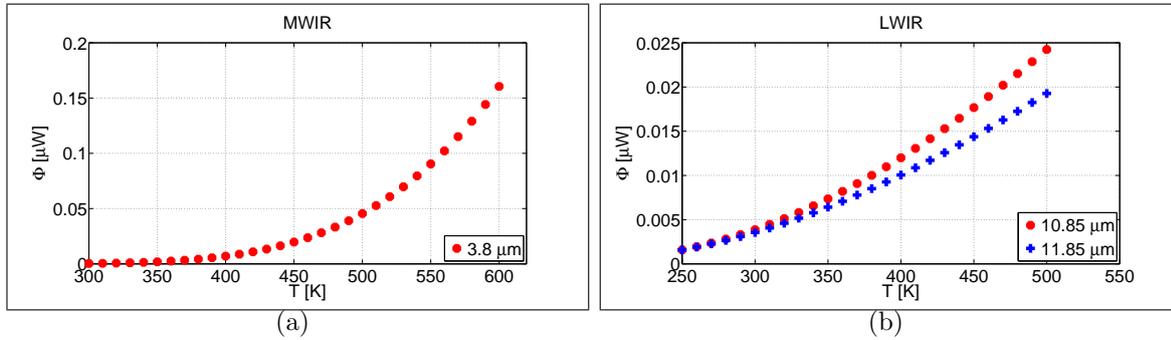


Figura 3.2: Potencia en función de la temperatura de las bandas de $3.8\mu\text{m}$ (panel izquierdo), $10.85\mu\text{m}$ (panel derecho, círculos rojos) y $11.85\mu\text{m}$ (panel derecho, cruces azules).

Debido a restricciones impuestas por el cronograma de la misión, se definió un conjunto reducido de temperaturas para los cuerpos negros y se adquirieron datos incrementando el *set-point* de la fuente. Luego de completar el set inicial, se seleccionaron valores intermedios de temperatura T_{bb} . También por razones programáticas no fue posible repetir las mediciones para las distintas T_{bb} ni caracterizar la RVS del espejo para otros valores de β .

Una vez alcanzado el *set-point*, se adquirieron 100 muestras durante 24 segundos, para cada región BB_i , en forma simultánea para los tres arreglos de cada cámara. Al terminar la adquisición de todas las regiones BB_i de una dada cámara, se procedió a repositionar el brazo del robot para adquirir datos para la siguiente cámara. El tiempo de repositionamiento del robot entre la posición de origen y la de destino fue de unos 30-40 segundos, de modo que se logró cubrir cada arreglo de microbolómetros en aproximadamente 3 minutos, dependiendo de la cantidad de regiones BB_i . Se repitió este proceso para cada temperatura de cuerpo negro T_{bb} y ángulo de apuntamiento del espejo detallados en la Tabla 3.4.

T_{bb} [K]	Cuerpo Negro	Cámara LWIR (Angulo β [°])	Cámara MWIR (Angulo β [°])
273	SBB	45	N/A
280	SBB	30,45,60	N/A
290	SBB	45	N/A
300	SBB	30,45,60	N/A
320	SBB	30,45,60	N/A
340	SBB	30,45,60	N/A
350	SBB	45	N/A
360	SBB	30,45,60	N/A
373	SBB	45	N/A
373	BBB	30,45,60	30,45,60
390	BBB	30,45,60	30,45,60
400	BBB	30,45,60	30,45,60
410	BBB	30,45,60	30,45,60
420	BBB	30,45,60	30,45,60
430	BBB	30,45,60	30,45,60
440	BBB	30,45,60	30,45,60
460	BBB	30,45,60	30,45,60
480	BBB	30,45,60	30,45,60
500	BBB	30,45,60	30,45,60
510	BBB	30,45,60	30,45,60
520	BBB	30,45,60	30,45,60
530	BBB	N/A	30,45,60
540	BBB	N/A	30,45,60
550	BBB	N/A	30,45,60
560	BBB	N/A	30,45,60
570	BBB	N/A	30,45,60
580	BBB	N/A	30,45,60
590	BBB	N/A	30,45,60
600	BBB	N/A	30,45,60

Tabla 3.4: Adquisiciones realizadas con cada cámara. La columna 1 muestra el setpoint T_{bb} del cuerpo negro, en Kelvin (K). La columna 2 especifica el cuerpo negro utilizado en cada medición (SBB o BBB). Las columnas 3 y 4 corresponden a las mediciones realizadas con las cámaras LWIR y MWIR indicando el ángulo de apuntamiento β medido en grados (°) en cada caso.

Capítulo 4

Calibración absoluta

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de la calibración absoluta de NIRST.

La adquisición de datos se llevó a cabo de acuerdo al proceso descrito en la Sección 3.5. A partir de las temperaturas de cuerpo negro T_{bb} es posible calcular mediante la Ecuación 2.1 la radiancia medida por cada microbolómetro. Teniendo en cuenta los filtros de cada banda, el invariante óptico de cada cámara y las emisividades de los cuerpos negros, la Ecuación 2.2 permite obtener la potencia radiada para una dada T_{bb} . Realizar la calibración radiométrica absoluta de la NIRST para distintos ángulos de apuntamiento del espejo equivale a obtener juegos de coeficientes de calibración radiométrica para cada microbolómetro de cada arreglo, relacionando de este modo cuentas digitales DN con temperatura de brillo T_b o su potencia radiada equivalente.

Debido a que el estudio de la RVS del espejo se realiza en forma independiente (ver Capítulo 6), la calibración radiométrica absoluta se realizó únicamente para el apuntamiento nadiral $\beta = 45^\circ$, tomando el juego de temperaturas presentado en la Tabla 3.4. Tal como se mencionó en la Sección 3.5, en todos los casos se adquirieron 100 lecturas por cada uno de los 512 microbolómetros de cada arreglo con el objetivo de tener suficiente estadística. Para cada píxel se realizó un promedio de DN sobre las 100 muestras adquiridas.

Con el fin de calibrar radiométricamente el instrumento es necesario tomar conocimiento sobre algunas características de aquello que se va a calibrar. Por ello, en la Sección 4.1 se estudia el rango dinámico de cada arreglo identificando aspectos valiosos para el resto de este trabajo. Posteriormente, en la Sección 4.2, se discuten los resultados de la calibración radiométrica absoluta del instrumento. Haciendo uso de las ecuaciones 2.3 y 2.4, se realizan ajustes polinomiales con los datos normalizados de acuerdo a la expresión 2.7, obtenidos

para los conjuntos de temperaturas descritos en la Tabla 3.4, siendo $\beta = 45^\circ$. En la Sección 4.3, se analiza la función de transferencia de cada arreglo, siendo los resultados de la misma útiles para la interpretación de los resultados de la calibración relativa. (Capítulo 5). Finalmente, en la Sección 4.4, se discuten estudios complementarios sobre la correlación entre la temperatura del FPA y la temperatura de cuerpo negro.

4.1. Estudio del rango dinámico

El estudio del rango dinámico permitió identificar características intrínsecas de cada píxel, arreglo o banda. Estas propiedades son valiosas para la interpretación de los resultados de calibración obtenidos. Además, dichas propiedades permiten establecer un punto de referencia anterior a la puesta en órbita del satélite, de modo que posteriormente al primer encendido en vuelo del instrumento se pueda evaluar si hubo alguna degradación.

Se registró la respuesta de cada detector ante una temperatura de cuerpo negro determinada y se graficó la respuesta en temperatura y en potencia de cada uno de los 512 píxeles en cada arreglo de cada cámara. En las Figuras 4.1 y 4.2 se presentan a modo de ejemplo las respuestas en temperatura (paneles superiores) y potencia (paneles inferiores) del píxel 255 de cada arreglo de microbolómetros de las cámaras MWIR y LWIR respectivamente. En todos los casos, mayores valores de $|DN|$ corresponden a mayores temperaturas. La inspección visual de este tipo de gráfico indicó tendencias diferentes en píxeles pares e impares, y también reveló comportamientos atípicos de algunos microbolómetros en ambas cámaras. A continuación se analizan estos temas.

Uno de los aspectos más llamativos al comparar píxeles pares e impares en ambas cámaras fue el distinto rango dinámico en cuentas presentado por los mismos ante iguales valores de temperatura de cuerpo negro. En cada arreglo, se definió el rango dinámico Δ_{DN^i} correspondiente al microbolómetro i según la expresión:

$$\Delta_{DN^i} = DN_{T_{bb}^{min}}^i - DN_{T_{bb}^{max}}^i \quad (4.1)$$

donde $DN_{T_{bb}^{max}}^i$ y $DN_{T_{bb}^{min}}^i$ corresponden a los valores en cuentas del píxel i para la mayor y menor temperatura de cuerpo negro utilizada respectivamente. La Figura 4.3 presenta el rango dinámico en cuentas (DN) de las cámaras MWIR (paneles izquierdos) y LWIR (paneles derechos). Se observa el rango dinámico de los píxeles pares (verde) e impares (azul) de los arreglos MWIR1 (a), MWIR2 (c), MWIR3 (e), LWIR1 (b), LWIR2 (d) y LWIR3 (f).

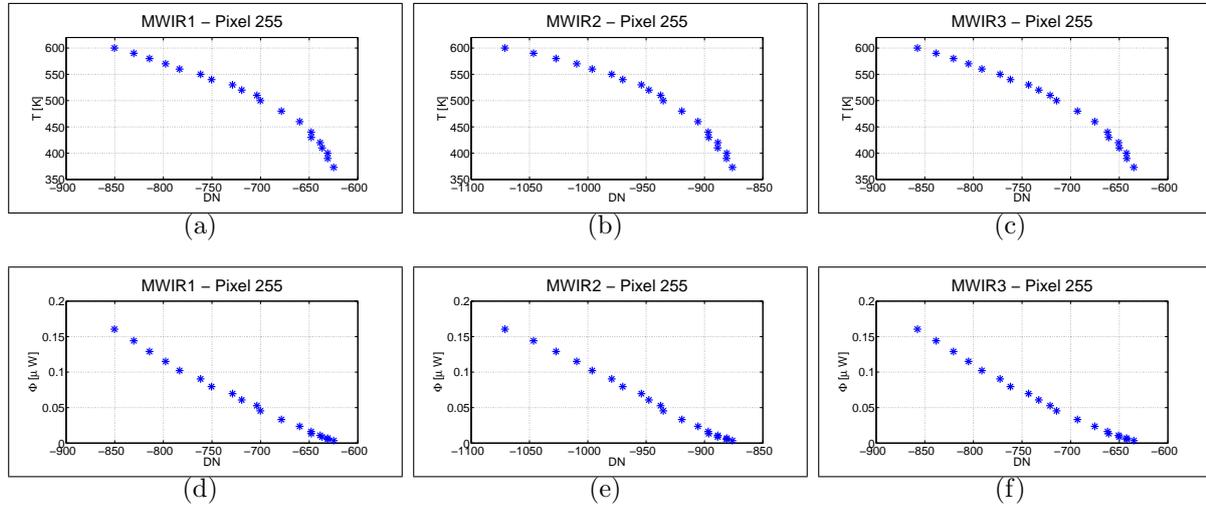


Figura 4.1: Temperatura vs. cuentas (paneles superiores) y potencia vs. cuentas (paneles inferiores) del píxel 255 de la cámara MWIR. Izquierda: Arreglo MWIR1. Centro: Arreglo MWIR2. Derecha: Arreglo MWIR3. Las temperaturas son medidas en Kelvin ([K]) y la potencia en μW .

En la Figura 4.3 se observan las siguientes características:

1. Existen píxeles atípicos cuyos valores de Δ_{DN^i} son significativamente diferentes a los del resto de los microbolómetros en un mismo arreglo.
2. Existen diferencias en la uniformidad del rango dinámico entre píxeles de un mismo arreglo, siendo $\Delta_{DN^{pares}} < \Delta_{DN^{impares}}$ excepto en los casos de los píxeles atípicos.
3. Existen diferencias en la uniformidad del rango dinámico entre píxeles de igual paridad dentro de un mismo arreglo.

A continuación se discuten estas observaciones.

Píxeles atípicos: Los píxeles atípicos pueden clasificarse según:

- Píxeles *no-standard*: Se trata de píxeles con $\Delta_{DN} > 0$ y mucho mayor o mucho menor que en el del resto de los microbolómetros de un mismo arreglo.
- Píxeles *anómalos*: Se trata de píxeles con $\Delta_{DN} < 0$.

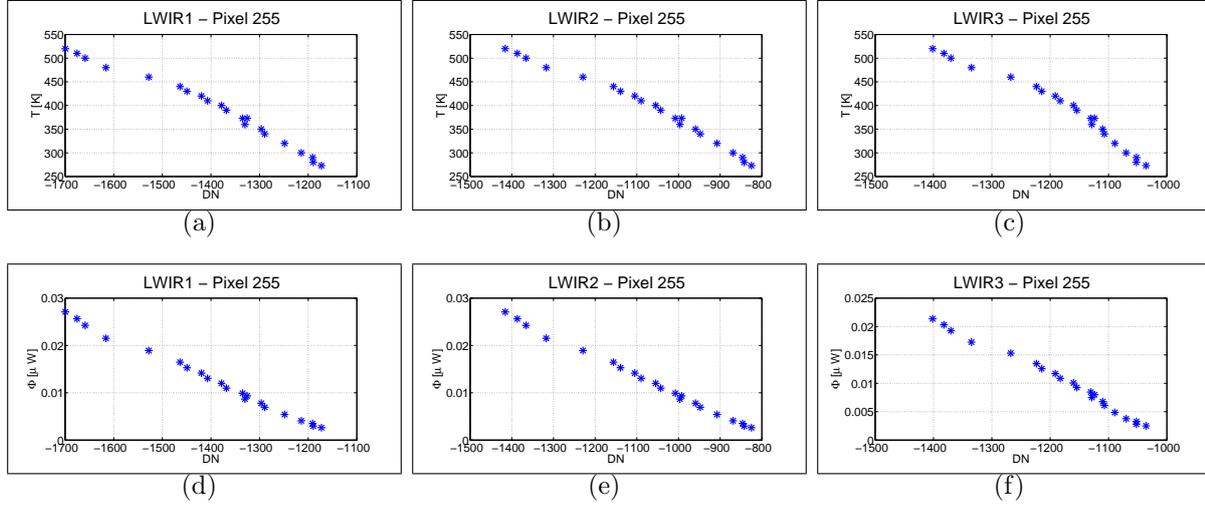


Figura 4.2: Temperatura vs. cuentas (paneles superiores) y potencia vs. cuentas (paneles inferiores) del píxel 255 de la cámara LWIR. Izquierda: Arreglo LWIR1. Centro: Arreglo LWIR2. Derecha: Arreglo LWIR3. Las temperaturas son medidas en Kelvin ([K]) y la potencia en μ W.

- Píxeles muertos: Se trata de píxeles con $\Delta_{DN} = 0$.

En este contexto, se identificaron los píxeles atípicos en cada uno de los arreglos. Los mismos se distinguen gráficamente en la Figura 4.3 y se listan en la Tabla 4.1. Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran la respuesta en temperatura de los píxeles atípicos de los arreglos de las cámaras MWIR y LWIR. Puede observarse que los píxeles *muertos* no presentan variación alguna en el número de cuentas ante distintos valores de temperatura de cuerpo negro, valiendo permanentemente $DN = -1$. Los píxeles *anómalos*, por su parte, presentan curvas de T vs. DN monótonamente crecientes, siendo éste un comportamiento contrario al esperado (i.e., el comportamiento que se muestra en las Figuras 4.1a-c y 4.2a-c). En cuanto a los píxeles *no-standard*, los mismos presentan una tendencia monótonamente decreciente, acorde a lo esperado, pero las curvas muestran comportamientos irregulares con respecto a los píxeles standard cuyo aspecto típico se observa en las Figuras 4.1a-c y 4.2a-c.

Puede observarse que los arreglos MWIR1 y MWIR2 poseen tan sólo un microbolómetro *no-standard* (Figura 4.4a y 4.4b) y ninguno *anómalo* o *muerto*. El arreglo MWIR3 posee 2 píxeles *no-standard* (Figura 4.4d y 4.4e), uno *anómalo* (Figura 4.4c) y ninguno *muerto*. En el caso de la cámara LWIR el comportamiento es diferente. En efecto, el arreglo LWIR2 tiene

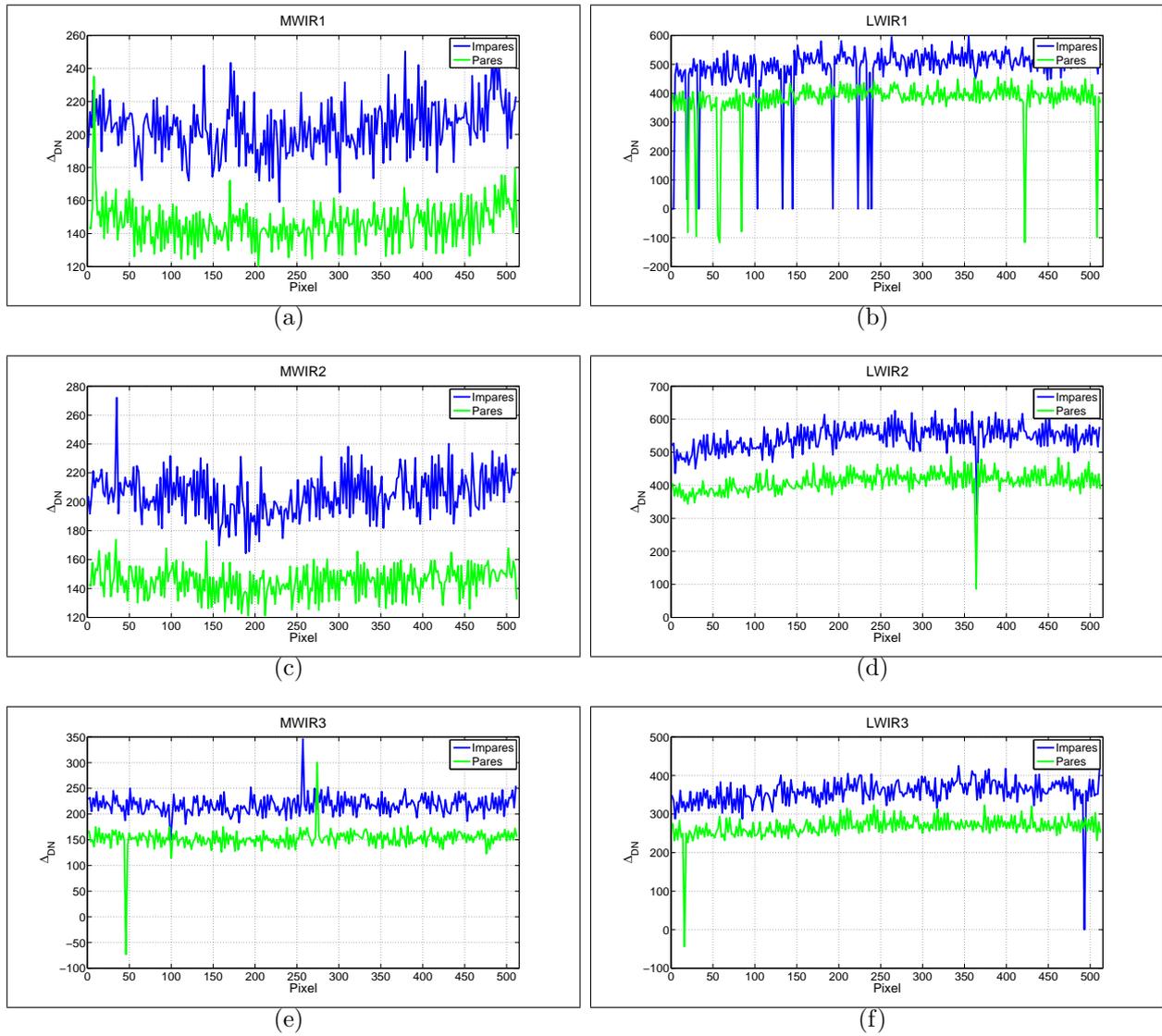


Figura 4.3: Rango dinámico en cuentas (DN) para las cámaras MWIR (paneles izquierdos) y LWIR (paneles derechos). Se observa el rango dinámico de los píxeles pares (verde) e impares (azul) de los arreglos MWIR1 (a), MWIR2 (c), MWIR3 (e), LWIR1 (b), LWIR2 (d) y LWIR3 (f).

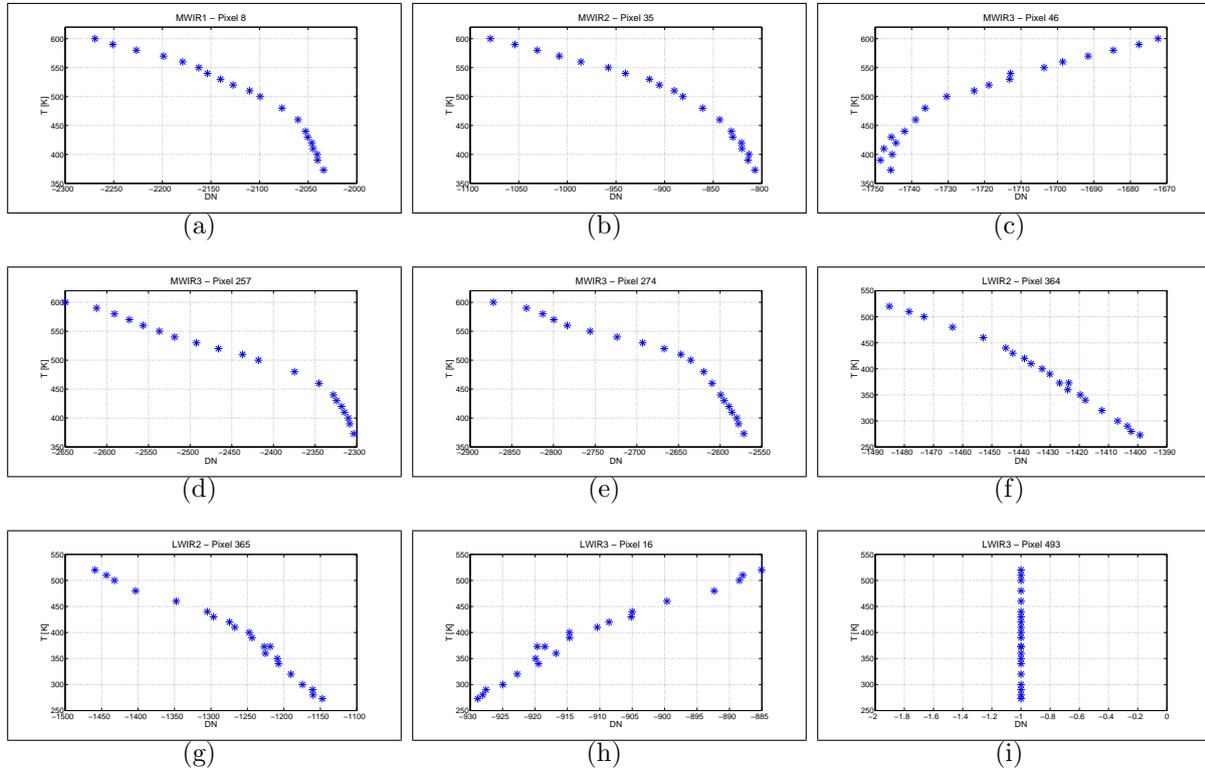


Figura 4.4: Temperatura vs. cuentas de los píxeles atípicos de las cámaras MWIR y LWIR. Se observan los píxeles *no-standard* de los arreglos MWIR1 (a), MWIR2 (b), MWIR3 (d, e) y LWIR2 (f, g). Se presentan los píxeles *anómalos* de los arreglos MWIR3 (c) y LWIR 3 (h). Se muestra el píxel *muerto* del arreglo LWIR3 (i).

dos microbolómetros *no-standard* (Figura 4.4f y 4.4g) y ninguno *anómalo* o *muerto* mientras que el arreglo LWIR3 incluye un píxel *anómalo* (Figura 4.4h), uno *muerto* (Figura 4.4i) y ninguno *no-standard*. El arreglo LWIR1 por su parte tiene un píxel *no-standard* (Figura 4.5h), siete *anómalos* (Figuras 4.5a-g) y diez *muertos* (Figura 4.5i y 4.6a-i). Cabe señalar que, mientras que los píxeles *no-standard* pueden ser pares o impares independientemente del arreglo considerado, en todos los casos, los píxeles *anómalos* son pares, mientras que los *muertos* son impares, pudiendo esto último atribuirse entonces al proceso fabricación, y no a una falla ocurrida durante el transporte de los *Radiometric Packages* desde Canadá hasta Argentina.

Los microbolómetros atípicos han sido excluidos de todo cómputo realizado de aquí en adelante tanto para las calibraciones absoluta y relativa, así como también en lo que a la

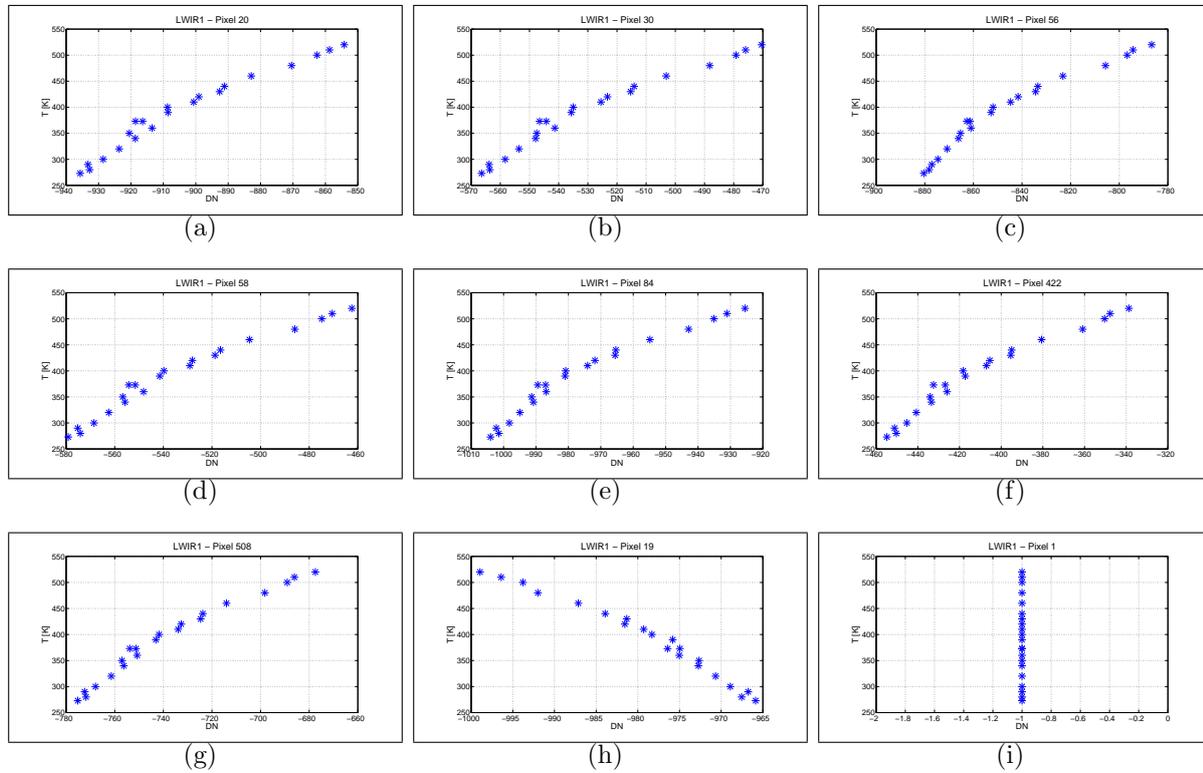


Figura 4.5: Temperatura vs. cuentas de los píxeles atípicos del arreglo LWIR1. Se observan los píxeles *anómalos* (a - g), el píxel *no-standard* (h) y unos de los píxeles *muertos* (i).

RVS del espejo se refiere.

Uniformidad del rango dinámico: Un mayor rango dinámico en cuentas está asociado a una mayor sensibilidad, por lo tanto, puede deducirse que los píxeles impares son más sensibles que los pares. A su vez, también es notable que píxeles de una misma paridad no sean uniformes entre sí. Considerando estas diferencias en uniformidad observadas tanto entre píxeles de distinta paridad como entre píxeles de una misma paridad se planteó la conveniencia de cuantificar ambas situaciones. Se definieron dos parámetros de interés: la dispersión relativa δ entre píxeles de igual paridad y el *bias* entre píxeles pares e impares.

Para el cálculo de la dispersión relativa δ se utilizó la expresión:

$$\delta|_{par,impar} = \frac{\max(\Delta_{DN}) - \min(\Delta_{DN})}{\overline{\Delta_{DN}}}|_{par,impar} \quad (4.2)$$

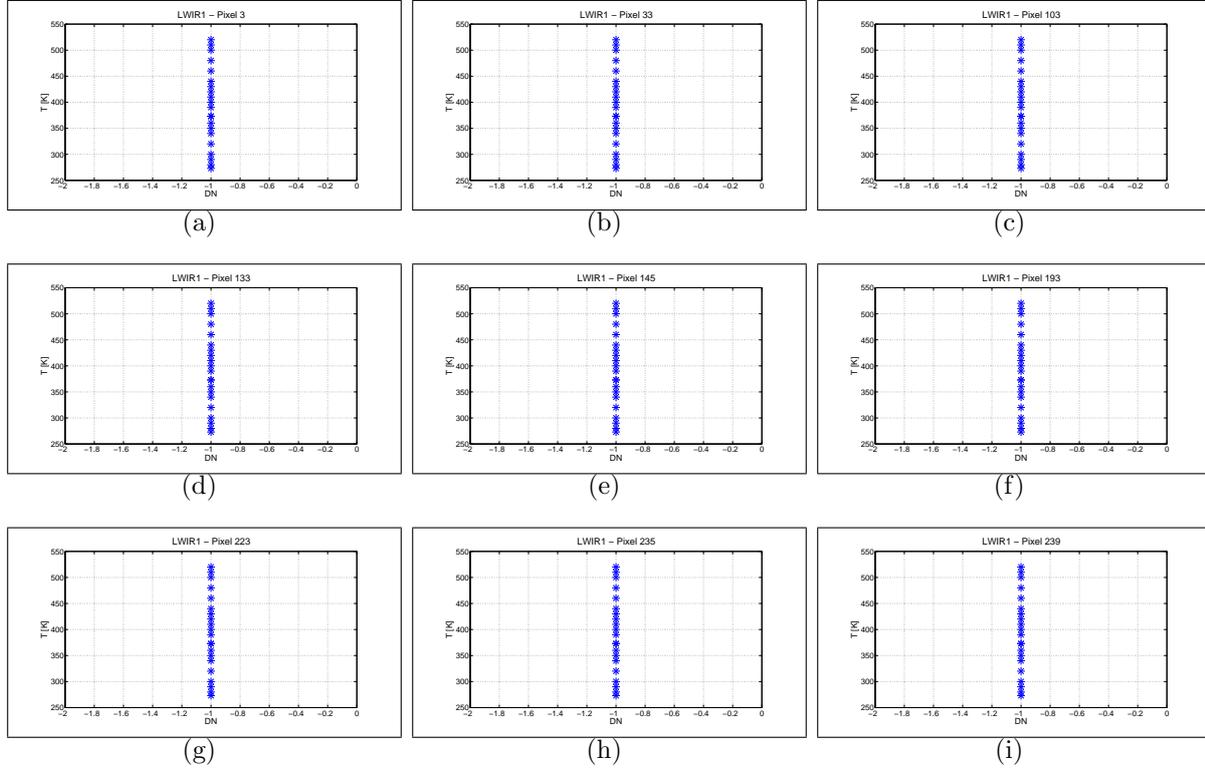


Figura 4.6: Temperatura vs. cuentas de los píxeles atípicos del arreglo LWIR1. Se observa el resto de los píxeles *muertos* (a - i) de dicho arreglo.

donde, en cada arreglo, Δ_{DN} se obtiene a partir de la ecuación 4.1 siendo $max(\Delta_{DN})$ y $min(\Delta_{DN})$ los valores máximo y mínimo de Δ_{DN} respectivamente y $\overline{\Delta_{DN}}$ el valor promedio en píxeles de una paridad dada. De este modo, δ provee información sobre la uniformidad en la sensibilidad en microbolómetros de igual paridad.

Para el cálculo del *bias* se utilizó la expresión:

$$bias|_{par,impar} = \frac{\overline{\Delta_{DN}^{impar}} - \overline{\Delta_{DN}^{par}}}{\overline{\Delta_{DN}}|_{par,impar}} \quad (4.3)$$

El cálculo del *bias* utilizando valores promedio $\overline{\Delta_{DN}}$ equivale a asumir que todos los píxeles de igual paridad poseen la misma sensibilidad, lo cual no es cierto. Sin embargo, este modo de estimar el *bias* permite comparar la uniformidad en la sensibilidad entre píxeles de distinta paridad.

Los parámetros δ y *bias* pueden utilizarse como estimadores de uniformidad en la sen-

Arreglo	Píxeles No-Standard	Píxeles Anómalos	Píxeles muertos
MWIR1	8	-	-
MWIR2	35	-	-
MWIR3	257, 374	46	-
LWIR1	19	20, 30, 56, 58 84, 422, 508	1, 3, 33, 103, 133, 145, 193, 223, 235, 239
LWIR2	364, 365	-	-
LWIR3	-	16	493

Tabla 4.1: Píxeles atípicos de las cámaras MWIR y LWIR. Se observan los píxeles no-standard (columna 2), los píxeles *anómalos* (columna 3) y los píxeles *muertos* (columna 4) de cada uno de los arreglos.

sibilidad: intuitivamente, cuanto menores sean los valores de estos estimadores, mayor es la uniformidad en la sensibilidad de cada arreglo. Los requerimientos de NIRST vinculados con la sensibilidad del instrumento están relacionados con la definición del *NETD* de las cámaras MWIR y LWIR a una temperatura de escena típica en cada cámara (ver Sección 3.1). Este enfoque es representativo cuando los microbolómetros son uniformes en sensibilidad, pero éste no es el caso de NIRST.

La utilización de δ y *bias* como estimadores de uniformidad en la sensibilidad puede resultar ventajosa en la etapa de diseño del instrumento: en función de la sensibilidad requerida a cada cámara, pueden especificarse umbrales de δ y *bias* por debajo de los cuales se garantice el nivel de uniformidad necesario para satisfacer el requerimiento de sensibilidad de los arreglos.

4.2. Definición del grado del polinomio de calibración absoluta

Una vez caracterizado el rango dinámico de los microbolómetros, se procedió a realizar la calibración absoluta de los mismos empleando los conjuntos de temperaturas listados en la Tabla 3.4 en el caso de apuntamiento nadiral, $\beta = 45^\circ$.

Tal como se mencionó en el Capítulo 2, en diversas misiones espaciales se emplea una función lineal (Ref. [25]) o cuadrática (Refs. [26], [27]) para ajustar la respuesta del instru-

mento que convierte cuentas digitales en radiancia espectral. En el caso de realizar un ajuste mediante un polinomio de grado 2, la no linealidad del instrumento se indica examinando ya sea el coeficiente cuadrático o bien el porcentaje de no linealidad de la pendiente. Si el sensor es lineal, la salida digital es proporcional a la radiancia, pero con el objetivo de tomar en cuenta cualquier posible no linealidad, un modelo cuadrático puede ser adoptado (Ref. [21]).

En el caso de NIRST se examinó el grado más conveniente para el polinomio de calibración radiométrica absoluta en base al estudio de los residuos, realizando los ajustes descritos por las Ecuaciones 2.3 y 2.4 para polinomios de grados 1 a 10. Se estudiaron los residuos en temperatura y potencia de todos los arreglos, de acuerdo a la Ecuación 2.9 excluyendo de todo cómputo los píxeles identificados como atípicos en la Sección 4.1 y realizando el análisis distinguiendo entre píxeles pares e impares. La Figura 4.7 presenta la desviación standard de los residuos en temperatura ($\|r\|_T$) y potencia ($\|r\|_P$) de los ajustes polinomiales de cada arreglo de microbolómetros, promediada sobre todos los píxeles (en rojo), sobre los píxeles pares (en verde) y sobre los píxeles impares (en azul) en función del grado \mathcal{O} del polinomio.

El análisis de la Figura 4.7 pone de manifiesto una elevada no linealidad de los arreglos de microbolómetros en ambas cámaras. Por un lado, como era de prever (ver Figuras 4.1 y 4.2), en todos los casos los residuos correspondientes a ajustes lineales en temperatura son considerablemente más elevados que empleando ajustes de grados superiores. Sin embargo, las desviaciones standard de los ajustes cuadráticos en temperatura también resultan elevadas: más de 7.5K en todos los arreglos. Por otro lado, si bien los comportamientos son diferentes en las distintas las bandas, las desviaciones standard de los residuos en potencia presentan valores comparables en los ajustes lineales y cuadráticos. Tener residuos pequeños en temperatura y potencia es particularmente importante en el caso de la cámara LWIR, que combinando la información de las bandas de $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$ provee mediciones de temperatura superficial de mar. El estudio de los residuos en temperatura y potencia también confirma la diferencia intrínseca existente en el comportamiento de los píxeles pares e impares, presentando los últimos residuos más pequeños que los primeros en todos los casos.

Una característica notable que contribuye a la caracterización de los arreglos de microbolómetros vista en la Sección 4.1 es que los residuos de tres bandas presentan comportamientos bien diferenciados: i.e., los residuos vs. grado del polinomio de las tres líneas de la cámara MWIR exhiben dependencias similares; lo mismo sucede en el caso de los arreglos LWIR1 y LWIR2 pertenecientes a la misma banda; a su vez estas bandas muestran distintos comportamientos entre sí y con respecto a la tercera banda, LWIR3. En efecto, en los arreglos

4.2. DEFINICIÓN DEL GRADO DEL POLINOMIO DE CALIBRACIÓN ABSOLUTA⁵³

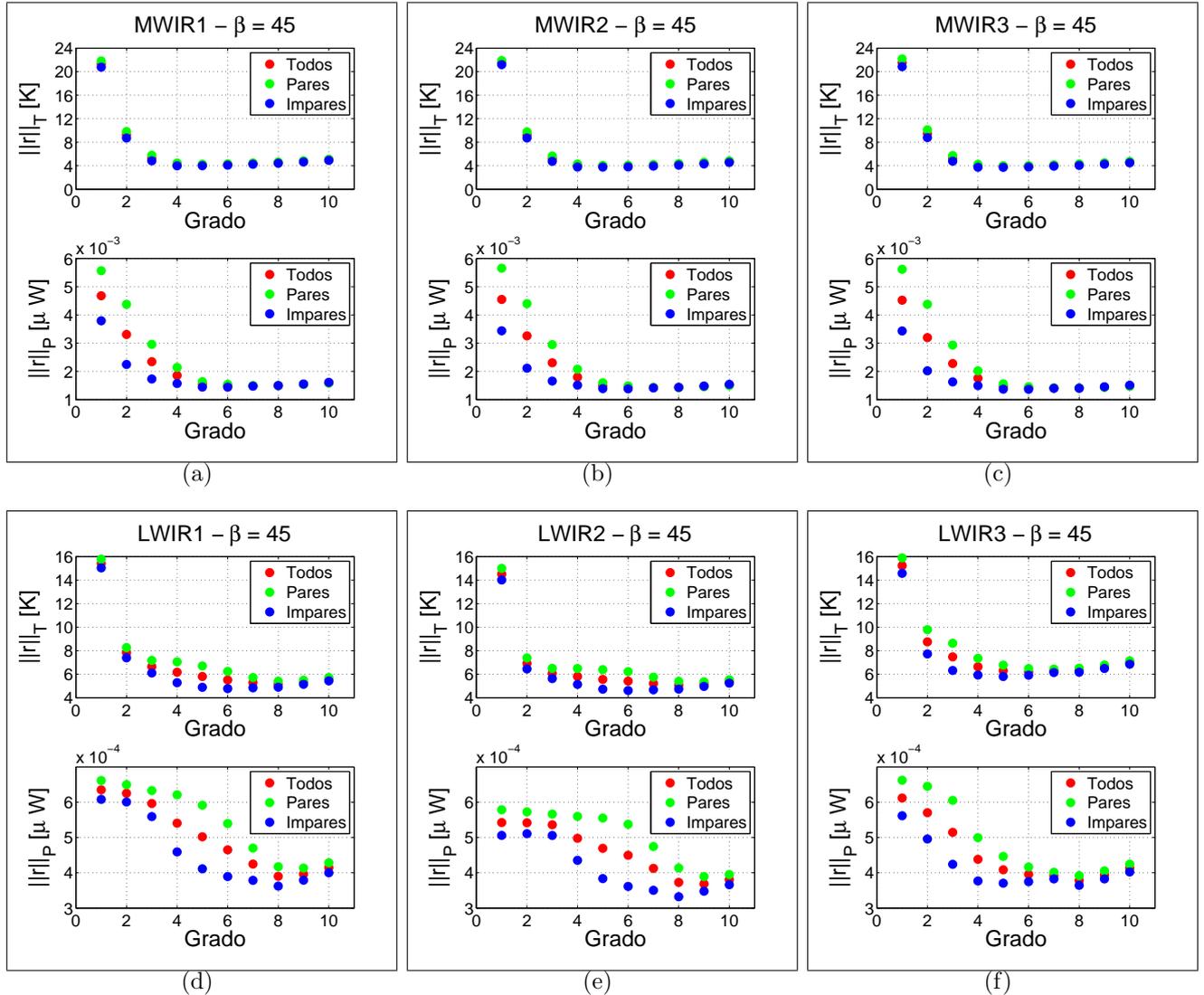


Figura 4.7: Desviación standard de los residuos en temperatura (paneles superiores) y potencia (paneles inferiores) promediada sobre todos los píxeles (rojo), sobre los píxeles pares (verde) y sobre los píxeles impares (azul) en función del grado del polinomio utilizado para la calibración absoluta de MWIR1 (a), MWIR2(b), MWIR3(c), LWIR1 (d), LWIR2 (e) y LWIR3 (f), para un ángulo de apuntamiento del espejo de 45° . Las temperaturas son medidas en Kelvin ([K]) y la potencia en μ W.

LWIR1 y LWIR2 los residuos obtenidos a partir de los píxeles pares se separan de aquellos obtenidos a partir de los impares cuando se supera el polinomio de grado 4 y luego se acercan para para polinomios de grado 7. En cambio, los residuos del arreglo LWIR3 obtenidos a partir de píxeles pares e impares se acercan conforme el grado del polinomio aumenta. En los arreglos de la cámara MWIR ocurre algo similar, pero sin embargo las diferencias entre píxeles pares e impares son considerablemente menores.

Con el fin de seleccionar el grado \mathcal{O} más conveniente para los ajustes en temperatura y potencia, se estableció el siguiente criterio de selección en cada arreglo de microbolómetros:

1. Los residuos de los píxeles pares e impares deben encontrarse tan cerca como sea posible de forma tal que microbolómetros de distinta paridad exhiban un comportamiento similar.
2. Se debe seleccionar el mismo grado para los ajustes de temperatura y potencia. El motivo de tal decisión es que estas magnitudes presentan comportamientos similares para grados altos de polinomio presentándose la diferencia principal entre ambas en el término cuadrático.
3. Se debe seleccionar el grado que minimice los residuos.
4. Se debe seleccionar el menor grado posible y tal que el ajuste tenga sentido en relación a la cantidad de muestras existentes. Polinomios de grado demasiado alto pueden ajustar mejor los datos obtenidos en laboratorio pero resultan menos flexibles al querer utilizarlos con nuevos datos intermedios obtenidos en vuelo. En el caso de la NIRST se utilizaron a lo sumo polinomios de calibración relativa de grado $\mathcal{O} \leq 8$.

Nótese que, tanto en temperatura como en potencia, los residuos de la banda de $3.8 \mu\text{m}$ se estabilizan a partir de $\mathcal{O}(4)$, mientras que en el caso de la banda de $10.85 \mu\text{m}$ la estabilización ocurre a partir de $\mathcal{O}(8)$ y en el caso de la banda de $11.85 \mu\text{m}$ a partir de $\mathcal{O}(6)$. De acuerdo al criterio de selección enunciado arriba, las opciones posibles para los distintos arreglos son:

- Para MWIR1, MWIR2 y MWIR3: $\min(\|r\|_{T,P})$ cuando $\mathcal{O} = 4$ a 6 .
- Para LWIR1 y LWIR2: $\min(\|r\|_{T,P})$ cuando $\mathcal{O} = 6$ a 8 .
- Para LWIR3: $\min(\|r\|_{T,P})$ cuando $\mathcal{O} = 6$.

El grado del polinomio debe establecerse como una solución de compromiso entre los cuatro criterios previamente enunciados, especialmente en el caso de los arreglos LWIR1 y LWIR2 donde los resultados para el 8^{vo} grado aparentan ser mejores que el 6^{to} grado, particularmente porque los residuos de los píxeles pares e impares se encuentran más cerca para polinomios de grado 8. En el caso de la cámara MWIR, aunque el 6^{to} grado presenta residuos menores en temperatura y potencia, no vale la pena seleccionar un grado tan elevado considerando que para $\mathcal{O} = 6$ se encuentran residuos en potencia apenas $0.0005 \mu W$ más pequeños que en el caso de $\mathcal{O} = 4$ y en temperatura no hay diferencia apreciable entre ambos.

De acuerdo al criterio de selección, se concluyó que los grados adecuados para realizar los ajustes polinomiales de Temperatura vs. Cuentas y Potencia vs. Cuentas son $\mathcal{O} = 4$ **en el caso de la banda de $3.8 \mu m$** , $\mathcal{O} = 8$ **en el caso de la banda de $10.85 \mu m$** y $\mathcal{O} = 6$ **en el caso de $11.85 \mu m$** (ver Ref.[19]).

Contemplando el alto grado de no linealidad se investigó si este comportamiento podría deberse al hecho de no haber variado monótonamente T_{bb} durante el proceso de adquisición de datos. Por tal motivo, se realizó el mismo análisis con el conjunto reducido de temperaturas T_{bb} mencionado en la Sección 3.5 obteniéndose los mismos resultados. Se descartó entonces que la falta de linealidad se deba al orden en el cual se adquirieron los datos (Ref. [19]).

4.3. Función de transferencia

Se estimó finalmente la función de transferencia de la señal, SiTF, (*Signal Transfer Function*). El SiTF puede pensarse como la variación de la cantidad de cuentas DN cuando la temperatura cambia en 1K. No es la sensibilidad en el sentido de la capacidad de distinguir pequeños cambios de temperatura, pero es uno de los aspectos que permiten determinar la sensibilidad conjuntamente con el NETD y el error de cuantización. El fabricante de los *Radiometric Packages* estimó el SiTF de cada píxel tomando la derivada de la aproximación cuadrática:

$$DN_i = d_0 + d_1 * T_{bb} + d_2 * T_{bb}^2 \quad (4.4)$$

y calculando luego la media del SiTF en cada arreglo (Ref. [8]).

En el presente trabajo se utilizó un enfoque similar al del fabricante, pero, por lo explicado en la Sección 4.1, se distinguió entre píxeles pares e impares. Además, en lugar estimar el SiTF partiendo de una ecuación cuadrática, se trabajó con la derivada de la Ecuación 2.3

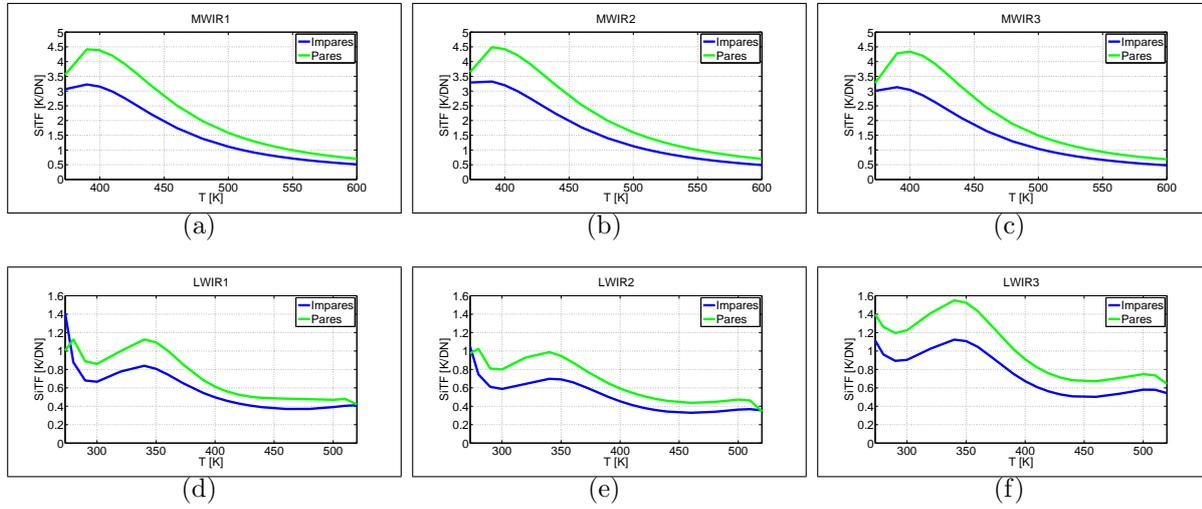


Figura 4.8: Función de transferencia (SiTF) en K/DN promediada sobre píxeles pares (verde) e impares (azul) en función de la temperatura de cuerpo negro utilizada en laboratorio. El SiTF mostrado corresponde a los polinomios de calibración absoluta $\mathcal{O} = 4$, $\mathcal{O} = 8$ y $\mathcal{O} = 6$ para las bandas de $3.8 \mu\text{m}$, $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$ respectivamente.

empleando los grados de polinomios anteriormente definidos para la calibración absoluta. Se optó por trabajar con el concepto de SiTF como la cantidad de grados que representa una variación de 1 DN por ser esto un indicador de la calidad de la equalización: cuanto menor es el valor del SiTF mejor es la equalización (ver Capítulo 5).

La Figura 4.8 muestra el SiTF en K/DN promediado sobre píxeles pares (verde) e impares (azul) en función de la temperatura de cuerpo negro utilizada en laboratorio. El SiTF mostrado corresponde a los polinomios de calibración absoluta $\mathcal{O} = 4$, $\mathcal{O} = 8$ y $\mathcal{O} = 6$ para las bandas de $3.8 \mu\text{m}$, $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$ respectivamente.

Banda de $3.8 \mu\text{m}$: Puede observarse que los tres arreglos de la cámara MWIR exhiben tendencias similares, obteniéndose el peor caso en un entorno de los 400 K (i.e., la temperatura de escena típica de esta cámara) y el mejor caso a temperaturas cercanas a los 600 K (límite superior de detección de la cámara MWIR). El valor de SiTF a 400K es de 3.3 K/DN en píxeles impares y 4.5 K/DN en píxeles pares.

Banda de $10.85 \mu\text{m}$: En la banda de $10.85 \mu\text{m}$, el arreglo LWIR1 presenta un SiTF más elevado que el arreglo LWIR2, a pesar de que las tendencias de las curvas son semejantes. Los peores casos ocurren a 273 K y a 340 K tal como puede apreciarse en las Figuras 4.8d y 4.8e,

mientras que el mejor caso ocurre a temperaturas más elevadas, cercanas al límite superior de detección de la cámara LWIR. El valor de SiTF a 300K (la temperatura de escena típica de la cámara LWIR) es 0.7 K/DN en píxeles impares y 0.9 K/DN en píxeles pares en arreglo LWIR1 y 0.6 K/DN en píxeles impares y 0.8 K/DN en píxeles pares en el arreglo LWIR2.

Banda de 11.85 μm : La banda de 11.85 μm presenta el peor caso en 340 K y el mejor caso en temperaturas cercanas al límite superior de operación de la cámara LWIR. El valor de SiTF a 300K (la temperatura de escena típica de la cámara LWIR) es 0.9 K/DN en píxeles impares y 1.2 K/DN en píxeles pares.

4.4. Estudios complementarios

Los grados de los polinomios de calibración absoluta obtenidos resultaron más elevados de lo que fue necesario en otros instrumentos infrarrojos a bordo de otras misiones espaciales (Refs. [21], [25], [26], [27] y [28]). La no linealidad de los microbolómetros puede deberse a una característica intrínseca de los mismos, o bien a la existencia de otros parámetros físicos que no hayan sido debidamente capturados por las "Funciones de Calibración Radiométrica Absoluta" de temperatura y potencia. Las principales contribuciones de potencia incidente sobre cada microbolómetro provienen de la temperatura emitida por el cuerpo negro, T_{BB} , y de la temperatura del *Radiometric Package*, T_{RP} , cuyo propósito, como se menciona en la Sección 1.2.2, es proveer un entorno térmicamente estable donde las variaciones de temperatura del entorno tengan una influencia reducida en la respuesta del sensor. En la Figura 4.9 se muestra la variación de la temperatura del *Radiometric Package* en relación con la temperatura de cuerpo negro de las cámaras MWIR (izquierda) y LWIR (derecha). En el caso de MWIR existe una correlación significativa entre ambas, mientras que en el caso de LWIR estas variables no parecen estar fuertemente correlacionadas. Se estimó el coeficiente de correlación $R(T_{BB}, T_{RP})$ ¹ en ambas cámaras resultando ser $R(T_{BB}, T_{RP}) = 0.96$ en el caso de MWIR y $R(T_{BB}, T_{RP}) = 0.49$ en el caso de LWIR.

Dada la baja correlación entre T_{BB} y T_{RP} en la cámara LWIR, se exploró la siguiente dependencia funcional en la "Función de calibración radiométrica absoluta":

¹El coeficiente de correlación se calcula utilizando la siguiente expresión: $R(T_{BB}, T_{RP}) = \frac{C(T_{BB}, T_{RP})}{\sqrt{C(T_{BB}, T_{BB})C(T_{RP}, T_{RP})}}$, donde C es la matriz de covarianza.

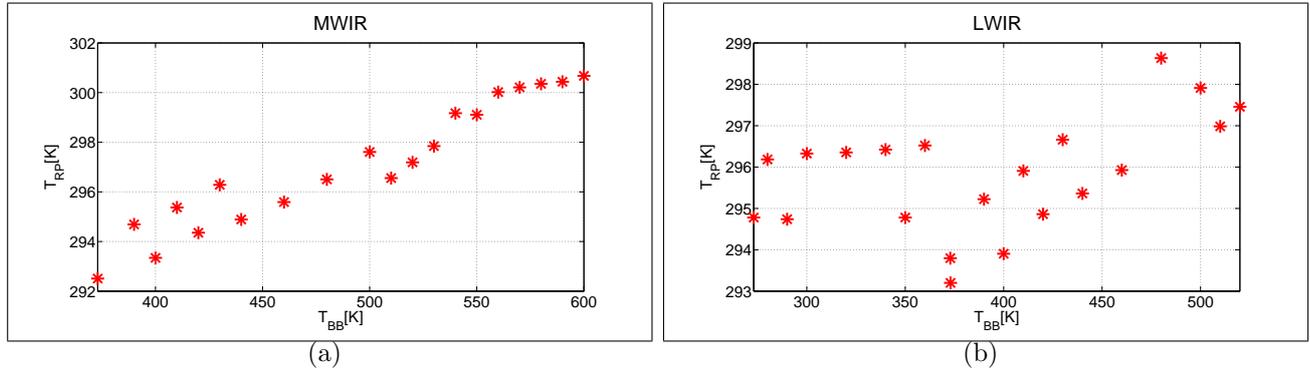


Figura 4.9: Temperatura del *Radiometric Package* en función de la temperatura de cuerpo negro de las cámaras MWIR (izquierda) y LWIR (derecha).

$$T_{bi}(DN, T_{RP}) = \sum_{j=0} a_j * DN_i^j + \alpha_i * T_{RP} \quad (4.5)$$

siendo α_i el coeficiente lineal que expresa la dependencia funcional entre T_{bi} y T_{RP} del píxel i y a_j son los coeficientes de calibración radiométrica absoluta en temperatura. Los resultados obtenidos explorando este camino no mejoraron sustancialmente el problema de la no linealidad encontrándose polinomios de calibración absoluta de grados elevados ($\mathcal{O} = 7$ en el caso de la banda de $10.85 \mu\text{m}$ y $\mathcal{O} = 4$ en la banda de $11.85 \mu\text{m}$).

En el caso de la cámara MWIR, se estima que la fuerte correlación encontrada se debe a la proximidad entre el cuerpo negro y el instrumento, siendo las bandas del infrarrojo medio más sensibles a las altas temperaturas que las bandas del infrarrojo térmico. Al estar ambas temperaturas fuertemente correlacionadas, una dependencia funcional $T_{bi} = f(DN, T_{RP})$ no es adecuada.

De este análisis se desprenden las siguientes reflexiones:

- En el marco de la calibración en laboratorio, no se encontró una magnitud física que permita explicar el comportamiento alineal de los microbolómetros, por lo tanto, la no linealidad sería una propiedad intrínseca de los mismos.
- Con el objetivo de confirmar lo anterior, sería conveniente realizar una caracterización del instrumento en vuelo, donde es posible independizarse de las condiciones ambientales propias de las mediciones a temperatura ambiente.

Capítulo 5

Calibración relativa

La calibración relativa consiste en la ecualización de la respuesta de los microbolómetros de un dado arreglo de forma tal que todos los píxeles presenten la misma respuesta ante un mismo estímulo. Si la respuesta de los microbolómetros difiere de uno a otro en más del NETD se obtiene un producto de ciencia cuya temperatura varía de un píxel a otro generando *stripping*. La calibración relativa de la NIRST se llevó a cabo para un ángulo de apuntamiento $\beta = 45^\circ$, de acuerdo a la Ecuación 2.5, obteniéndose un conjunto de coeficientes de calibración radiométrica relativa para cada píxel de cada arreglo de microbolómetros. Al igual que en el caso de la calibración absoluta, los ajustes polinomiales fueron optimizados mediante la Ecuación 2.7. La elección del píxel de referencia y la determinación del grado del polinomio más adecuado en el proceso de calibración relativa de cada arreglo son objeto de análisis en las Secciones 5.1 y 5.2 respectivamente mientras que en la Sección 5.3 se discuten los resultados de la ecualización.

5.1. Determinación del píxel de referencia

En lo que respecta al píxel de referencia seleccionado, Ganopol et al. (Ref. [19]) proponen que el mismo cumpla las siguientes condiciones:

1. En cada arreglo deben seleccionarse un píxel de referencia par y uno impar. Esta condición surge de la información provista en el Capítulo 4 en cuanto al distinto comportamiento de píxeles pares e impares.
2. El píxel de referencia debe encontrarse en la región central del arreglo en consideración pues en esta zona la ley de $\cos^4 \theta \simeq 1$ maximizando de esta forma la potencia recibida

(Ref. [23]).

3. El píxel de referencia debe poseer un valor de rango dinámico Δ_{DN} cercano a $\overline{\Delta_{DN}}$. Esta condición garantiza que la tendencia del píxel de referencia sea en promedio similar a la del resto de los microbolómetros de cada arreglo.

Se definió la región central de cada arreglo como aquella que está centrada en el píxel 256 y contiene los píxeles 242 a 270. Se definió además el rango dinámico normalizado $|\Delta_{DN}^{normal}|$ del píxel i según la expresión:

$$\Delta_{DN}^{normal}|_{par,impar} = \left| \frac{\Delta_{DN^i} - \overline{\Delta_{DN}}}{\overline{\Delta_{DN}}} \right|_{par,impar} \quad (5.1)$$

donde la evaluación se hace separadamente para píxeles pares e impares dentro de la región central de cada línea. En cada arreglo se buscaron los píxeles pares e impares cuyo $|\Delta_{DN}^{normal}|$ fuera lo más cercano a cero posible con el fin de cumplir con la condición 3 mencionada anteriormente. En base a este análisis, los píxeles pares e impares seleccionados en cada arreglo pueden apreciarse en la Tabla 5.1. La elección realizada contribuye a que la tendencia del píxel de referencia sea en promedio similar a la del resto de los microbolómetros de cada arreglo, a la vez que toma en cuenta las naturalezas diferentes de los detectores pares e impares.

Arreglo	Píxeles de referencia pares		Píxeles de referencia impares	
	Píxel	$ \Delta_{DN}^{normal} _{par}$	Píxel	$ \Delta_{DN}^{normal} _{impar}$
MWIR1	250	0.0080	243	0.0002
MWIR2	254	0.0013	243	0.0016
MWIR3	252	0.0077	259	0.0018
LWIR1	258	0.0095	261	0.0049
LWIR2	264	0.0134	261	0.0069
LWIR3	260	0.0169	247	0.0071

Tabla 5.1: Píxeles de referencia par e impar seleccionados en cada arreglo y valor de $|\Delta_{DN}^{normal}|$ asociado.

5.2. Determinación del grado del polinomio

Considerando la selección de píxeles de referencia presentada en la Tabla 5.1, se llevó a cabo la calibración relativa de los píxeles pares e impares en cada arreglo. Cuando los detectores dentro de un mismo arreglo son uniformes, este tipo de ajuste se realiza mediante funciones lineales o cuadráticas (Refs. [29], [31]). El análisis del rango dinámico de cada línea (Figura 4.3) permite inferir que es esperable obtener un comportamiento no lineal al intentar ecualizar la respuesta dentro de un mismo arreglo. La no linealidad entre los microbolómetros de un dado arreglo puede apreciarse gráficamente cuando se evalúan las cuentas de cada píxel en función de las del píxel de referencia. En las Figuras 5.1 y 5.2 se observan a modo de ejemplo las cuentas de los píxeles 160 y 253 pertenecientes a las distintas líneas tomando como referencia los píxeles correspondientes indicados en la Tabla 5.1. Con el objetivo de determinar el grado del polinomio de calibración relativa en cada uno de los arreglos, se analizaron los residuos de los ajustes de grado 1 a 10 en los siguientes escenarios:

1. *Todos-Par*: Se calibraron todos los píxeles de un arreglo tomando el *Píxel de Referencia Par* (PRP).
2. *Todos-Impar*: Se calibraron todos los píxeles de un arreglo tomando el *Píxel de Referencia Impar* (PRI).
3. *Par-Par*: Se calibraron todos los píxeles pares de un arreglo tomando el *Píxel de Referencia Par* (PRP).
4. *Impar-Impar*: Se calibraron todos los píxeles impares de un arreglo tomando el *Píxel de Referencia Impar* (PRI).

La Figura 5.3 muestra la desviación standard de los residuos $\|r\|_{DN}$ promediada sobre todos los píxeles tomando un PRP (rojo) y un PRI (fucsia), promediada sobre los píxeles pares tomando un PRP (verde) y promediada sobre los píxeles impares tomando un PRI (azul) en función del grado \mathcal{O} del polinomio de calibración relativa de la cámara MWIR (paneles superiores) y LWIR (paneles inferiores), siendo el ángulo de apuntamiento del espejo $\beta = 45^\circ$. A los efectos de definir el grado del polinomio de calibración relativa en cada arreglo, Ganopol et al. (Ref. [19]) establecieron los siguientes criterios:

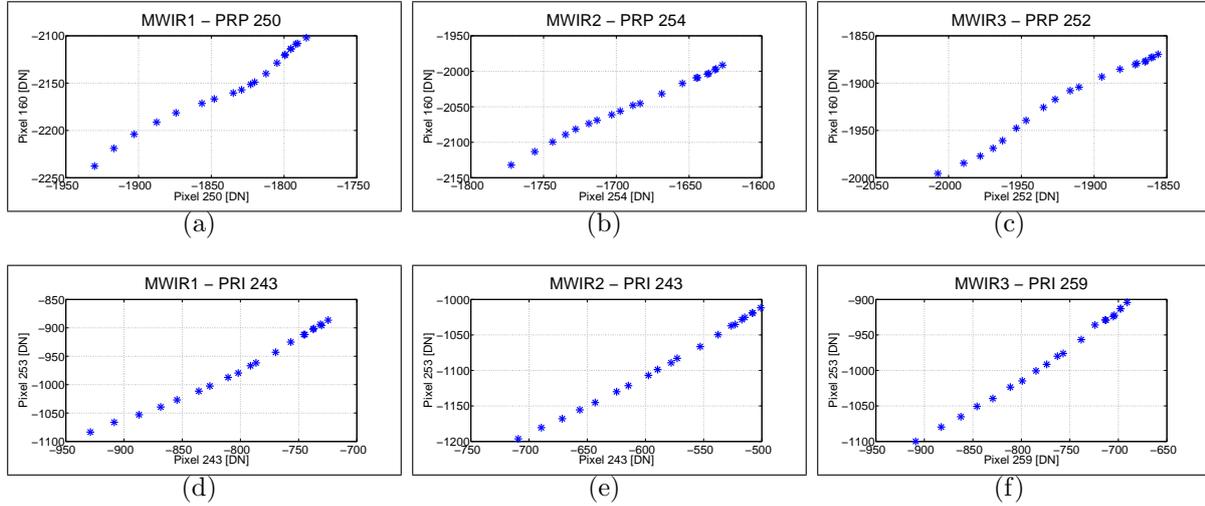


Figura 5.1: Respuesta en DN de los píxeles #160 y #253 de la cámara MWIR, tomando en cada arreglo los píxeles de referencia par (PRP) e impar (PRI) presentados en la Tabla 5.1 y siendo $\beta = 45^\circ$.

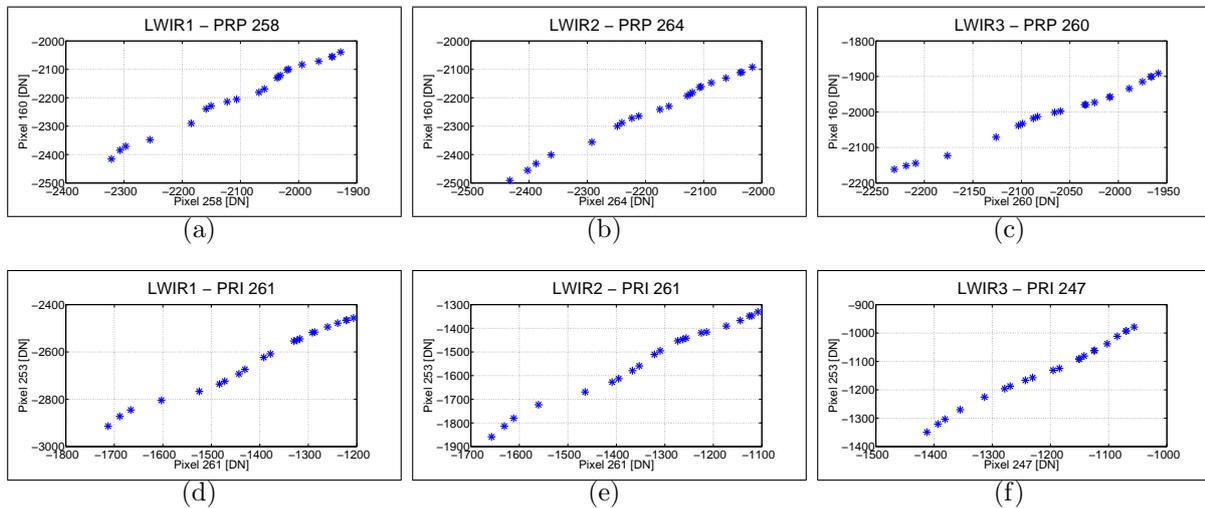


Figura 5.2: Respuesta en DN de los píxeles #160 y #253 de la cámara LWIR, tomando en cada arreglo los píxeles de referencia par (PRP) e impar (PRI) presentados en la Tabla 5.1 y siendo $\beta = 45^\circ$.

1. Los escenarios $\{Todos-Par, Todos-Impar, Par-Par, Impar-Impar\}$ deben presentar residuos tan cercanos entre sí como sea posible con el objetivo de reducir el efecto indeseado de *stripping*.
2. Debe seleccionarse el grado de polinomio que minimice los residuos.
3. Teniendo en cuenta el conocimiento del SiTF (Sección 4.3), cuando sea factible, el grado de polinomio debe cumplir $\|r\|_{DN} \leq 2$.
4. El grado del polinomio seleccionado debe ser lo más pequeño posible y tal que el ajuste tenga sentido en relación a la cantidad de muestras existentes. Polinomios de grado demasiado alto pueden ajustar mejor los datos obtenidos en laboratorio pero resultan menos flexibles al querer utilizarlos con nuevos datos intermedios obtenidos en vuelo. En el caso de la NIRST se utilizaron a lo sumo polinomios de calibración relativa de grado $\mathcal{O} \leq 8$.

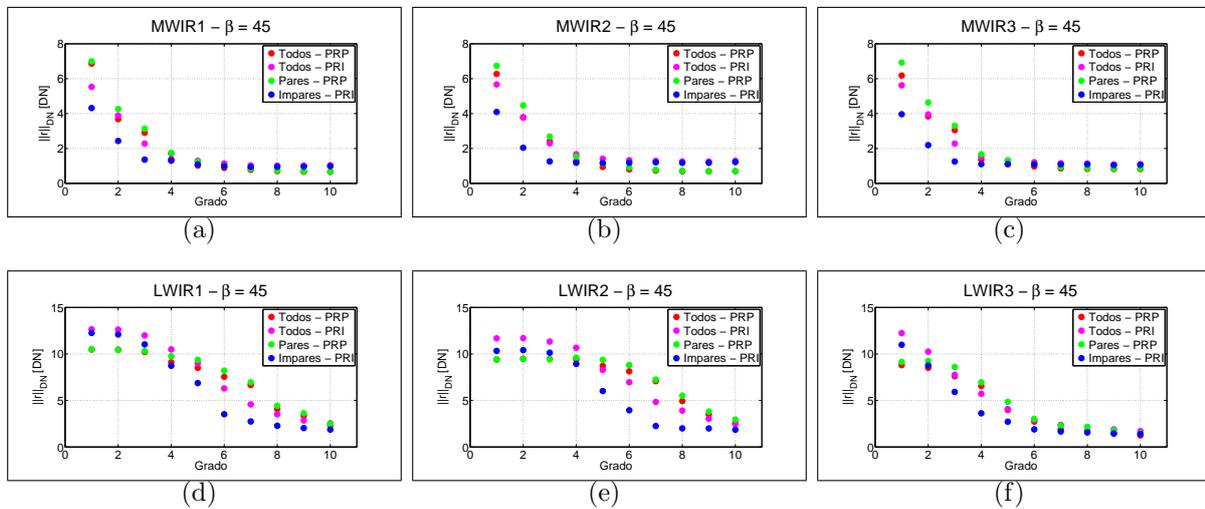


Figura 5.3: Desviación standard $\|r\|_{DN}$ promediada sobre todos los píxeles tomando un PRP (rojo) o un PRI (fucsia), promediada sobre los píxeles pares tomando un PRP (verde) y promediada sobre los píxeles impares tomando un PRI (azul) en función del grado \mathcal{O} del polinomio de calibración relativa de las cámaras MWIR (paneles superiores) y LWIR (paneles inferiores). siendo $\beta = 45^\circ$. En cada arreglo se tomaron los píxeles de referencia indicados en la Tabla 5.1.

Varios aspectos relevantes surgen del análisis de los residuos en la Figura 5.3. Nuevamente es posible apreciar el comportamiento diferente presentado por píxeles pares e impares. presente en cada arreglo. A continuación se discuten los resultados obtenidos teniendo en cuenta el análisis del SiTF realizado en la Sección 4.3.

Banda de 3.8 μm : En el caso de la cámara MWIR (Figura 5.3a-c) puede apreciarse que los escenarios *Impar-Impar* (en azul) y *Par-Par* (en verde) presentan residuos de 1 DN y 3 DN respectivamente cuando $\mathcal{O} \leq 3$. Esto es equivalente a 3.3K@400K en los detectores impares y 13.5K@400K en los pares (ver Sección 4.3), lo cual no es aceptable desde el punto de vista de los requerimientos de ciencia por ser estos valores mayores al NETD en esta banda.

Nótese que los escenarios *Todos-Impar* (en fucsia) y *Todos-Par* (en rojo) presentan residuos cercanos al escenario *Par-Par* debido a la predominancia del comportamiento de los píxeles pares en relación a los impares.

A partir del grado $\mathcal{O} = 4$ los residuos de las distintas configuraciones no presentan diferencias sustanciales siendo $\|r\|_{DN} \sim 1$. Esto equivale a 3.3K@400K en los detectores impares y 4.5K@400K en los pares no lográndose evitar el *stripping*.

Banda de 10.85 μm : Los arreglos LWIR1 y LWIR2, presentan residuos significativamente elevados en los ajustes de grado $\mathcal{O} \leq 4$ (Figura 5.3d,e). En el caso del arreglo LWIR1 se obtienen valores de residuos que se traducen en 6.3K@300K en los píxeles impares y 9K@300K en los pares, mientras que en el caso del arreglo LWIR2 se obtiene 5.4K@300K en los píxeles impares y 8K@300K en los pares.

Los valores de los residuos decrecen a partir de $\mathcal{O} > 4$, sin embargo, las diferencias entre los cuatro escenarios se amplifican, volviendo a converger a partir de $\mathcal{O} = 8$. En este caso, se obtienen residuos de 2.5 DN en el escenario *Impar-Impar* y 5 DN en el *Par-Par*. En el caso del arreglo LWIR1, estos valores se traducen por 1.75K@300K en detectores impares y 4.5K@300K en detectores pares. En el caso del arreglo LWIR2, estos valores se traducen por 1.5K@300K en detectores impares y 4K@300K en detectores pares.

Aunque el arreglo LWIR2 presenta mejores resultados que LWIR1, no se logra mitigar el *stripping* incluso con un grado elevado en el ajuste de calibración relativa.

Banda de 11.85 μm : El arreglo LWIR3 por su parte presenta escenarios cuyos residuos comienzan a converger a partir de $\mathcal{O} \geq 6$ (Figura 4.8f). Cuando $\mathcal{O} = 8$, los residuos en píxeles pares e impares valen 2 DN, traduciéndose esto en 1.8K@300K en píxeles impares y 2.4K@300K en píxeles pares.

En este caso tampoco es posible mitigar el *stripping* incluso con un grado elevado en el ajuste de calibración relativa.

En base al análisis anterior, Ganopol et al. (Ref. [19]) concluyen que los grados de los polinomios de calibración relativa son $\mathcal{O} = 4$ **en la banda de $4.8 \mu\text{m}$** y $\mathcal{O} = 8$ **en las bandas de $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$** . Finalmente, vale la pena mencionar que el hecho de que los arreglos de una misma banda exhiban tendencias semejantes en los residuos indica que se trata de una característica propia de la fabricación de los arreglos e independiente del píxel de referencia que se tome.

Cabe señalar que en el análisis realizado no se ha considerado la dependencia funcional con la temperatura del *Radiometric Package* por los motivos discutidos en la Sección 4.4.

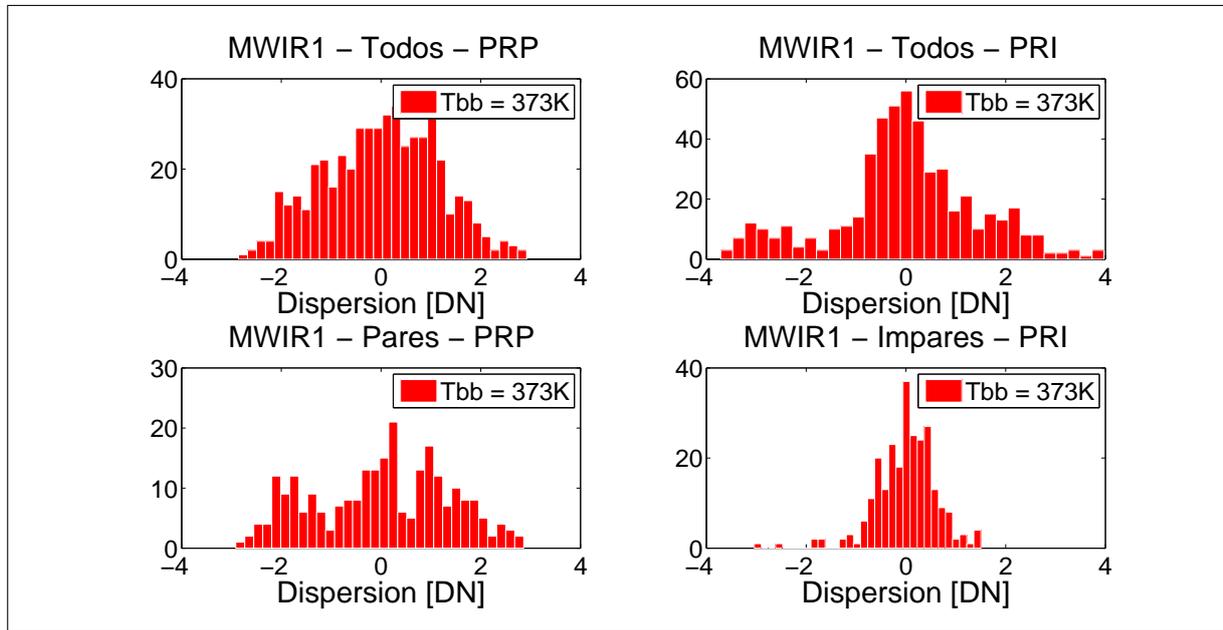
5.3. Análisis de la ecualización

Los histogramas de las Figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 muestran la dispersión en cuentas correspondiente a la respuesta de los microbolómetros luego de la ecualización de los arreglos MWIR1, MWIR2, MWIR3, LWIR1, LWIR2 y LWIR3 empleando los grados de polinomio de calibración relativa anteriormente mencionados, presentando los casos de T_{bb} más baja (paneles superiores) y más alta (paneles inferiores) empleados durante la adquisición de datos en laboratorio (ver Tabla 3.4).

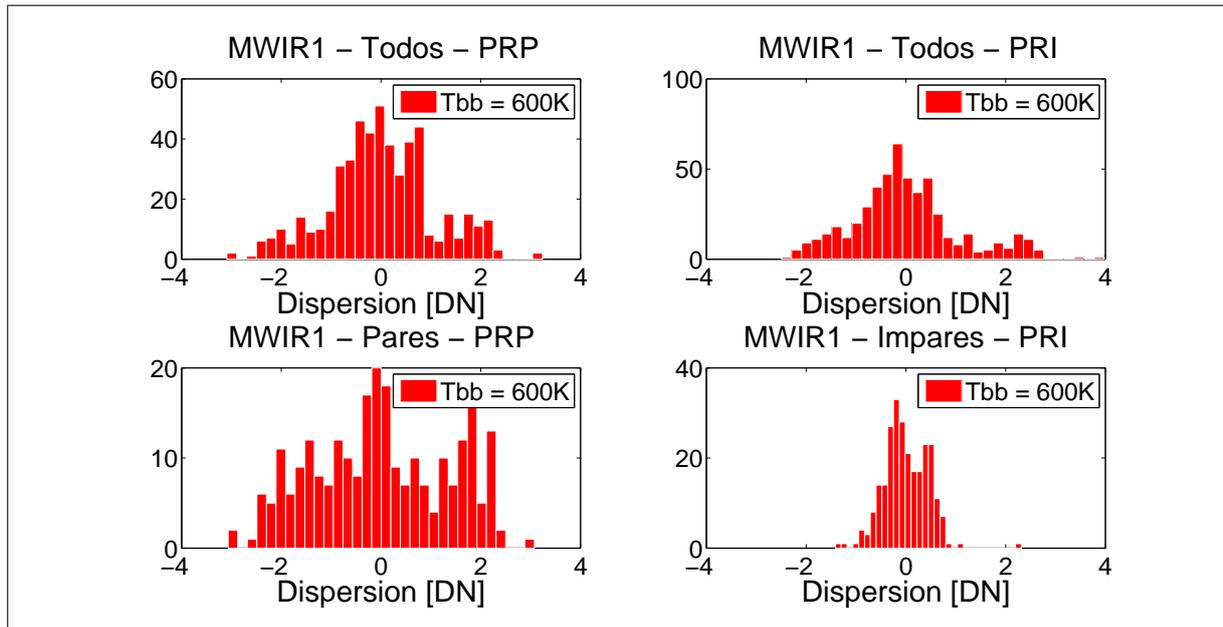
En todas las configuraciones y en los distintos arreglos resulta inmediato observar que el efecto de *stripping* es menor en temperaturas más elevadas. Puede apreciarse además que los mejores casos de ecualización se obtienen en las configuraciones *Impar-Impar* mientras que no existe una diferencia apreciable entre las ecualizaciones de los escenarios *Todos-Par* y *Todos-Impar*. Esto último se atribuye al efecto causado por los píxeles pares cuya ecualización pobre puede observarse en la configuración *Par-Par* de los distintos arreglos. Lo anterior permite deducir que el *stripping* es causado principalmente por las características de los píxeles pares (ver Ref. [19]).

Es interesante observar que, aunque el contraste *Par-Impar* está presente en todos los arreglos, la morfología de las distribuciones de las respuestas de los microbolómetros luego de la ecualización difiere de una banda a otra apreciándose distintas poblaciones. A continuación se brinda un análisis cualitativo sobre estas poblaciones en cada una de las bandas.

Banda de $3.8 \mu\text{m}$: La banda de $3.8 \mu\text{m}$ (Figuras 5.4, 5.5 y 5.6) exhibe tres poblaciones

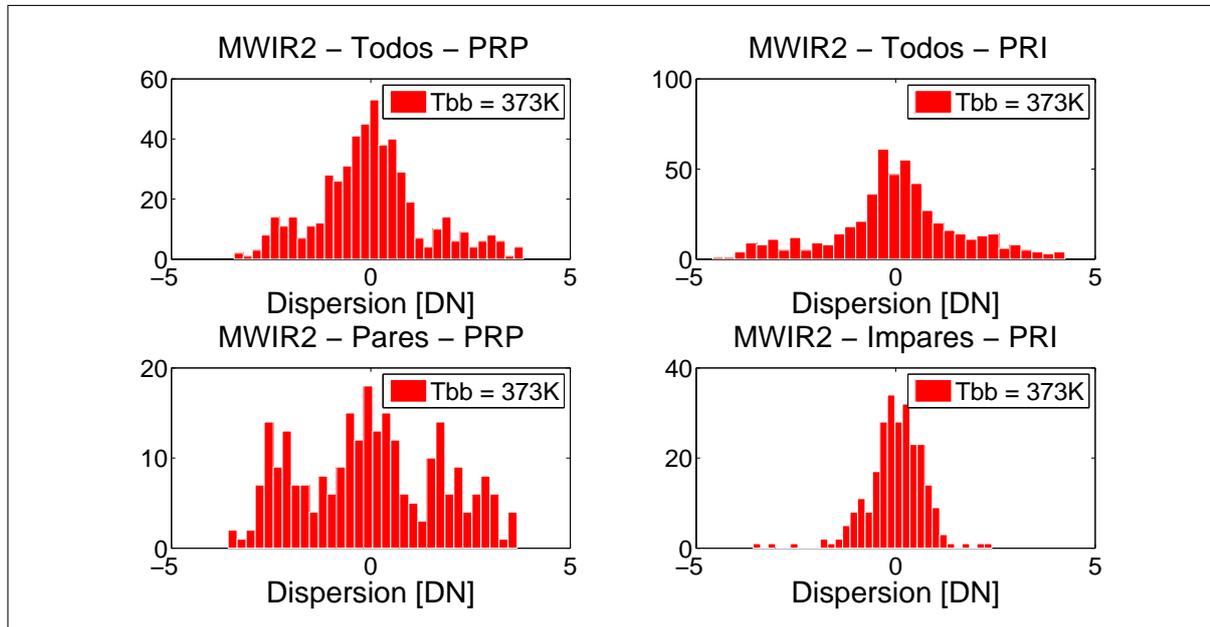


(a)

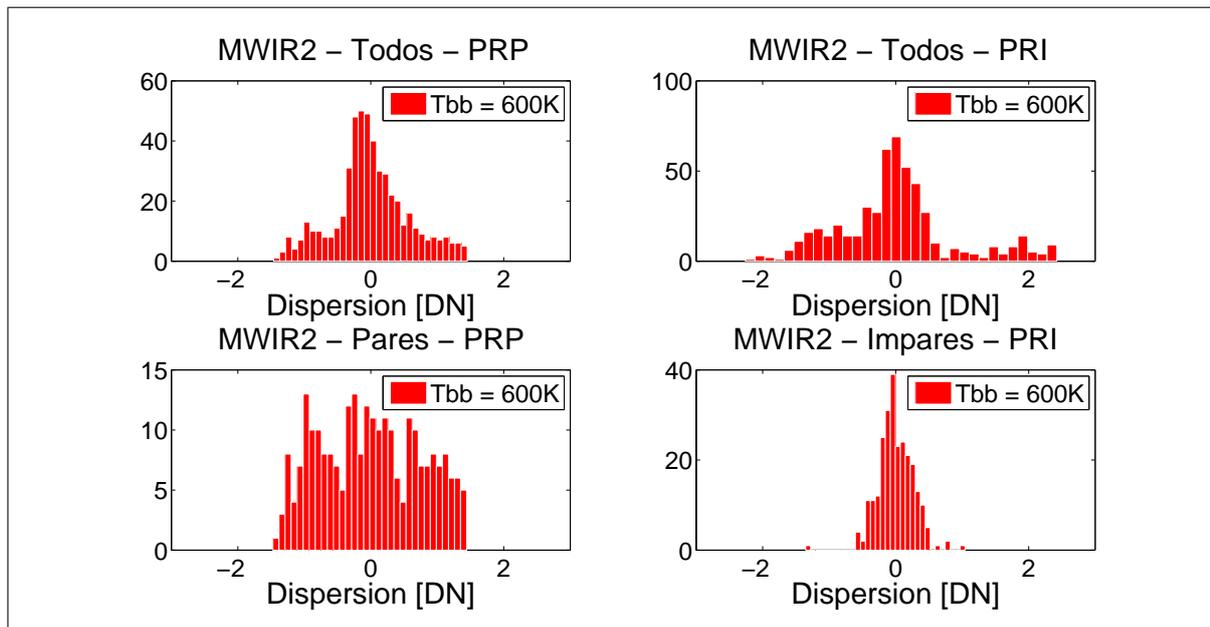


(b)

Figura 5.4: Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo MWIR1 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 4$ para $T = 373K$ (Figura 5.4a) y $T = 600K$ (Figura 5.4b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración *Todos-Par*, los paneles superiores derechos corresponden a la configuración *Todos-Impar*, los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración *Par-Par* y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración *Impar-Impar*. Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.

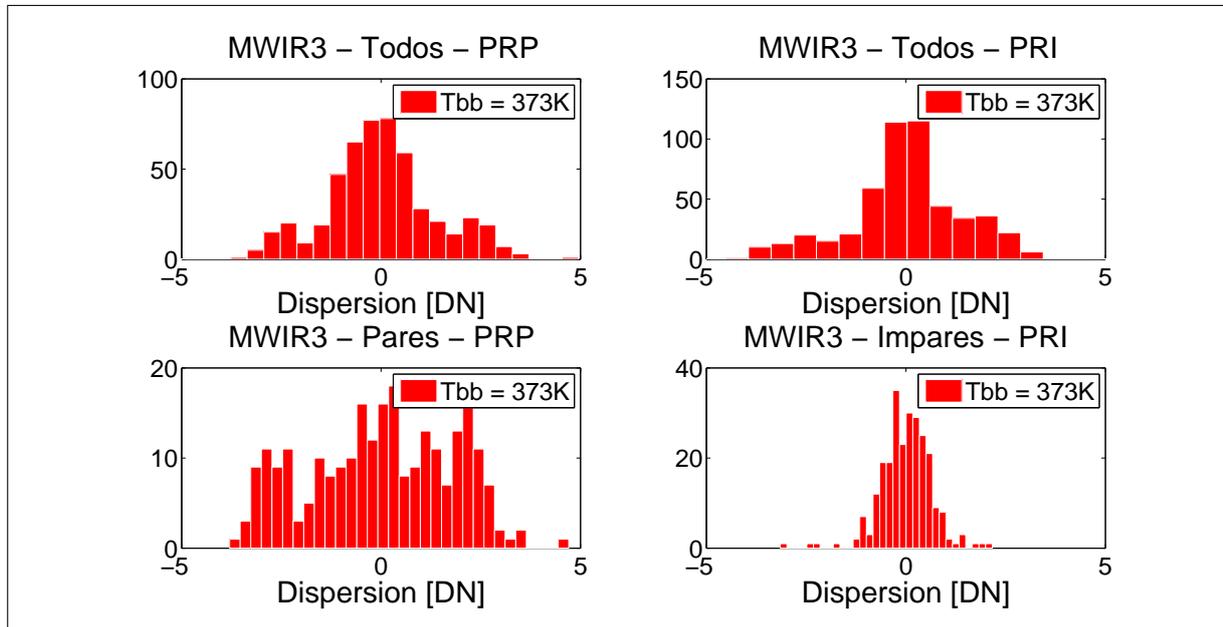


(a)

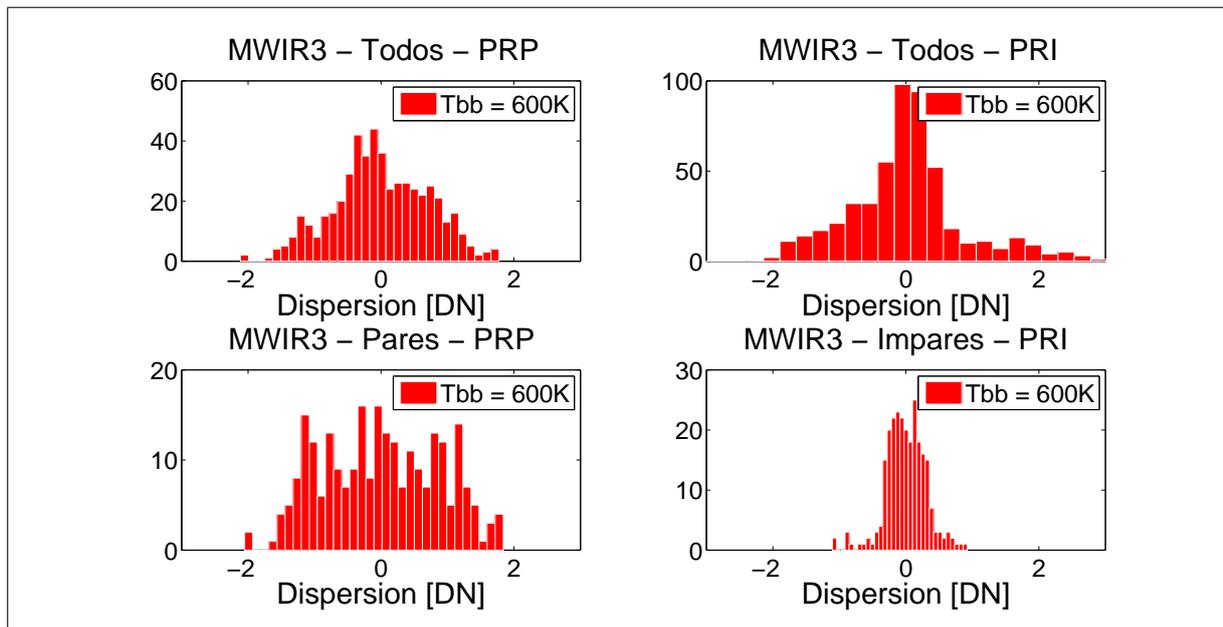


(b)

Figura 5.5: Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo MWIR2 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 4$ para $T = 373K$ (Figura 5.5a) y $T = 600K$ (Figura 5.5b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración *Todos-Par*, los paneles superiores derechos corresponden a la configuración *Todos-Impar*, los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración *Par-Par* y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración *Impar-Impar*. Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.



(a)



(b)

Figura 5.6: Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo MWIR3 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 4$ para $T = 373K$ (Figura 5.6a) y $T = 600K$ (Figura 5.6b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración *Todos-Par*, los paneles superiores derechos corresponden a la configuración *Todos-Impar*, los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración *Par-Par* y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración *Impar-Impar*. Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.

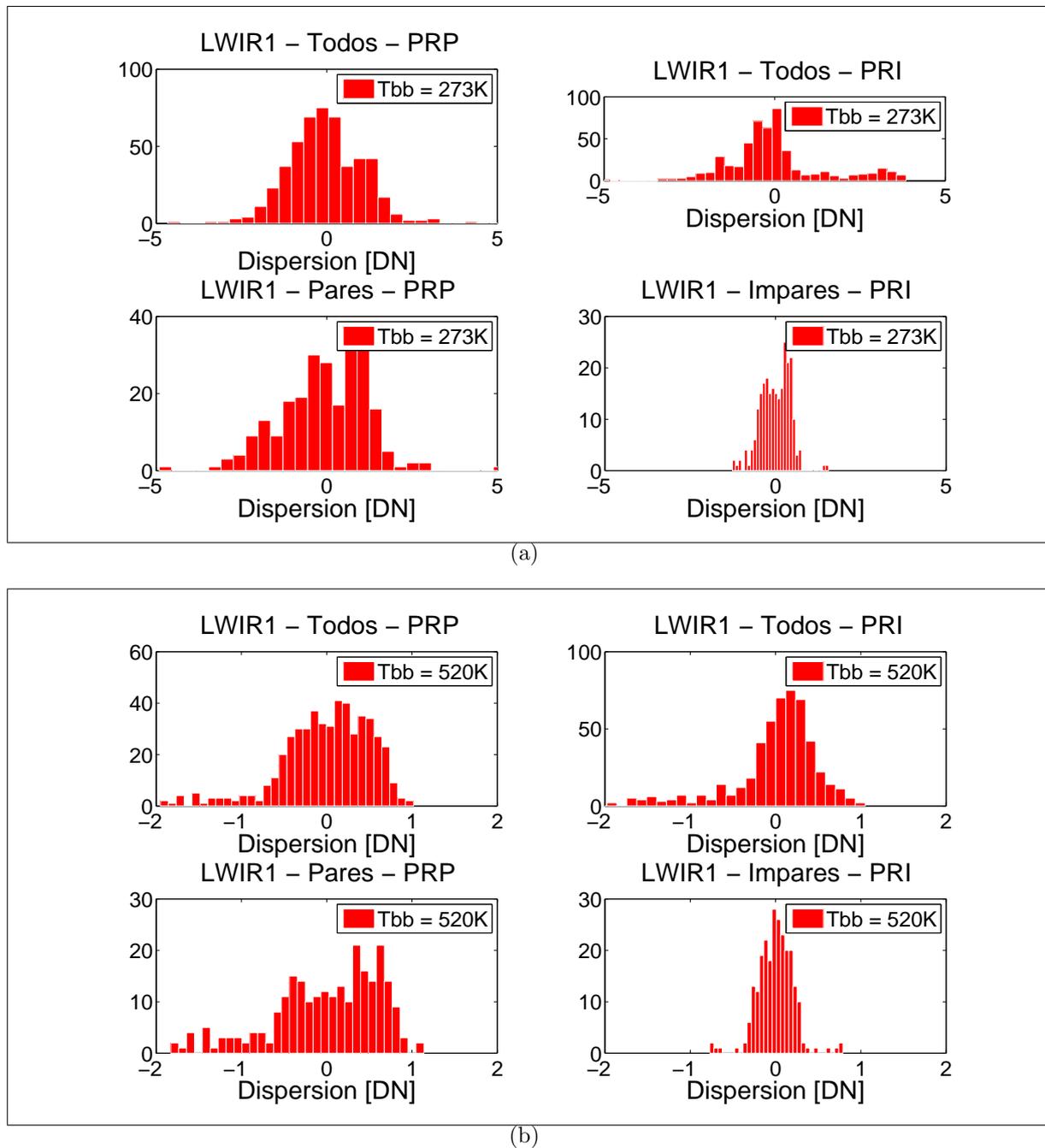
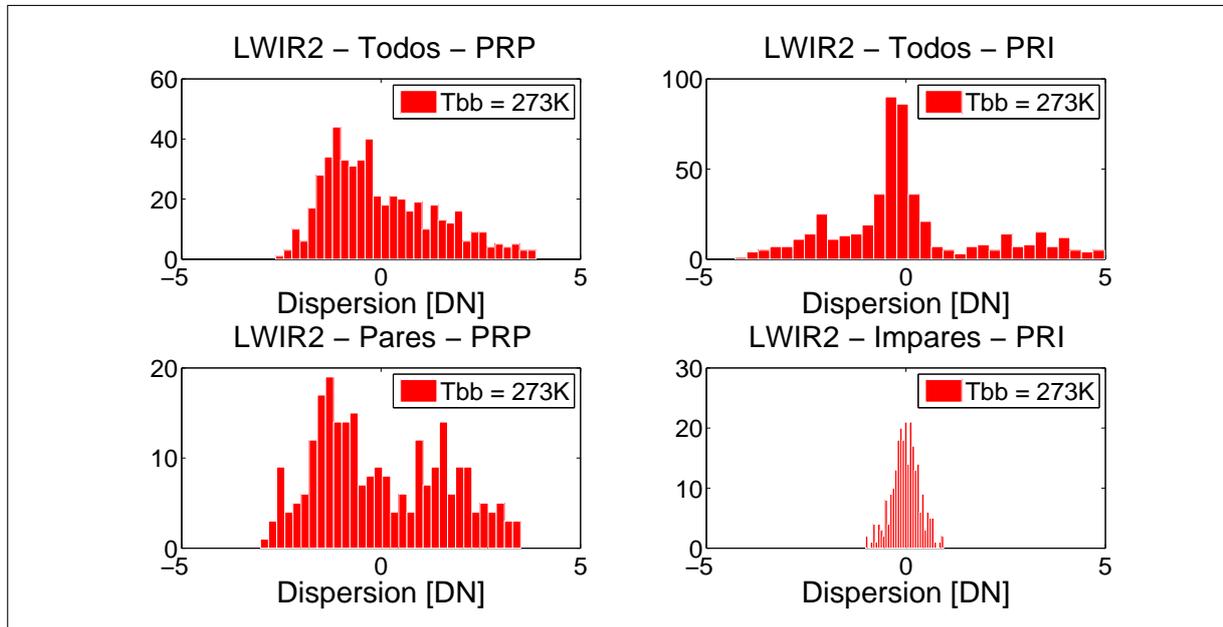
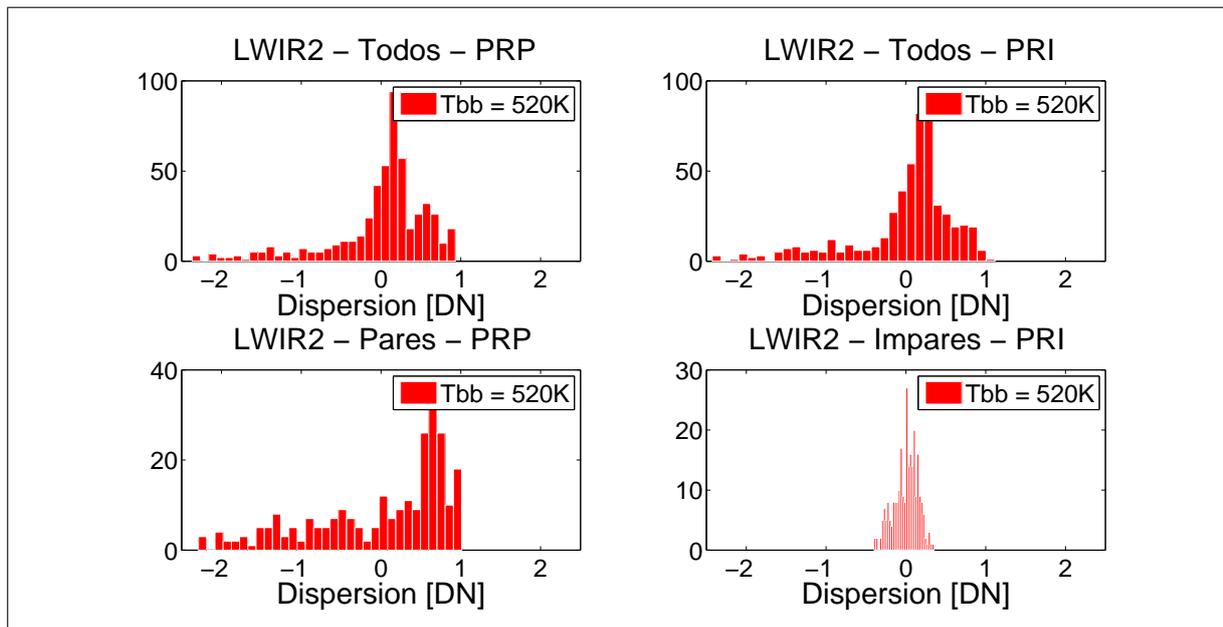


Figura 5.7: Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo LWIR1 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 8$ para $T = 273K$ (Figura 5.7a) y $T = 520K$ (Figura 5.7b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración *Todos-Par*, los paneles superiores derechos corresponden a la configuración *Todos-Impar*, los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración *Par-Par* y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración *Impar-Impar*. Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.

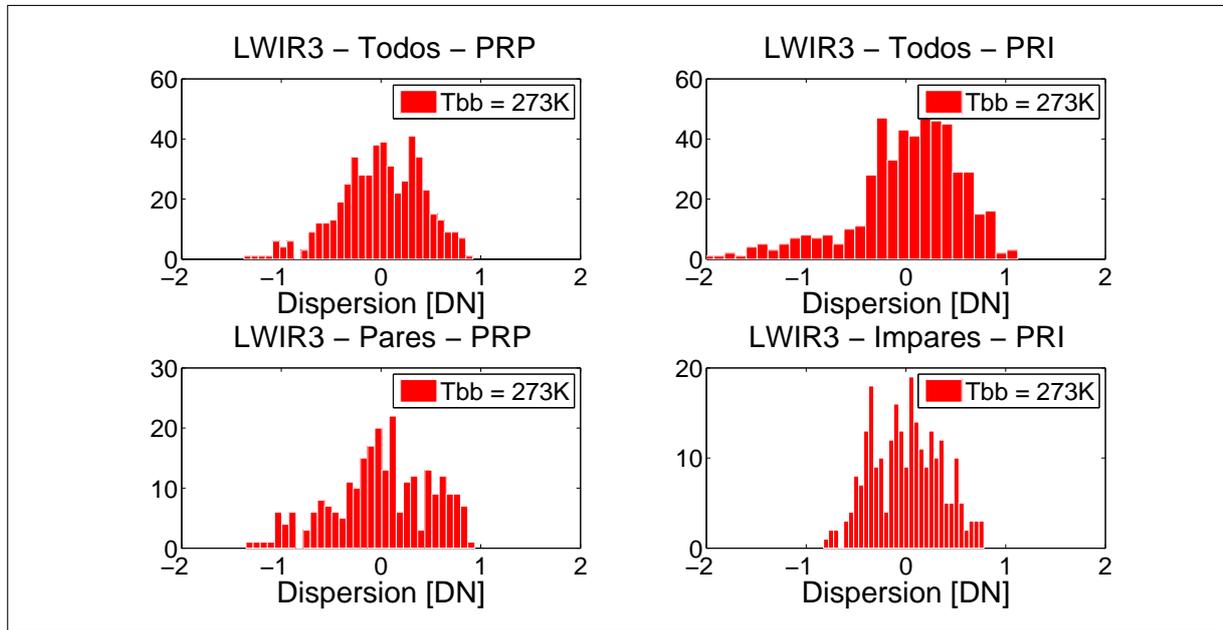


(a)

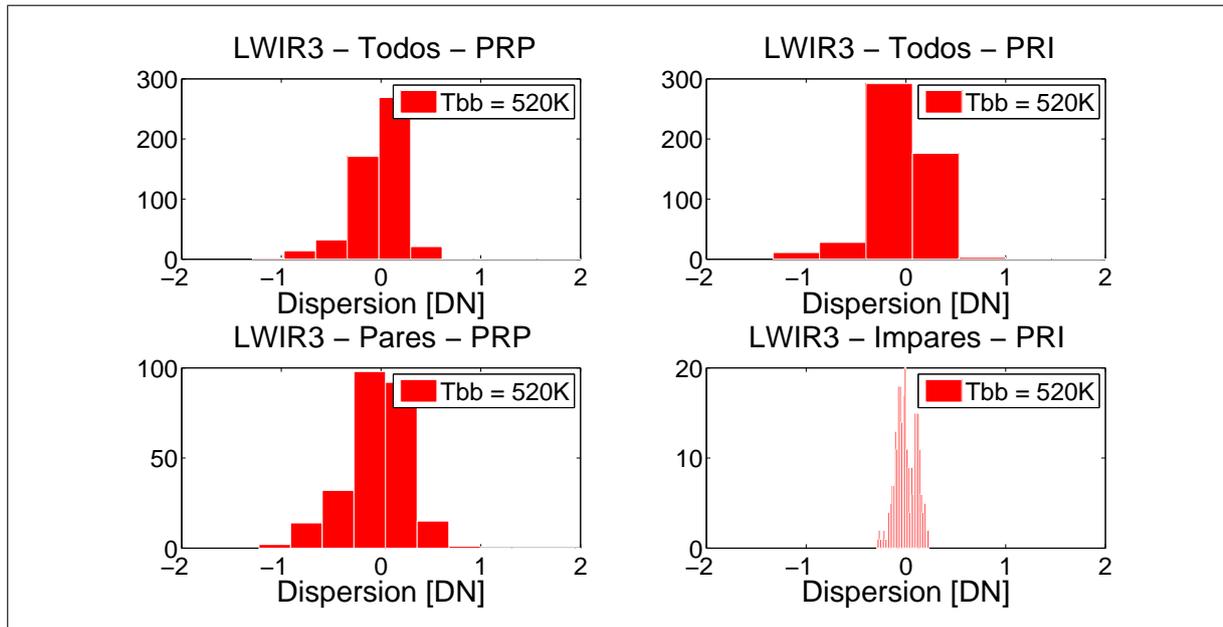


(b)

Figura 5.8: Dispersión de la equalización de las cuentas correspondientes al arreglo LWIR2 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 8$ para $T = 273K$ (Figura 5.8a) y $T = 520K$ (Figura 5.8b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración *Todos-Par*, los paneles superiores derechos corresponden a la configuración *Todos-Impar*, los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración *Par-Par* y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración *Impar-Impar*. Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.



(a)



(b)

Figura 5.9: Dispersión de la ecualización de las cuentas correspondientes al arreglo LWIR3 empleando los coeficientes del polinomio de calibración relativa de grado $\mathcal{O} = 8$ para $T = 273K$ (Figura 5.9a) y $T = 520K$ (Figura 5.9b). En cada caso, los paneles superiores izquierdos corresponden a la configuración *Todos-Par*, los paneles superiores derechos corresponden a la configuración *Todos-Impar*, los paneles inferiores izquierdos corresponden a la configuración *Par-Par* y los paneles inferiores derechos corresponden a la configuración *Impar-Impar*. Los píxeles de referencia par e impar son los indicados en la Tabla 5.1.

de píxeles en el escenario *Par-Par*. En los escenarios *Todos-Par* y *Todos-Impar* esta tendencia es menos marcada, mientras que en el escenario *Impar-Impar* no es observable. Analizando conjuntamente los valores de SiTF observados en la Figura 4.8 y los anchos de las distribuciones se observa que a $T = 373\text{K}$ no se logra una buena ecualización en los arreglos llegándose a obtener diferencias de hasta $10\text{K}@373\text{K}$ entre píxeles pares de distintas poblaciones. A $T = 600\text{K}$ la ecualización mejora pero el *stripping* permanece.

Banda de 10.85 μm : Se observa una distribución bimodal en el escenario *Par-Par* de la banda de 10.85 μm (Figuras 5.7 y 5.8). Al igual que en el caso de la banda de 3.8 μm , este comportamiento es menos marcado en los escenarios *Todos-Par* y *Todos-Impar*, mientras que en el escenario *Impar-Impar* no es observable. Analizando conjuntamente los valores de SiTF observados en la Figura 4.8 y los anchos de las distribuciones se observa que la contribución al *stripping* por parte de los detectores pares es muy marcada obteniéndose diferencias de hasta $\sim 6\text{K}@273\text{K}$ en el escenario *Par-Par* frente a $\sim 1\text{K}@273\text{K}$ en el escenario *Impar-Impar*. A $T = 520\text{K}$ la ecualización mejora, incluso en los escenarios que contienen píxeles pares obteniéndose diferencias de hasta $\sim 0.6\text{K}@520\text{K}$.

Banda de 11.85 μm : Por su parte, la banda de 11.85 μm pareciera presentar tres poblaciones en el escenario *Par-Par*, mientras que las mismas no son distinguibles en el resto de los escenarios en $T = 273\text{K}$. La distinción entre poblaciones no resulta evidente en $T = 520\text{K}$ en ningún escenario. En todos los casos la dispersión total es menor a 2 DN en cualquiera de los escenarios (Figura 5.9). Analizando conjuntamente los valores de SiTF observados en la Figura 4.8 y los anchos de las distribuciones se logra una ecualización con diferencias de $\sim 2.8\text{K}@273\text{K}$ en el escenario *Par-Par* y $\sim 2.2\text{K}@273\text{K}$ en el escenario *Impar-Impar*. A $T = 520\text{K}$ se aprecia que la ecualización mejora particularmente en los detectores impares.

Es pertinente recordar que sólo fue especificado un único valor de $\text{NETD}@T_{\text{tipica}}$ para cada cámara (ver Capítulo 3). Debido a que no se cuenta con un modelo de NETD, no resulta posible conocer los valores de esta figura de mérito para distintas temperaturas de escena. Por este motivo el análisis presentado se realizó cualitativamente con el fin de estimar de manera aproximada las diferencias en temperatura obtenidas luego de ecualizar, pero no es posible contrastar estos valores con el NETD.

Resumiendo: Teniendo en cuenta la información provista por la Figura 5.3, se refuerza el hecho de que píxeles pares e impares deben ser tratados separadamente, siendo esto último

particularmente importante en el caso de la banda de $10.85 \mu\text{m}$.

Nótese que para minimizar el *stripping* resulta necesario emplear polinomios de calibración relativa cuyo grado es elevado reforzándose el concepto de no linealidad de los detectores.

En lo que respecta a la caracterización de los arreglos, el análisis individual de cada escenario prueba que la contribución de los píxeles pares conduce a distintas características del *stripping* (i.e. distintas poblaciones de píxeles), mientras que en el único escenario donde no hay píxeles pares presentes (*Impar-Impar*), las tendencias son similares en todos los arreglos. Este es un resultado interesante a tener en cuenta durante la etapa de diseño del *Radiometric Package* (Ref. [19]).

Capítulo 6

Caracterización del espejo

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados de la caracterización del apuntamiento del espejo de NIRST desde el punto de vista radiométrico. Dicha caracterización es necesaria esencialmente por dos motivos. Por un lado, dado que las cámaras reciben la radiación reflejada por el espejo, es necesario conocer la respuesta del mismo en función del ángulo de apuntamiento utilizado. Por otro lado, la caracterización del espejo en tierra permite detectar un comportamiento anómalo o degradación del mismo una vez que el SAC-D se encuentre en órbita.

En la Sección 6.1 se repasan brevemente las actividades realizadas en laboratorio. La Sección 6.2 muestra los resultados correspondientes a la respuesta en función del ángulo de apuntamiento. En la Sección 6.3 se analizan los coeficientes resultantes de la caracterización del espejo.

6.1. Actividades realizadas en laboratorio

Al igual que en el caso de MODIS (Refs. [32], [37] y [41]), se caracterizó la respuesta en función del ángulo de apuntamiento (RVS) del espejo en laboratorio a temperatura ambiente para las tres bandas de NIRST. Tal como se mencionó en la Sección 3.5, debido al ajustado cronograma de misión, las mediciones correspondientes a la caracterización de la RVS tuvieron lugar conjuntamente con la calibración radiométrica de las cámaras, adquiriendo datos a distintas temperaturas de cuerpo negro T_{bb} y evaluando la respuesta en cuentas de los microbolómetros de cada arreglo en función del ángulo de barrido para los ángulos de apuntamiento extremos, $\beta = \{30^\circ, 60^\circ\}$ en función del ángulo de referencia natural correspondiente al apuntamiento nadiral $\beta = 45^\circ$. El conjunto de temperaturas empleado para el

estudio de la RVS fue presentado en la Tabla 3.4 y corresponde a aquellos casos en los cuales se realizaron mediciones en los tres ángulos de apuntamiento.

6.2. Respuesta en función del ángulo de apuntamiento

Se estudió la respuesta en función del ángulo de apuntamiento en cada uno de los 512 píxeles de cada arreglo en ambas cámaras. En las Figuras 6.1 y 6.2 se muestran a modo de ejemplo las respuestas de los píxeles 4, 5, 255, 256, 509 y 510 de los tres arreglos de las cámaras MWIR y LWIR. La distribución de datos en todos los casos presenta a simple vista un comportamiento lineal.

Con el objetivo de caracterizar la RVS se utilizaron ajustes polinomiales basados en la Ecuación 2.6. Nuevamente, la optimización de los ajustes se realizó normalizando los datos mediante la Ecuación 2.7. Se estimó la desviación standard $\|r\|_{DN}$ promediada sobre todos los píxeles, los píxeles pares y los impares en función del grado del polinomio de caracterización del espejo con el fin de definir el grado óptimo. En las Figuras 6.3 y 6.4 se muestran los resultados de dicho análisis para las cámaras MWIR y LWIR respectivamente. Los paneles superiores corresponden a los residuos para $\beta = 30^\circ$ mientras que los paneles inferiores corresponden a los residuos para $\beta = 60^\circ$.

A excepción de la banda de $10.85\mu\text{m}$ con $\beta = 60^\circ$, los residuos son tales que $\|r\|_\beta \leq 2$. Teniendo en cuenta la respuesta lineal observada en las Figuras 6.1 y 6.2 en todos los casos, y que las diferencias entre los resultados correspondientes a los ajustes lineales y los de grado superior son despreciables con respecto a los resultados arrojados por las calibraciones absoluta y relativa, se tomó la decisión de **emplear funciones afines en la caracterización del espejo** (Ref. [19]).

Aunque es deseable utilizar un ajuste lineal por cada arreglo de cada cámara, se investigó la necesidad de discriminar entre píxeles pares e impares en cada caso. Si bien se espera que esto último no sea necesario debido a que el comportamiento del espejo es independiente de las características de fabricación de las cámaras, se requiere otro tipo de análisis para descartar esta necesidad (ver Sección 6.3).

Las Figuras 6.1 y 6.2 revelan además diferentes tendencias entre los distintos microbolómetros y en ambas cámaras observándose que tanto MWIR como LWIR presentan una dependencia de la respuesta con la ubicación de los microbolómetros en cada arreglo. En efecto, los detectores situados en la primera mitad de cada arreglo (píxeles 4, 5, 255, 256)

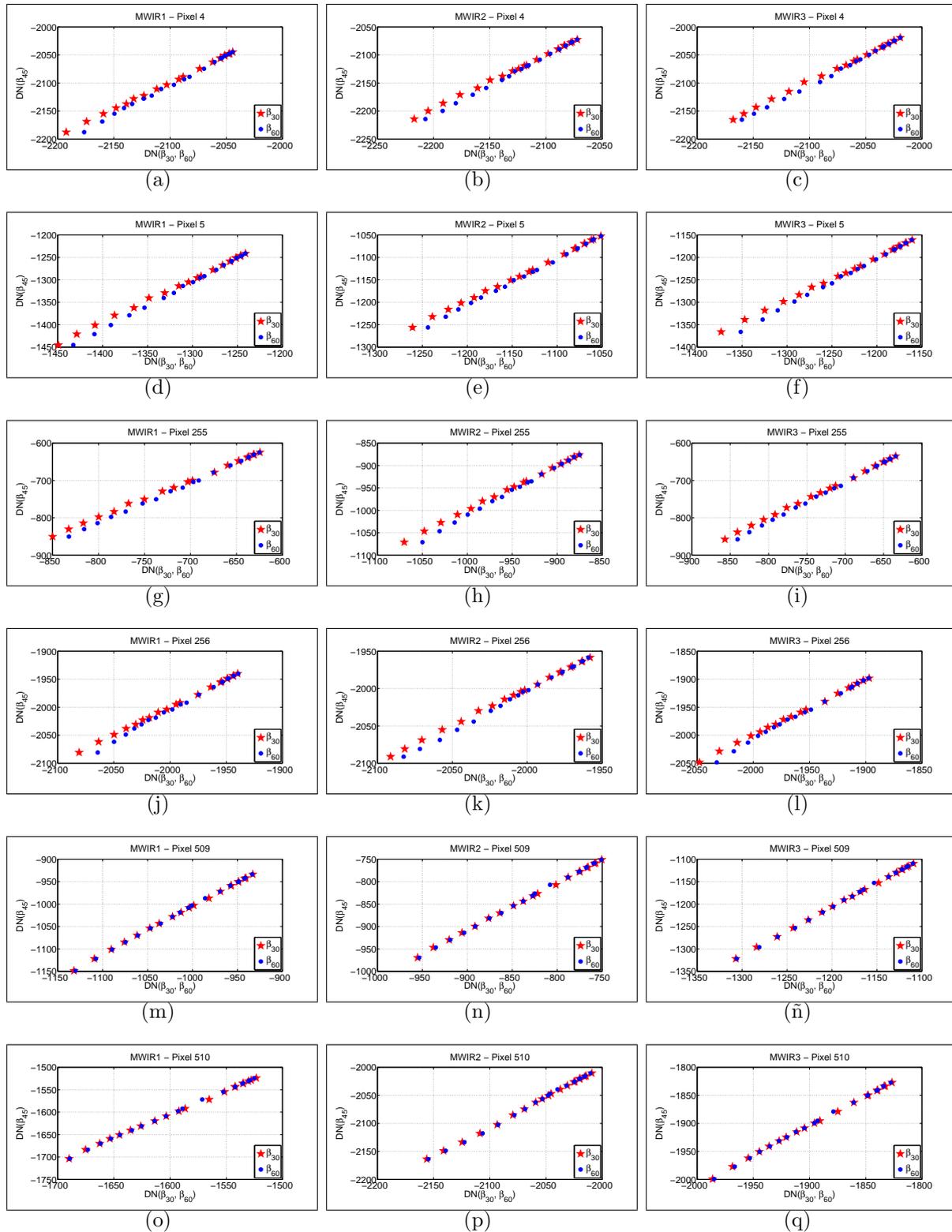


Figura 6.1: Respuesta de los píxeles 4, 5, 255, 256, 509 y 510 de la cámara MWIR1 (izquierda), MWIR2 (centro) y MWIR3 (derecha) para $\beta = 30^\circ$ (estrellas rojas) y $\beta = 60^\circ$ (asteriscos azules) tomando como referencia los datos obtenidos con $\beta = 45^\circ$.

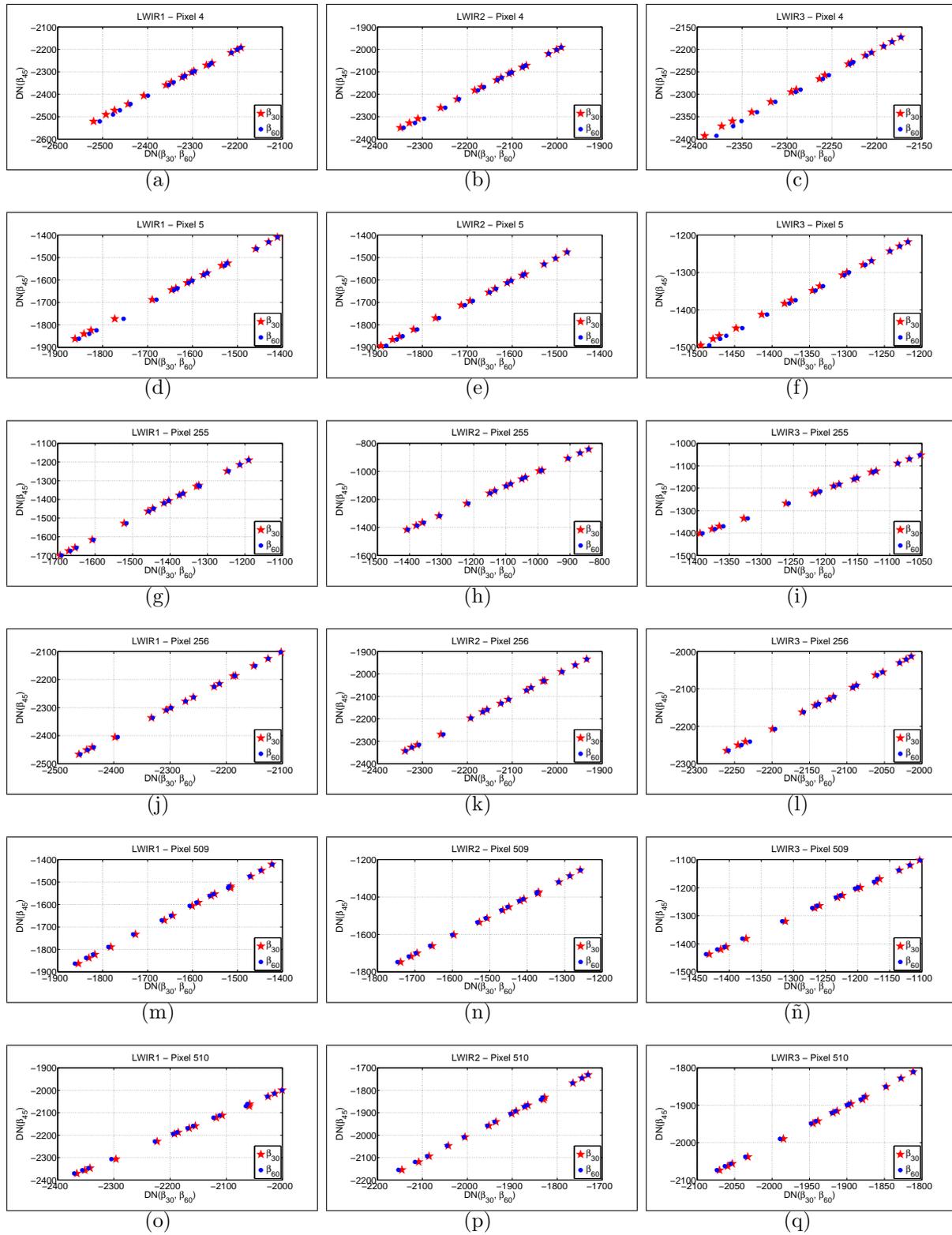


Figura 6.2: Respuesta de los píxeles 4, 5, 255, 256, 509 y 510 de la cámara LWIR1 (izquierda), LWIR2 (centro) y LWIR3 (derecha) para $\beta = 30^\circ$ (estrellas rojas) y $\beta = 60^\circ$ (asteriscos azules) tomando como referencia los datos obtenidos con $\beta = 45^\circ$.

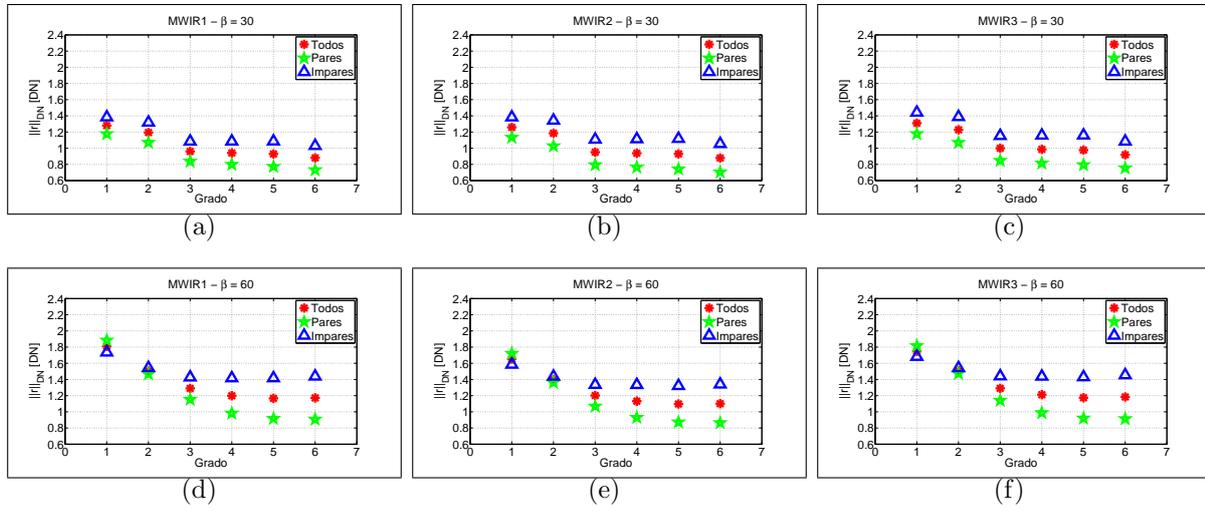


Figura 6.3: Desviación standard $\|r\|_{DN}$ promediada sobre todos los píxeles (asteriscos rojos), sobre los píxeles pares (estrellas verdes) y sobre los píxeles impares (triángulos azules) en función del grado del polinomio utilizado para la caracterización del apuntamiento del espejo. Se muestran los resultados obtenidos para los arreglos MWIR1 (izquierda), MWIR2 (centro) y MWIR3 (derecha), para $\beta = 30^\circ$ (paneles superiores) y $\beta = 60^\circ$ (paneles inferiores).

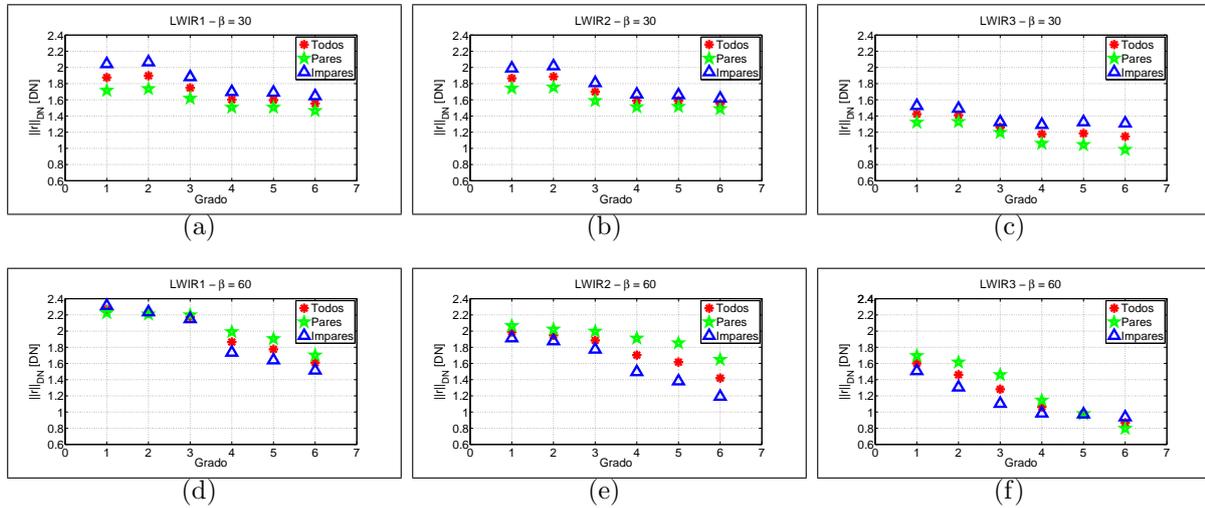


Figura 6.4: Desviación standard $\|r\|_{DN}$ promediada sobre todos los píxeles (asteriscos rojos), sobre los píxeles pares (estrellas verdes) y sobre los píxeles impares (triángulos azules) en función del grado del polinomio utilizado para la caracterización del apuntamiento del espejo. Se muestran los resultados obtenidos para los arreglos LWIR1 (izquierda), LWIR2 (centro) y LWIR3 (derecha), para $\beta = 30^\circ$ (paneles superiores) y $\beta = 60^\circ$ (paneles inferiores).

muestran mayores diferencias entre las RVS a $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$ que aquellos localizados al final de los arreglos (píxeles 509, 510).

6.3. Análisis de los coeficientes de caracterización

Con el objetivo de profundizar el análisis sobre la respuesta lineal del espejo, se estudiaron los comportamientos de la pendiente y la ordenada al origen resultantes de los ajustes lineales en función de la ubicación de cada microbolómetro en cada uno de los arreglos de ambas cámaras.

6.3.1. Resultados

La Figura 6.5 muestra las pendientes (paneles izquierdos) y las ordenadas al origen (paneles derechos) correspondientes a los ajustes lineales de los ángulos de apuntamiento $\beta = 30^\circ$ (estrellas rojas) y $\beta = 60^\circ$ (asteriscos azules) en función del apuntamiento nadiral $\beta = 45^\circ$ para cada uno de los microbolómetros de ambas cámaras.

Tal como era de esperar debido a que la respuesta en función del ángulo de apuntamiento es una propiedad intrínseca del espejo, no se evidencia una dependencia de la RVS con la paridad de los píxeles.

No se observa dependencia de las pendiente y ordenada al origen con la banda espectral, pero sí **existen diferencias** en los comportamientos observados en los coeficientes del ajuste lineal **entre los arreglos ubicados en las dos cámaras**. En efecto, nótese que las bandas de $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$ contenidas en la cámara LWIR exhiben las mismas tendencias, siendo éstas distintas a las presentadas por la banda de $3.8 \mu\text{m}$ contenida íntegramente en la cámara MWIR.

En la Figura 6.5 se observa que la RVS presenta una **dependencia con la ubicación de los microbolómetros**, tal como se anticipó anteriormente (ver Figuras 6.1 y 6.2). Todos los arreglos presentan cuatro regiones con pendiente y ordenada al origen cuyas tendencias difieren de una región a otra. Estas regiones abarcan diferentes píxeles según de cuál cámara se trate, tal como se aprecia en la Tabla 6.1.

También puede apreciarse que tanto las pendientes como las ordenadas al origen son en general menores con $\beta = 30^\circ$ que con $\beta = 60^\circ$, por lo tanto, **la RVS depende del ángulo de apuntamiento**.

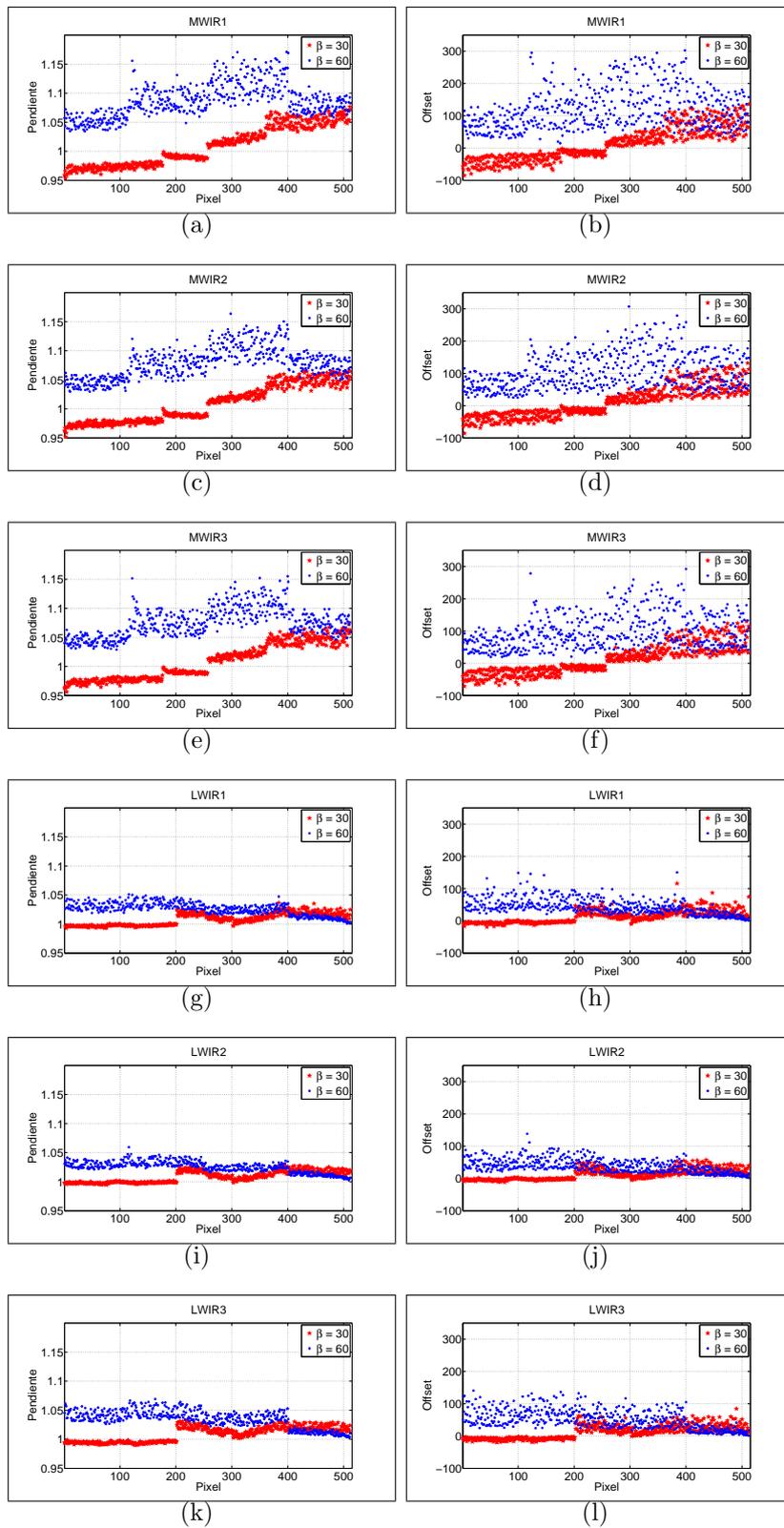


Figura 6.5: Pendiente (paneles izquierdos) y ordenada al origen (paneles derechos) correspondientes al ajuste lineal de los ángulos de apuntamiento $\beta = 30$ (estrellas rojas) y $\beta = 60$ (asteriscos azules) en función del apuntamiento nadiral $\beta = 45$ para cada uno de los microbolómetros de ambas cámaras. Las figuras corresponden a los arreglos MWIR1(a,b), MWIR2 (c,d), MWIR3 (e,f), LWIR1 (g,h), LWIR2 (i,j) y LWIR3 (k,l).

Región	Microbolómetros MWIR		Microbolómetros LWIR	
	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 60^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 60^\circ$
1	[1 - 176]	[1 - 116]	[1 - 201]	[1 - 116]
2	[177 - 256]	[117 - 269]	[202 - 315]	[117 - 250]
3	[257 - 360]	[270 - 400]	[316 - 380]	[251 - 400]
4	[361 - 512]	[401 - 512]	[381 - 512]	[401 - 512]

Tabla 6.1: Regiones de microbolómetros que presentan un mismo comportamiento en pendiente y ordenada al origen en cada cámara, para $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$. Los valores entre corchetes indican los píxeles que delimitan cada región.

6.3.2. Discusión

En esta sección se discuten los resultados obtenidos a partir del estudio de los coeficientes de caracterización.

Como se mencionó, las bandas de $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$ contenidas en la cámara LWIR exhiben las mismas tendencias en pendiente y ordenada al origen, siendo éstas distintas a las presentadas por la banda de $3.8 \mu\text{m}$ contenida íntegramente en la cámara MWIR. Esto podría deberse a que el espejo no emite igual en el infrarrojo medio ($3.8 \mu\text{m}$) que en el infrarrojo térmico ($10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$), sin embargo no se puede confirmar esta hipótesis debido a que el espejo no fue caracterizado espectralmente.

La existencia de 4 regiones delimitadas por distintos microbolómetros en cada cámara y para cada ángulo de apuntamiento se atribuyen a la no uniformidad de la superficie emisora de los cuerpos negros de laboratorio combinada con las características del método de adquisición de datos empleado. Los datos obtenidos con $\beta = 60^\circ$ presentan una mayor componente de ruido que aquellos correspondientes a $\beta = 30^\circ$ debido a la mayor contribución de luz parásita en el primer caso. A continuación se discuten estos aspectos.

Características de la metodología de adquisición en laboratorio: Analizando por ejemplo la cámara MWIR, cuyos datos fueron adquiridos únicamente con el BBB, se observa que, para $\beta = 30^\circ$, las regiones #1 y #4 (ver Figura 6.5, Tabla 6.1) son coincidentes con las regiones BB1 y BB3 de la Tabla 3.3, mientras que las regiones #2 y #3 se corresponden con BB2 que aparece dividida como resultado de emplear $\beta = 45^\circ$ como ángulo de referencia. Algo similar ocurre para $\beta = 60^\circ$ donde la correspondencia entre las regiones $\{\#1; \#4\}$ y $\{\text{BB1}; \text{BB4}\}$ es uno a uno.

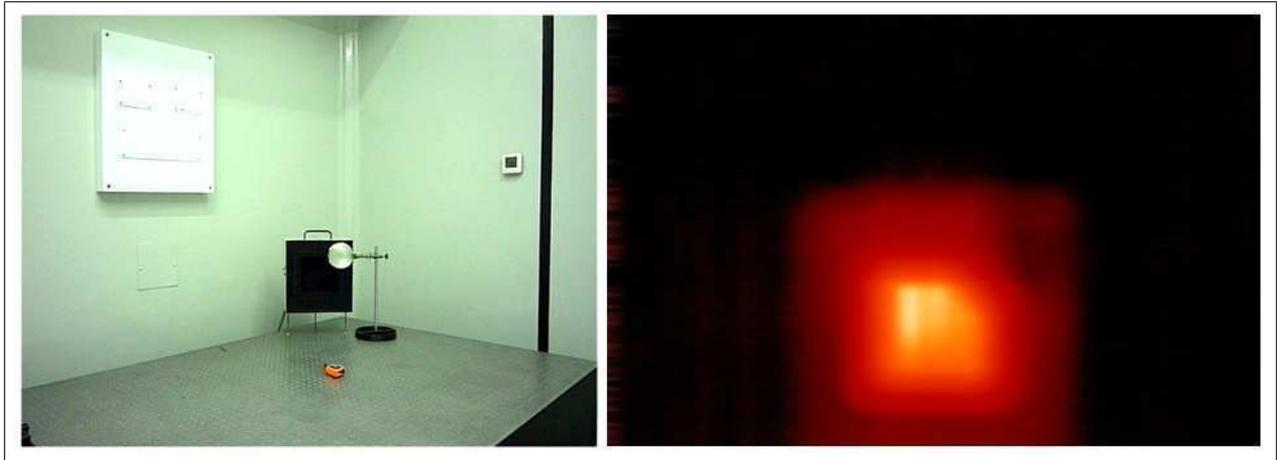


Figura 6.6: No uniformidad de la superficie emisora del cuerpo negro BBB. Izquierda: Foto del BBB. Derecha: Superficie del BBB vista por la cámara LWIR.

No uniformidad de la superficie emisora de los cuerpos negros: En la Figura 6.6 se muestra la superficie del BBB vista desde la cámara LWIR donde la no uniformidad de la superficie emisora puede ser apreciada. Tal como se mencionó en el Capítulo 3, debido a que no fue posible caracterizar los cuerpos negros de estantería, los datos sobre la no uniformidad de las fuentes no están disponibles. La no uniformidad de la superficie emisora quedó enmascarada al analizar los resultados de las calibraciones absoluta y relativa presentados en los capítulos anteriores debido a que las diferencias de temperatura observadas entre píxeles son mayores que el gradiente de temperatura descubierto durante la caracterización de la RVS del espejo. Por este motivo, la falta de uniformidad de las fuentes de estantería no contribuye significativamente desde el punto de vista de la precisión de las mediciones pudiendo emplearse entonces un **único juego de coeficientes de calibración por cada arreglo**.

Luz parásita: Los datos obtenidos con $\beta = 60^\circ$ son más ruidosos que aquellos correspondientes a $\beta = 30^\circ$ debido a la presencia de luz parásita cuya contribución es mayor en el primer caso que en el segundo. La Figura 6.7 provee un diagrama que ilustra la ubicación relativa de las cámaras y el espejo. Debido a que el eje de rotación del espejo se encuentra en uno de sus extremos, la distancia media entre el espejo y el módulo de cámaras aumenta conforme el espejo rota desde $\beta = 30^\circ$ hacia $\beta = 60^\circ$.

La escena vista por las cámaras cuando $\beta = 30^\circ$ contempla un cuerpo negro centrado rodeado de un fondo a temperatura ambiente. Cuando $\beta = 60^\circ$ al escenario anterior se suman

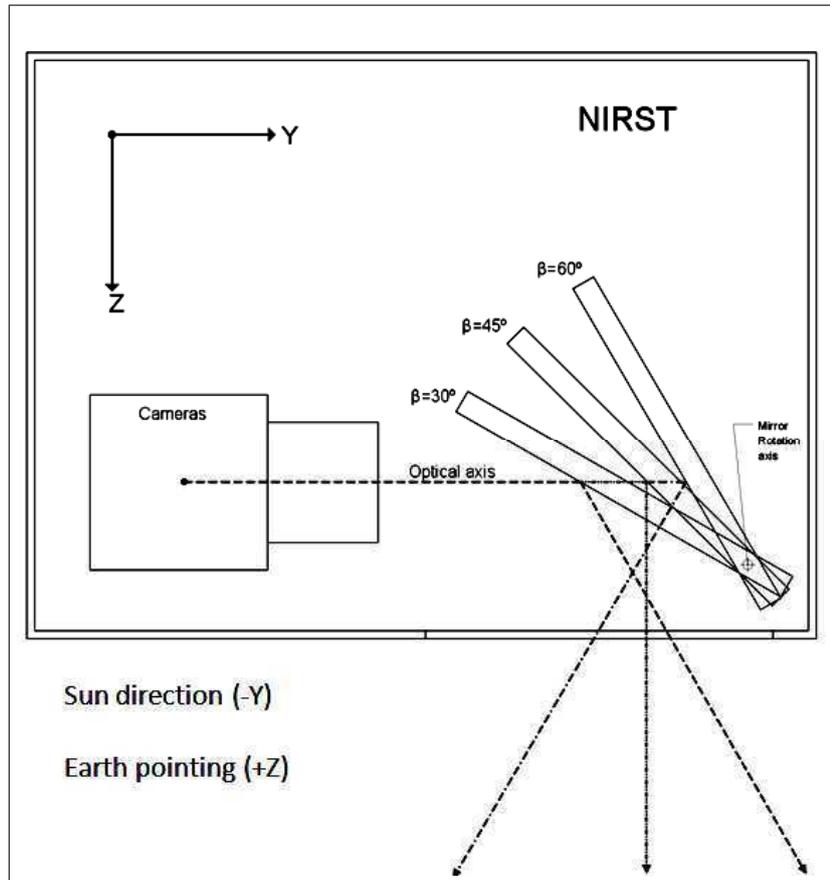


Figura 6.7: Diagrama de NIRST mostrando la posición relativa de las cámaras y el espejo. Debido a que el eje de rotación del espejo se encuentra ubicado próximo a uno de sus extremos, la distancia media entre el espejo y el módulo de cámaras aumenta al rotar de $\beta = 30^\circ$ a $\beta = 60^\circ$.

las contribuciones provenientes de la estructura interna de NIRST. En efecto, la estructura interna del instrumento no se encuentra íntegramente recubierta con MLI y por lo tanto sufre variaciones de temperatura cuando NIRST es irradiada por la fuente de cuerpo negro.

Las variaciones de temperatura en la estructura interna son apenas de unos grados y la luz parásita sólo afecta aquellas mediciones comparables con la temperatura ambiente.

Este efecto permaneció oculto al analizar los resultados de las calibraciones absoluta y relativa presentados en los capítulos anteriores debido a que las variaciones en sensibilidad de un píxel a otro son elevadas.

Capítulo 7

Trabajo futuro y sugerencias para futuras misiones

El trabajo presentado en esta tesis abre nuevas perspectivas en lo que respecta a la calibración del instrumento y también deja una serie de lecciones aprendidas que fueron capturadas a modo de sugerencias para futuras misiones.

En la Sección 7.1 se analiza el trabajo a futuro relacionado con las actividades de caracterización de NIRST. En la Sección 7.2 se discuten sugerencias para futuras misiones espaciales de la CONAE, siendo las mismas aplicables a algunas de las cámaras infrarrojas que se proyecta tener.

7.1. Trabajo futuro de NIRST

A continuación se discuten las perspectivas de trabajo a futuro que surgen motivadas principalmente por ciertos aspectos relacionados con el diseño del instrumento y la factibilidad de testeo en tierra (i.e. antes de la puesta en órbita del satélite).

Diseño del instrumento: Las diferencias en la uniformidad de la sensibilidad de microbolómetros pares e impares y la no linealidad de los mismos tornan necesario un esfuerzo prolongado de caracterización radiométrica del instrumento con el fin de discriminar las observaciones influyentes de las no influyentes. Tomando la definición de observación influyente como aquella que individualmente o combinada con otras impacta significativamente en los resultados obtenidos luego de realizar un ajuste (Ref. [42]), es deseable realizar un plan de caracterización radiométrica que contemple la repetición de mediciones y la adquisición de datos para una mayor cantidad de temperaturas de escena que las empleadas en la calibra-

ción en laboratorio. El objetivo es lograr ajustes de menor grado que capturen la física del sensor.

Factibilidad de testeo en tierra: La factibilidad de testeo en tierra se encuentra íntimamente vinculada con aspectos técnicos y programáticos. Entre los aspectos técnicos que restringen la capacidad de testeo en tierra se encuentra la disponibilidad de equipamiento, por ejemplo, como se verá más adelante, contar con fuentes de cuerpo negro que puedan ser ingresadas a una cámara de termovacío, o bien, cámara de termovacío con ventana de Ge para colocar el cuerpo negro fuera de la misma durante la calibración radiométrica. Entre los aspectos programáticos se tienen limitaciones de costo y fechas límite a nivel misión.

Tal como se mencionó en el Capítulo 3, debido a la imposibilidad técnica y programática de llevar a cabo un plan de caracterización y calibración de pre lanzamiento más extenso a continuación se delinean actividades a realizar una vez que el satélite se encuentre en órbita.

Commissioning del instrumento: Posteriormente a la evaluación del estado de salud del instrumento luego de su primer encendido, es recomendable realizar un plan de calibración radiométrica que contemple al menos los siguientes puntos:

1. Determinación del piso de ruido de los microbolómetros de cada arreglo realizando adquisiciones de espacio profundo (también denominadas "Cold Sky Calibration"). Este tipo de adquisición implica que el satélite ejecute una maniobra en pitch¹ y por lo tanto es necesario planificar este tipo de actividad en forma conjunta con las actividades de los demás instrumentos y de la plataforma de servicios.
2. Evaluación de la cantidad de píxeles *atípicos* y su clasificación en *no-standard*, *anómalos* y *muertos*. Es importante verificar si la cantidad de píxeles defectuosos se incrementó luego del lanzamiento del satélite y obtener la "foto" inicial una vez en órbita.
3. Caracterización inicial de los 6 arreglos evaluando su rango dinámico y realizando las calibraciones absoluta y relativa en condiciones ambientales operativas del instrumento. Para ello pueden combinarse la utilización de sitios de calibración (de aquí en adelante, CAL/VAL) y la adquisición del espacio profundo. Debido al período de revisita del satélite (7 días), esta actividad podría extenderse durante un período prolongado para lograr repetición de adquisiciones de un mismo sitio CAL/VAL.

¹ver Apéndice A, Sección A.3.1.

4. Caracterización del espejo obteniendo la RVS para distintos ángulos β adquiriendo datos sobre sitios CAL/VAL en condiciones similares al punto anterior. En función de los resultados obtenidos podrá trazarse el plan de operación nominal del instrumento estableciendo el apuntamiento del espejo en cada adquisición.
5. Análisis de la estabilidad de los detectores con el fin de detectar variaciones estacionales y evaluar cada cuanto es necesario calibrar el instrumento nominalmente.

La evaluación de los puntos 1 a 5 permite establecer un punto de partida del instrumento antes de iniciar la etapa de operaciones de rutina del mismo.

Se sugiere que los puntos 1, 3, 4 y 5 se realicen configurando la temperatura operativa del instrumento a distintos valores con el fin de evaluar la respuesta del instrumento en distintas condiciones térmicas y determinar cual es la configuración de mejor performance.

La ejecución de los puntos 1 a 3 debería permitir estipular cuales son los arreglos que se utilizarán como nominales en las operaciones de rutina de NIRST.

Operaciones de rutina del instrumento: Durante la etapa de operaciones de rutina del instrumento es deseable realizar periódicamente las siguientes actividades:

1. Realización de maniobra de *Cold Sky Calibration* con el fin de detectar corrimientos en el piso de ruido de los microbolómetros.
2. Realización de adquisiciones de sitios CAL/VAL con el fin de evaluar degradaciones por fallas o envejecimiento de los microbolómetros (por ejemplo, reducción del rango dinámico) y corrimientos en los coeficientes de calibración. La evaluación de la degradación de los detectores es particularmente importante en el caso de microbolómetros no enfriados. Walker & Spencer 2010 (Ref. [4]) explican que debido a que este tipo de tecnología tiene aun poco uso en el ámbito aeroespacial, la base de conocimiento con respecto a la susceptibilidad de estos detectores a la radiación es reducida. Por lo tanto, aun cuando se realicen ensayos de susceptibilidad a la radiación espacial en tierra, es vital testear esto en vuelo.
3. Evaluación de la RVS del espejo con el fin de detectar una posible degradación del mismo.

Nótese que la detección de píxeles *atípicos* no implica ninguna actividad especial en esta etapa debido a que son identificables al realizar adquisiciones con el instrumento.

7.2. Sugerencias para futuras misiones

La presente sección tiene como objetivo proveer sugerencias para futuras misiones espaciales de la CONAE siendo las mismas aplicables a algunas de las cámaras infrarrojas que se proyecta tener. Estas observaciones giran entorno a un tema central: la ingeniería en sistemas, focalizándose en aspectos vinculados con el diseño del instrumento, la caracterización del equipamiento empleado para medir, las técnicas de medición empleadas, la repetición de las mediciones y la necesidad de contar con un modelo radiométrico completo del instrumento.

Tanto la NASA como la ESA realizan las evaluaciones críticas de un proyecto durante las revisiones principales (Ref. [43]). Luego de finalizado el mismo, cliente y proveedor pueden analizar en forma conjunta las fortalezas y debilidades de las diferentes opciones elegidas a lo largo de las distintas fases de dicho proyecto (Ref. [44]). Las lecciones aprendidas deben cubrir en forma separada todas las funciones para conducir adecuadamente un proyecto (por ejemplo: gestión, ingeniería, integración y verificación) siendo esto clave para la gestión de riesgos de futuras misiones.

En las secciones siguientes se realiza un estudio comparativo entre NIRST (Sección 7.2.1) y otras misiones (Sección 7.2.2) y finalmente se proveen las recomendaciones (Sección 7.2.3).

7.2.1. NIRST

La tecnología empleada en NIRST consiste en microbolómetros no enfriados cuyas ventajas principales radican en el bajo nivel de consumo, peso reducido y tamaño pequeño con respecto a las tecnologías de sensores enfriados criogénicamente. La tecnología utilizada representa un desafío por el escaso uso que tiene en el ámbito aeroespacial en general y por ser la primera vez que se utiliza en un instrumento a bordo de una misión argentina (ver Capítulo 1).

En el Capítulo 3 se presentaron las especificaciones del instrumento. Las mismas cubren la definición del rango dinámico de temperaturas medidas por instrumento, la longitud de onda central y ancho de banda de cada banda, la precisión de los productos de ciencia, la sensibilidad y las condiciones ambientales relacionadas con la operación de la cámara.

Los requerimientos correspondientes al diseño y a la calibración del instrumento no exigen la linealidad de los microbolómetros y la uniformidad en la sensibilidad y tampoco establecen un límite a la cantidad de píxeles defectuosos (ver Capítulos 4 y 5). Dichas especificaciones

no son suficientes para lograr impactar en la elección del equipamiento ni en las técnicas y la asignación de los tiempos necesarios para la caracterización y calibración radiométrica del instrumento en tierra (ver Capítulos 3 y 6). No existen tampoco requerimientos vinculados con la factibilidad de calibrar el instrumento en vuelo mediante la utilización de fuentes a bordo del satélite. A continuación se enumeran algunos de estos aspectos.

NETD: Tal como se vio en el Capítulo 3, se especificó un único valor de $\text{NETD}@T_{\text{tipica}}$ para cada cámara. El fabricante de los *Radiometric Packages* de NIRST estimó este parámetro como el cociente entre la desviación standard y el SiTF, el cual fue obtenido calculando la derivada de la ecuación cuadrática 4.4 que relaciona cuentas DN y temperatura T_{bb} . El fabricante varió T_{bb} dentro de un rango acotado a unos pocos grados alrededor de la temperatura típica de escena de cada cámara (Ref. [8]). Si los píxeles tuvieran una sensibilidad uniforme y su comportamiento en temperatura fuera lineal, entonces, el enfoque empleado por el fabricante sería representativo de la física del instrumento. Sin embargo, como se demostró a lo largo de esta tesis, los microbolómetros no son lineales y la sensibilidad entre ellos no es uniforme, por lo tanto la forma en la cual se verificó el requerimiento del NETD no es adecuada en este caso. El no contar con un método independiente de la calibración radiométrica para la verificación del valor de NETD no permitió detectar tempranamente la no linealidad de los microbolómetros y la no uniformidad en la sensibilidad de los mismos.

Estabilidad térmica: En relación a la estabilidad térmica del instrumento, el análisis de la telemetría de *housekeeping* asociada a la etapa de calibración radiométrica de prelanzamiento de NIRST reveló que existe una correlación entre las temperaturas del cuerpo negro utilizado en laboratorio y las de los *Radiometric Packages* en particular en el caso de la cámara MWIR (Capítulo 4). Debido a que no hubo posibilidad de repetir las mediciones para una misma T_{bb} no resultó posible evaluar la estabilidad del instrumento y el impacto de dicha correlación en los datos de calibración obtenidos.

Características de los detectores: NIRST posee varios microbolómetros muertos y anómalos, y además los píxeles pares son menos performantes que los impares. Estos aspectos no pudieron ser descubiertos ni mitigados a tiempo debido a que NIRST no posee especificaciones que limiten la cantidad de detectores muertos o anómalos, que definan el período de degradación de dichos detectores, ni tampoco que fijen la performance de final de vida del instrumento.

Calibrador a bordo: Tal como se mencionó en el Capítulo 1, NIRST no contó con un calibrador a bordo que permita realizar chequeos periódicos de la calibración de los detectores

en vuelo y evaluar variaciones en la respuesta de los mismos a lo largo del tiempo.

Caracterización de los cuerpos negros de estantería: Debido a un cronograma ajustado de misión, los cuerpos negros de laboratorio comprados en el mercado no pudieron ser caracterizados previa utilización de los mismos en la calibración radiométrica del instrumento. Tal como se detalló en el Capítulo 6, el análisis de los resultados correspondientes a la caracterización del espejo permitió descubrir la existencia de un gradiente de temperatura en las superficies emisoras de estos cuerpos negros.

Tests end-to-end: También debido a cuestiones programáticas no fue posible desarrollar un modelo radiométrico ni un simulador de la respuesta radiométrica del instrumento que permitiera evaluar los resultados obtenidos durante la calibración de laboratorio.

Diversidad de metodologías para calibración en tierra: Tal como se indicó en el Capítulo 3 la calibración radiométrica de pre-lanzamiento de NIRST se realizó únicamente en laboratorio, a temperatura ambiente. Aunque varias misiones espaciales realizan su calibración radiométrica de pre-lanzamiento en una cámara de termovacío, esto no fue posible en el caso de NIRST debido a que los cuerpos negros comerciales utilizados están diseñados para operar a presión atmosférica, no pudiendo por ello ser ingresados a la cámara de termovacío y a que esta última no posee una ventana de Ge que permita realizar las mediciones con los cuerpos negros fuera de la misma.

7.2.2. Otras misiones

Los aspectos señalados en la Sección 7.2.1 se encuadran dentro del área de ingeniería en sistemas, partiendo de la definición de requerimientos y la gestión de los mismos hasta llegar a la etapa de ejecución.

Las normas de la *European Cooperation for Space Standardization* (ECSS) establecen que la definición de requerimientos de misiones espaciales se inicia en la *fase 0* (Ref. [45]). Durante la misma se establece la especificación preliminar técnica de requerimientos identificando y evaluando los conceptos del sistema (Ref. [46]). Durante la siguiente etapa, denominada *fase A*, el equipo de ingeniería en sistemas debe lograr terminar de expresar las necesidades identificadas durante la *fase 0* y proponer soluciones para cumplir con los requerimientos especificados. Durante la *fase B* el equipo de ingeniería en sistemas del proyecto debe demostrar que la solución seleccionada al final de la *fase A* cumple con los requerimientos técnicos de acuerdo al cronograma, presupuesto, costo y requerimientos de la organización a la cual pertenece el proyecto. En dicha fase se genera la especificación técnica final de reque-

rimientos. Durante la *fase C* se establece la definición detallada del sistema, demostrando la capacidad de cumplir con los requerimientos técnicos especificados durante la *fase B*. La *fase D* está destinada a la calificación y aceptación del proyecto a través de la verificación de los requerimientos derivados en la *fase C*. Esta fase tiene como objetivo dejar al sistema listo para ser operado durante la *fase E*, desde la campaña de lanzamiento hasta el final de vida del proyecto en la *fase F*.

Ingeniería en sistemas: Una parte importante del éxito en la performance de un instrumento depende de la calidad con la que se realiza su calibración. Los requerimientos definidos durante las *fases 0, A y B* permiten identificar las características mínimas indispensables para una adecuada posterior calibración radiométrica proveyendo el marco general para el diseño de los planes de calibración de la *fase C* del proyecto. Las actividades de calibración en sí mismas tienen lugar durante la *fase D*. Durante esta etapa de integración y tests es deseable lograr identificar aspectos imprevistos o indeseados y eliminar estas anomalías mediante modificaciones en el diseño. Sin embargo, si estas modificaciones no pueden ser realizadas debido al costo o a restricciones en el cronograma, debe hacerse un esfuerzo por reducir los efectos no deseados examinando y ejercitando diferentes condiciones operativas, caracterizando el impacto de las mismas e implementando algoritmos para corregirlas.

Tecnología empleada: La precisión requerida para calibrar en forma absoluta y relativa un sensor, así como su relevancia en la misión de la cual forma parte condiciona el tipo de tecnología a implementar en el diseño del instrumento. A la inversa, en caso de existir restricciones de la misión que condicionen la utilización de un determinado tipo de tecnología, este aspecto debe ser tenido en cuenta al momento de especificar la precisión con la cual se pretenda calibrar el instrumento.

Walker & Spencer 2010 (Ref. [4]) y Oelrich et al. 2004 (Ref. [5]) explican que la tecnología de microbolómetros no enfriados resulta conveniente en misiones de corta duración y que deben implementarse en plazos reducidos (por ejemplo, micro satélites como el *Rapid Reconnaissance and Response, R³*) o en instrumentos secundarios en una misión de mayor alcance. En el caso de los sensores enfriados, el equipo criogénico solo requiere un nivel de ensayo cuyos tiempos de ejecución pueden ser superiores al máximo tiempo necesario para diseñar y lanzar un sistema que brinde respuesta a una necesidad específica en el corto plazo.

TIRS se basa en la tecnología *Quantum Well Infrared Photodetectors* (QWIPs) siendo el plano focal del sensor enfriado criogénicamente a una temperatura estable (Ref. [36]). MODIS emplea detectores fotovoltaicos de HgCdTe y fotoconductivos de HgCdTe enfriados

radiativamente en las distintas bandas del infrarrojo medio y térmico (Ref. [37]). En ambos casos, tal como se verá más adelante en este capítulo, los costos y el ciclo de vida del diseño trajeron aparejada la captura de una gran cantidad de requerimientos, lo cual se tradujo en una elevada cantidad y diversidad de tests y una exigencia importante en lo que respecta a la precisión en la caracterización del equipamiento empleado para calibrar. Por otro lado, THEMIS cuya tecnología se basa en microbolómetros no enfriados, también fue sometido a un extenso conjunto de tests en distintas condiciones ambientales (Ref. [25]). La diferencia entre ambos tipos de tecnología radica en la performance. La comparación de los NETD entre bandas de similar longitud de onda a una temperatura típica semejante arroja valores prácticamente un orden de magnitud menores² en MODIS (Ref. [39], [47]) y TIRS (Ref. [48]) que en THEMIS (Ref. [25]). En los tres ejemplos citados, los instrumentos son centrales a sus respectivas misiones.

NETD: El NETD es la figura de mérito generalmente empleada en la caracterización de sensores infrarrojos. El NETD de un sistema de imágenes infrarrojo se define como la diferencia de temperatura del objeto imagen que crea una señal equivalente a la cantidad de ruido generado (Ref. [49]).

Niklaus et al. 2008 (Ref. [50]) proponen un modelo teórico para arreglos de microbolómetros infrarrojos no enfriados basado en las contribuciones de distintos factores de ruido (Johnson y térmico entre otros). Gopal 1995 (Ref. [51]) presenta un modelo teórico obtenido a partir de la medición del diferencial de corriente registrado por el detector debido a un cambio de temperatura en la escena, tomando en cuenta la contribución de una corriente de ruido. En ambos trabajos el cálculo del NETD se realiza a partir de la generación de un modelo teórico independiente del método de calibración del sensor. En la misión THEMIS (Ref. [25]) cuyos detectores son lineales, se estima el NETD para temperaturas de referencia previamente especificadas a partir del *Noise Equivalent Spectral Radiance* (NESR) computada dividiendo la desviación standard de la señal de salida por la respuesta del instrumento. En el caso de TIRS también se especifica el NETD a distintas temperaturas de escena (Ref. [48]).

Estabilidad térmica: En el caso de microbolómetros no enfriados los detectores operan más efectivamente en un ambiente térmicamente estable, lo cual se logra aislando térmicamente el módulo que contiene los detectores de la electrónica de proximidad de los mismos (Ref. [5]). En el caso de sensores enfriados criogénicamente, Xiong et al. 2009 (Ref. [52])

²Cuanto menor es el NETD, mejor es la performance del instrumento.

explican que además de las propiedades intrínsecas de un detector, la estabilidad de su respuesta se ve afectada por la electrónica y por la estabilidad en temperatura del FPA del instrumento. La caracterización de la estabilidad térmica en MODIS se realizó en termovacío, configurando distintas temperaturas en los FPA del instrumento, caracterizando los detectores y evaluando posibles variaciones en sus respuestas y sensibilidad.

En ambos tipos de tecnología las respuestas de los detectores presentarán variaciones a lo largo de las distintas órbitas, así como también variaciones estacionales dependientes de la orientación relativa entre el satélite y el Sol, por lo cual una caracterización de la estabilidad térmica del instrumento es fundamental para determinar el error sistemático asociado.

Características de los detectores: La cantidad de detectores defectuosos está relacionada con la calidad de la respuesta del instrumento.

MODIS posee requerimientos relativos a la determinación del final de vida de las distintas bandas (Refs. [53] y [54]). Se considera que una banda de MODIS se encuentra en el final de su vida cuando la respuesta de más del 25 % de los elementos detectores cae por debajo del 50 % con respecto a la respuesta de pre-lanzamiento. Conjuntamente con estos requerimientos, MODIS posee una restricción en cuanto a la cantidad de detectores muertos o fallados, siendo el número máximo igual a 1 detector por banda espectral. Por otro lado, un requerimiento importante en relación a la degradación física de los detectores se refiere al lapso de tiempo Δt transcurrido entre la calibración en tierra y el momento del lanzamiento del satélite, siendo necesario recalibrar el instrumento superado Δt .

Calibrador a bordo: Los calibradores de a bordo (*On-board Calibrators, OBC*) se utilizan para obtener chequeos periódicos de la calibración de los sensores en vuelo permitiendo evaluar modificaciones en la respuesta de estos últimos a lo largo del tiempo (Ref. [55]). Los OBC emplean fuentes artificiales (por ejemplo, cuerpos negros, lámparas, paneles difusores) o naturales (por ejemplo, el sol, la luna). El tipo de fuente seleccionada depende del rango espectral del sensor y se utiliza directamente o a través de los sistemas ópticos. La inclusión de un OBC incrementa el grado de complejidad del instrumento principalmente por motivos vinculados con el tamaño, el consumo de potencia y el esfuerzo de calibración en tierra que demandan. A continuación se presentan algunos ejemplos, tanto en sensores enfriados (ASTER, AIRS, MODIS) como en sensores no enfriados (THEMIS).

El OBC de las bandas del infrarrojo térmico en ASTER ([8.125, 11.65] μm) consiste en una superficie plana con estructura de panal de abejas utilizada como cuerpo negro cuya emisividad es superior a 0.99. El espejo empleado como sistema de apuntamiento del

subsistema infrarrojo térmico direcciona la radiación emitida por el OBC hacia los detectores (Ref. [35]). En el caso del AIRS, cuyo rango espectral cubre el rango $[3.7, 15.4] \mu\text{m}$, el OBC consiste en un cuerpo negro compuesto por dos superficies planas formando la hipotenusa y uno de los catetos de un triángulo rectángulo de modo tal que uno de los lados es observado directamente por el sistema óptico del instrumento (Refs. [34] y [56]).

El caso ideal es aquel en el cual estas fuentes son observadas de la misma manera que las adquisiciones de la Tierra de forma tal que la radiación atraviesa todo el sistema óptico y llena completamente la apertura (Ref. [21]). Tal es el caso por ejemplo de MODIS Terra y MODIS Aqua (Refs. [33], [39] y [57]). Este instrumento posee tres tipos de OBC: un difusor solar para la calibración a bordo de las bandas solares reflectivas, un cuerpo negro (BB) para la calibración de las bandas infrarrojas y un calibrador espectro-radiométrico empleado para caracterización espacial (en todas las bandas) y espectral (en las bandas solares reflectivas).

El BB de MODIS consiste en una estructura de aluminio que provee uniformidad y estabilidad en la temperatura. La superficie radiante consta de ranuras paralelas formando dientes de sierra unas con las otras. Dicha superficie se encuentra dividida en doce zonas, cada una monitoreada por un termistor ubicado en los vértices de los dientes de sierra. Los requerimientos de MODIS para la calibración radiométrica absoluta imponen la necesidad de uniformidad en la temperatura del OBC y una emisividad efectiva superior a 0.992. Por este motivo los termistores han sido calibrados de acuerdo a los estándares del *National Institute of Standards & Technology* (NIST). La superficie presenta una terminación negra anodizada que reemplaza la pintura negra reduciendo significativamente el error en el conocimiento de la temperatura superficial. El calor es provisto por calefactores redundantes hechos con láminas de kapton. Estos calefactores permiten el calentamiento de la superficie del BB de forma tal que cambios en la linealidad de los detectores del instrumento pueden ser monitoreados. La temperatura de este BB puede ser variada entre 285 K y 315 K. Una vez en vuelo, las bandas infrarrojas de MODIS combinan la utilización del BB cuya radiancia es conocida con la calibración de espacio profundo que provee el fondo térmico del instrumento obteniéndose la respuesta del sensor ante un valor de radiancia igual a cero. La combinación entre el OBC y la adquisición de espacio profundo permite establecer ganancia y offset de los detectores del instrumento. El BB es operado nominalmente a una temperatura fija de 290 K en el caso de MODIS Terra y 285 K en el caso de MODIS Aqua, computando los coeficientes de calibración lineales de las bandas infrarrojas. Periódicamente, la temperatura del BB se varía desde los 270 K a los 315 K con el objetivo de evaluar y actualizar los coeficientes no lineales

de calibración (Ref. [58]).

El hecho de que un OBC cumpla satisfactoriamente con su función es fuertemente dependiente de una caracterización y calibración rigurosas del mismo en tierra. Prosiguiendo con el BB de MODIS como ejemplo, se presentan a continuación algunas recomendaciones para garantizar el éxito del funcionamiento del mismo. Xiong et al. 2009 (Ref. [58]) recomiendan realizar mediciones *end-to-end* con el fin de validar la emisividad del BB y su incerteza con respecto a un cuerpo negro de alta calidad utilizado como fuente calibradora en tierra. La incerteza en la emisividad del BB es responsable de un error sistemático en la calibración. Además, por el mismo motivo, también es necesario caracterizar en temperatura los termistores. Los autores sugieren además realizar una caracterización de prelanzamiento en todas las configuraciones posibles del instrumento. Esto se debe a que el impacto en el control de la temperatura del BB y la estabilidad térmica de los termistores son dependientes de las configuraciones y la electrónica del instrumento. En lo referente a la elección de la temperatura nominal de operación del BB los autores recomiendan analizar cuidadosamente las contribuciones de los distintos factores intervinientes en la calidad de la calibración. Finalmente, Xiong et al. 2009 han observado que la performance de los termistores varía a pesar de haber sido exhaustivamente caracterizados con respecto a los estándares NIST. Por tal motivo, los autores sugieren la utilización conjunta de múltiples termistores para determinar la temperatura del BB. La cantidad de termistores debe basarse en el tamaño del BB y de su ambiente operacional.

En cuanto a las tecnologías de sensores no enfriados, uno de los desafíos es hallar un método de calibración de bajo consumo de potencia y de espacio físico reducido. En misiones como THEMIS (Ref. [25]), donde la calibración a bordo es necesaria por requerimientos sobre la precisión del instrumento, suele utilizarse indicadores de calibración (*calibration flags*). Se trata de un indicador móvil de cuerpo negro diseñado para irradiar la cámara durante sus frecuentes calibraciones a bordo y para proteger además los detectores de la iluminación directa del Sol cuando el instrumento se encuentra no operativo.

En el caso de misiones de menor precisión no se suele contemplar la incorporación de indicadores de calibración. En cambio, se calibra intensamente el instrumento en tierra y se aceptan las degradaciones o derivas en la respuesta del instrumento (Ref. [5]).

Caracterización de los cuerpos negros de estantería: Cuando se evalúa la posibilidad de recurrir a la utilización de ítems de estantería las normas de la ECSS (Ref. [59]) establecen que es necesario que se realice la especificación del equipamiento a utilizar y el

plan de caracterización y calificación del mismo tempranamente.

Los requerimientos del TIRS a bordo del Landsat Data Continuity Mission cubren las siguientes categorías: performance, tests de caracterización y trazabilidad acorde a los estándares del NIST. A partir del tipo de requerimientos anteriormente mencionados, en particular aquellos relacionados con la trazabilidad de los estándares NIST, fue posible definir el equipamiento necesario para ejecutar los tests de caracterización y calibración. Tal como puntualizan Irons et al. 2012 (Ref. [48]), los requerimientos del TIRS poseen un elevado nivel de exigencia en lo que respecta a las incertezas en la calibración radiométrica, por ello, la calibración del cuerpo negro utilizado en laboratorio resultó ser un aspecto clave. En su trabajo sobre la calibración de TIRS, Thome et al. 2010 (Ref. [38]) explican que la fuente de laboratorio fue calibrada en las facilidades del NIST obteniéndose su trazabilidad de acuerdo a dichos estándares. Posteriormente, se empleó este cuerpo negro para la caracterización y la calibración del instrumento en tierra, incluyendo su calibrador de a bordo lográndose de este modo una trazabilidad completa de los estándares NIST en toda la cadena radiométrica del instrumento.

Tests end-to-end: Cabe destacar que la verificación de requerimientos es un paso necesario pero no suficiente para la caracterización de un sensor y es indispensable validar la performance del mismo realizando tests *end-to-end* en los cuales se evalúe toda la cadena de procesamiento del instrumento, desde la apertura de entrada hasta la salida del detector (ver Figura 1.2a). Los tests *end-to-end* de performance relacionan la precisión de la calibración con la precisión de los productos de ciencia lográndose de este modo establecer cotas superiores para las incertezas de estos últimos. Este tipo de ensayos permite determinar cuales productos es necesario reprocesar en caso de cambios en la calibración. Una vez establecida la relación entre las incertezas de los productos de ciencia y los datos de calibración es posible generar alarmas sobre anomalías en la calibración a partir de las anomalías en los productos de ciencia.

La realización de este tipo de tests suele traer aparejada la necesidad de desarrollo de un software específico para el modelado de la respuesta radiométrica del instrumento. Un ejemplo de esto lo constituye el *End-to-End Simulation Software* desarrollado para la misión EnMAP (Ref. [60]). En este caso, el simulador del sensor provee la capacidad de verificar y validar los objetivos de ciencia y los requerimientos de la misión. El simulador end-to-end resulta una herramienta útil en el ajuste de parámetros de configuración del instrumento y en el desarrollo y validación de la calibración y de algoritmos de pre-procesamiento de datos,

así como también, generando imágenes simuladas.

Diversidad de metodologías para calibración en tierra: Xiong et al. 2003 (Ref. [47]) postulan que la calibración radiométrica de alta precisión requiere una cantidad variada de técnicas y dispositivos para su realización. Barker et al. 1994 (Ref. [53]) sugieren además realizar los ensayos de caracterización y calibración en distintas condiciones ambientales, tanto a temperatura ambiente como en termovacío, realizando mediciones en los distintos *plateaux* de temperatura y en los distintos modos operativos del instrumento. La calibración en termovacío puede realizarse contando con fuentes de cuerpo negro que puedan ser ingresadas a una cámara de termovacío, o bien, utilizando una cámara de termovacío con ventana de Ge para colocar el cuerpo negro fuera de la misma.

Los cuerpos negros capaces de operar en vacío combinan simultáneamente las performances tradicionales de fuentes infrarrojas de referencia y las características específicas que les permiten operar en vacío a temperaturas criogénicas o cercanas a la temperatura ambiente. Tal es el caso de MODIS donde la fuente calibradora es un cuerpo negro de gran apertura, con una emisividad superior a 0.9995 en la región infrarroja del espectro electromagnético (Refs. [37], [41] y [57]). Dicho cuerpo negro fue ingresado a la cámara de termovacío durante la calibración radiométrica de las bandas infrarrojas de MODIS. La misma se llevó a cabo en los *plateaux* frío, caliente y de operación nominal del instrumento, ensayando las electrónicas nominal y redundante y configurando además distintas temperaturas en los FPA del instrumento (Ref. [52]).

En el caso de THEMIS, la caracterización y la calibración radiométrica del instrumento se realizaron en termovacío, empleando un amplio rango de temperaturas operativas con el fin de identificar y resolver las anomalías detectadas en el transcurso del ensayo (Ref. [25]). Se utilizó en este caso un cuerpo negro que fue ingresado dentro de la cámara de termovacío.

En lo que respecta a caracterización y calibración radiométricas a temperatura ambiente, existen otras alternativas además de los cuerpos negros. Bower et al. 2009 (Ref. [61]) presentan un método de calibración de una cámara infrarroja empleando agua como fuente radiativa. El equipamiento consiste en un dispositivo difusor y una bomba sumergible mantenidos dentro de un baño de agua a temperatura constante. El agua es bombeada desde el recipiente con agua hacia el dispositivo difusor creando un flujo de agua hacia la superficie. La temperatura de este flujo de agua es medida por un termistor ubicado debajo de la superficie. La cámara infrarroja se monta sobre la superficie de agua de forma tal que el centro de la imagen infrarroja coincida con la posición de la superficie de agua por encima

del termistor. La calibración se obtiene registrando las intensidades de aquellos píxeles que adquieren la superficie de agua por encima del termistor. La fortaleza de este método radica en que la temperatura del fluido adquirida por la cámara es medida por el termistor de modo tal que transcurre un lapso muy pequeño de tiempo entre ambas mediciones. El método descrito se encuentra limitado por las temperaturas de evaporación y congelamiento del agua por lo cual no resulta válido para calibrar cámaras infrarrojas en temperaturas extremas. Sin embargo, para aplicaciones que requieren mediciones precisas en el rango 273 K a 373 K este método resulta eficiente y de bajo costo.

7.2.3. Recomendaciones

En este apartado se enumeran las recomendaciones que surgen del análisis presentado en las secciones anteriores. Las recomendaciones provistas se encuadran dentro del área de ingeniería en sistemas abarcando temas relacionados con el diseño del instrumento, la caracterización del equipamiento empleado para medir, la cantidad y diversidad de técnicas de medición empleadas y la necesidad de contar con un modelo radiométrico completo del instrumento.

Ingeniería en sistemas: Se recomienda la conformación temprana de un equipo de ingeniería en sistemas siendo este un pilar fundamental para el análisis temprano de requerimientos. El mismo permite evaluar aspectos decisivos en lo que respecta a la elección de la tecnología utilizada, las metodologías y el equipamiento utilizados en tierra.

Tecnología empleada: La tecnología empleada a menudo resulta de un *trade-off* entre lograr satisfacer las necesidades de ciencia del instrumento y restricciones inherentes a la misión (por ejemplo, costos, importancia relativa del instrumento en el proyecto, cronograma). La recomendación de seguir utilizando microbolómetros no enfriados tiene que ver con el hecho de lograr generar una base de conocimiento asociada a este tipo de tecnología pues la misma permite reducir tiempos a nivel cronograma y por lo tanto satisfacer necesidades científicas de corto plazo a bajo costo. Debido a que se trata de una tecnología joven, con poca herencia, es importante caracterizar intensamente el instrumento en tierra.

NETD: Se recomienda requerir al fabricante del *Radiometric Package* el desarrollo teórico de un modelo para la estimación del NETD que sea independiente del modelo utilizado para calibrar radiométricamente el instrumento. Asimismo, es deseable establecer requerimientos que especifiquen el NETD a distintas temperaturas de escena además de la típica (por ejemplo, en las temperaturas mínima y máxima observables). Es importante tener en

cuenta que la curva característica del NETD no presente extremos locales en las temperaturas de escena definidas ya que pequeños apartamientos con respecto a las mismas podrían traducirse por grandes diferencias en el NETD. También se recomienda auditar el método de verificación de los requerimientos vinculados al NETD.

Estabilidad térmica: Se recomienda la realización exhaustiva de ensayos de caracterización y calibración radiométrica del instrumento en condiciones ambientales similares a las que tendrá el satélite en órbita (tests de termovacío) empleando distintas configuraciones del instrumento (por ejemplo, configuraciones de la electrónica, los aspectos térmicos y los modos de adquisición). Asimismo, se recomienda prever la repetición de mediciones durante la etapa de caracterización y calibración radiométricas y durante ensayos de larga duración del instrumento con el fin de evaluar la estabilidad en temperatura de los datos obtenidos.

La evaluación de la estabilidad térmica es un dato relevante en lo que respecta a la planificación de las operaciones de rutina del instrumento una vez en vuelo: un instrumento de baja estabilidad requerirá ser calibrado a bordo con mayor frecuencia que uno de alta estabilidad.

Características de los detectores: Se recomienda estipular la cantidad de detectores defecuosos y el umbral por debajo del cual se los considera deficientes con el fin de poder establecer parámetros de calidad de la respuesta del instrumento.

Calibrador a bordo: Independientemente del tipo de tecnología empleada, y a pesar de que su incorporación incrementa el nivel de complejidad debido al diseño propio del OBC y a la necesidad de caracterizarlo y calibrarlo en tierra de manera exhaustiva, se recomienda contar con calibradores a bordo cuya temperatura pueda ser variada en vuelo, especialmente para computar los términos no lineales de la función de calibración radiométrica. Para ello, es necesario contemplar su implementación tempranamente en la definición de requerimientos.

Caracterización de los cuerpos negros de estantería: En caso de utilizar fuentes de calibración de estantería se recomienda realizar la especificación temprana del tipo de equipamiento y prever la ejecución de la caracterización y calificación del mismo.

Tests end-to-end: Se recomienda desarrollar un modelo radiométrico del instrumento generando imágenes simuladas realistas de forma tal que se puedan realizar ajustes en la configuración de la cámara así como también validar los resultados obtenidos durante su calibración.

Diversidad de metodologías para calibración en tierra: Se recomienda realizar la calibración en tierra en distintas condiciones ambientales, tanto a temperatura ambiente

como en termovacío.

En lo que respecta a la calibración a temperatura ambiente, se sugiere complementar la calibración empleando un cuerpo negro con el método de calibración con agua (Ref. [61]): por ser eficiente y de bajo costo.

En lo relativo a la calibrar en termovacío, se recomienda prever la adquisición de fuentes de cuerpo negro que sean aptas para operar en vacío.

Cualesquiera sean los métodos empleados para caracterizar y calibrar radiométricamente una cámara infrarroja, es recomendable tener prevista en el cronograma la repetición de las mediciones.

Se sugiere además realizar las mediciones en los distintos modos operativos que serán utilizados en vuelo, adquiriendo datos durante distintos intervalos de tiempo considerando los casos extremos de adquisiciones muy cortas y muy largas, así como también de duración nominal.

Capítulo 8

Conclusiones

En esta tesis se presentó la calibración radiométrica de pre-lanzamiento de la cámara infrarroja NIRST, uno de los ocho instrumentos a bordo de la misión SAC-D/Aquarius puesta en órbita el 10 de junio de 2011. El trabajo realizado y los resultados principales obtenidos han sido presentados por Ganopol et al. 2013 (Ref. [19]) y Ganopol & Marraco 2014 (Ref. [20]).

La cámara infrarroja NIRST representa un desafío tecnológico para la CONAE pues se trata del primer instrumento espacial a bordo de una misión argentina en utilizar la tecnología de microbolómetros no enfriados. El aporte original de esta tesis radica en que es la primera vez que se lleva a cabo la calibración radiométrica de una cámara infrarroja de estas características para una misión espacial de la CONAE.

En la Sección 8.1 se brinda un resumen de los temas principales abordados en cada capítulo. En la Sección 8.2 se comentan los resultados más relevantes obtenidos.

8.1. Resumen del trabajo realizado

En el Capítulo 1 se brindó una descripción detallada del instrumento. NIRST está compuesta por una cámara en el infrarrojo medio (MWIR) y otra en el infrarrojo térmico (LWIR), cada una con 3 arreglos de 512 microbolómetros. Los tres arreglos de la cámara MWIR operan en la banda de $3.8 \mu\text{m}$ mientras que en el caso de la cámara LWIR, los arreglos 1 y 2 operan en la banda de $10.85 \mu\text{m}$ y el arreglo 3 opera en $11.85 \mu\text{m}$. NIRST además cuenta con un espejo móvil de berilio con el fin de reducir el período de revisita del instrumento.

En el Capítulo 2 se brindó el marco físico basado en la ley de Planck y el enfoque matemático basado en ajustes de polinomios para las calibraciones absoluta y relativa. Tam-

bién se presentó el enfoque empleado para la caracterización radiométrica de la respuesta del espejo.

La calibración absoluta del instrumento se realizó mediante ajustes polinomiales relacionando la temperatura sensada y la potencia recibida por los detectores con las cuentas digitales (Ecuaciones 2.3 y 2.4). La calibración relativa consistió en ajustar polinomios relacionando las cuentas medidas en cada uno de los microbolómetros de un dado arreglo con respecto a un detector de referencia dentro del mismo arreglo (Ecuación 2.5). También se caracterizó la respuesta del espejo en función del ángulo de apuntamiento (RVS) del mismo mediante la utilización de la Ecuación 2.6 tomando como referencia el apuntamiento nadiral, $\beta = 45^\circ$.

El Capítulo 3 proveyó el marco experimental de la calibración de pre-lanzamiento. La adquisición de datos se llevó a cabo en una sala limpia Clase 100.000, iluminando los microbolómetros con fuentes de cuerpo negro configuradas a distintas temperaturas correspondientes a los rangos operativos de cada cámara y seleccionando 3 ángulos de apuntamiento del espejo, $\beta = \{30^\circ, 45^\circ, 60^\circ\}$.

En el Capítulo 4 se estudió primeramente el rango dinámico Δ_{DN} de los microbolómetros de cada arreglo y a continuación se realizaron los ajustes polinomiales en temperatura y potencia para los datos obtenidos con el apuntamiento $\beta = 45^\circ$. Se analizaron los residuos obtenidos en dichos ajustes y se estableció el criterio de selección del grado \mathcal{O} más conveniente para los mismos.

En el Capítulo 5 se estudió la calibración relativa del instrumento. La misma se llevó a cabo para un ángulo de apuntamiento $\beta = 45^\circ$, obteniéndose un conjunto de coeficientes de calibración radiométrica relativa para cada píxel de cada arreglo de microbolómetros. Se establecieron criterios para la elección del píxel de referencia y para la determinación del grado del polinomio más adecuado.

En el Capítulo 6 se presentó la caracterización de la respuesta en función del ángulo de apuntamiento del espejo de Be para $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$ con respecto al ángulo de referencia $\beta = 45^\circ$ correspondiente al apuntamiento nadiral. Se estudió el grado del polinomio más adecuado para describir la RVS y se estudiaron los coeficientes de dicho ajuste en cada uno de los arreglos.

En el Capítulo 7 se presentaron las perspectivas de trabajo a futuro y algunas recomendaciones basadas en lecciones aprendidas en el transcurso del desarrollo de esta tesis.

8.2. Comentarios sobre los resultados obtenidos

El análisis de Δ_{DN} en las cámaras MWIR y LWIR reveló una **diferencia intrínseca existente entre píxeles pares e impares**, siendo el rango dinámico de estos últimos mayor al de los primeros. Esta diferencia puso en evidencia un alto grado de **no uniformidad en la sensibilidad de los píxeles que conforman cada arreglo**.

El estudio de Δ_{DN} reveló además la **existencia de píxeles atípicos**, a saber: píxeles *no-standard*, cuyo rango dinámico se encuentra muy por encima o muy por debajo que el del resto de los píxeles; píxeles *anómalos*, cuyo rango dinámico es negativo; píxeles *muertos*, cuyo rango dinámico es cero. Se observó que, mientras que los píxeles *no-standard* pueden ser pares o impares, independientemente del arreglo considerado, en todos los casos, los píxeles *anómalos* son pares, mientras que los *muertos* son impares, pudiendo esto último atribuirse entonces al proceso fabricación de los *Radiometric Packages*.

Por otro lado, en base al estudio de los residuos obtenidos en los ajustes correspondientes a las funciones de calibración radiométrica absoluta en temperatura y potencia y a los criterios de selección establecidos se definió la utilización de polinomios de grado $\mathcal{O} = 4$ **en el caso de la banda de $3.8 \mu\text{m}$** , $\mathcal{O} = 8$ **en el caso de la banda de $10.85 \mu\text{m}$** y $\mathcal{O} = 6$ **en el caso de $11.85 \mu\text{m}$** (Ref. [19]). En todos los casos, los grados de los polinomios de calibración absoluta resultaron ser considerablemente más elevados que lo habitual en instrumentos infrarrojos a bordo de otras misiones espaciales.

La no linealidad de los microbolómetros puede deberse a una característica intrínseca de los mismos, o bien a la existencia de otros parámetros físicos que no hayan sido debidamente capturados por las "Funciones de Calibración Radiométrica Absoluta" de temperatura y potencia. En el marco de la calibración en laboratorio, se descartó la existencia de una magnitud física que permita explicar el comportamiento alineal de los microbolómetros, por lo tanto, **la no linealidad sería una propiedad intrínseca de los detectores**.

En lo que respecta a la elección del **píxel de referencia** para realizar la calibración relativa de cada arreglo, el análisis realizado conduce a la elección presentada en la Tabla 5.1, contemplando la **utilización de un píxel par y uno impar por cada línea de cada cámara** (Ref. [19]).

La determinación del grado del polinomio de calibración relativa en cada arreglo se realizó estudiando los residuos de los ajustes empleando los píxeles de referencia establecidos anteriormente. Se consideraron cuatro representaciones descriptas mediante los escenarios

$\{\text{Todos-Par}, \text{Todos-Impar}, \text{Par-Par}, \text{Impar-Impar}\}$ que proveen información con respecto al efecto de *stripping* presente en cada arreglo. En base al estudio de los residuos en los distintos escenarios se concluyó que los grados de los polinomios de calibración relativa que minimizan el *stripping* son $\mathcal{O} = 4$ **para la banda de $3.8 \mu\text{m}$** y $\mathcal{O} = 8$ **en las bandas de $10.85 \mu\text{m}$ y $11.85 \mu\text{m}$** . Nuevamente, los grados obtenidos son considerablemente mayores que lo habitual en instrumentos infrarrojos a bordo de otras misiones espaciales confirmando la no linealidad entre microbolómetros de una misma línea. Los arreglos de una misma banda exhiben tendencias semejantes en los residuos indicando esto que se trata de una característica propia de la fabricación de los arreglos e independiente píxel de referencia que se tome (Ref. [19]).

En los cuatro escenarios, $\{\text{Todos-Par}, \text{Todos-Impar}, \text{Par-Par}, \text{Impar-Impar}\}$, y en los distintos arreglos se observa que **el *stripping* es menor en temperaturas más elevadas**. Además, **los mejores casos de ecualización se obtienen en las configuraciones *Impar-Impar*** mientras que no existe una diferencia apreciable entre las ecualizaciones de los escenarios *Todos-Par* y *Todos-Impar*. Esto último se atribuye al efecto causado por los píxeles pares cuya ecualización pobre puede observarse en forma aislada del resto en la configuración *Par-Par*. Lo anterior permite deducir que **la mayor contribución al *stripping* proviene de las características de los píxeles pares** (Ref. [19]).

Es interesante observar que, aunque el contraste *Par-Impar* está presente en todos los arreglos, la morfología de las distribuciones de las respuestas de los microbolómetros luego de la ecualización difiere de un arreglo a otro. El análisis individual de cada escenario prueba que **la contribución de los píxeles pares conduce a las distintas características observadas en la ecualización**, mientras que en el único escenario donde no hay píxeles pares presentes (*Impar-Impar*), las tendencias son similares en todos los arreglos. Este es un resultado interesante a tener en cuenta durante la etapa de diseño del *Radiometric Package* (Ref. [19]).

La definición sobre cuál será la línea operativa en cada banda se toma en base a la información obtenida en distintas instancias durante la etapa de integración y tests del instrumento y del satélite. La primera instancia de evaluación de las líneas operativas tuvo lugar durante la etapa de calibración radiométrica del instrumento.

El análisis de la cantidad de píxeles *atípicos* en la cámara MWIR indica que es conveniente seleccionar como nominal el arreglo MWIR2 debido a que no posee píxeles ni *anómalos* (como MWIR3) ni *muertos* y se encuentra más próximo al eje óptico que el arreglo MWIR1. En

el caso de la banda de $10.85 \mu\text{m}$ la selección natural más conveniente es el arreglo LWIR2 ya que, a diferencia de LWIR1, no posee píxeles ni *anómalos* ni *muertos*, además de contar con la ventaja de encontrarse más próximo al eje óptico de la cámara LWIR. En el caso de la banda de $11.85 \mu\text{m}$, la única elección posible es LWIR3 pues esta banda no posee redundancias.

Además, el estudio de los residuos obtenidos en las calibraciones absoluta y relativa mostró un comportamiento similar en la dependencia de los mismos con el grado del polinomio. Es decir, no hay un arreglo cuyas funciones de calibración absoluta y relativa se ajusten mediante un polinomio de grado menor que en otro arreglo de la misma banda.

Teniendo en cuenta lo enunciado anteriormente, **se decidió que las líneas operativas nominales sean {MWIR2, LWIR2, LWIR3}**.

En función del análisis realizado en cuanto a la caracterización de la respuesta del espejo en función del ángulo de apuntamiento, se concluyó que **la RVS en cada ángulo de apuntamiento se ajuste mediante una función lineal por cada arreglo de microbolómetros** (Refs. [19] y [20]).

El análisis de la pendiente y ordenada al origen resultantes de los ajustes lineales para $\beta = 30^\circ$ y $\beta = 60^\circ$ en cada arreglo reveló una **dependencia en la RVS con la ubicación de los microbolómetros** en cada arreglo. Un análisis cualitativo **atribuye este resultado a la existencia de un gradiente de temperatura en la superficie de los cuerpos negros combinada con el método de adquisición de datos empleado**. Tal como se mencionó en la Sección 3.4, las fuentes de cuerpo negro empleadas no fueron caracterizadas previa utilización de las mismas. La falta de uniformidad en temperatura detectada en las superficies emisoras de dichas fuentes quedó enmascarada por los resultados obtenidos en las calibraciones absoluta y relativa de los detectores debido a que las diferencias de temperatura observadas entre píxeles son mayores al gradiente de temperatura descubierto durante el análisis de la RVS del espejo resultante de comparar la respuesta de un mismo píxel a una dada temperatura y a distintos ángulos de apuntamiento (Ref. [20]).

Las perspectivas de **trabajo a futuro** surgen motivadas principalmente por ciertos aspectos relacionados con el diseño del instrumento y la factibilidad de testeo en tierra. Las diferencias en la uniformidad de la sensibilidad de microbolómetros pares e impares y la no linealidad de los mismos tornan necesario un **esfuerzo prolongado de caracterización radiométrica del instrumento**. Debido a la imposibilidad técnica y programática de llevar a cabo un plan de caracterización y calibración de pre lanzamiento más extenso se delinea-

ron actividades a realizar **durante las etapas de Commissioning y de operaciones de rutina** del instrumento.

Se realizaron recomendaciones dirigidas a algunas de las cámaras infrarrojas que se proyecta tener en la CONAE. Estas **sugerencias giran entorno a** un tema central: **la ingeniería en sistemas**, focalizándose en aspectos vinculados con **el diseño del instrumento, la caracterización del equipamiento empleado para medir, la diversidad de técnicas de medición, la factibilidad de repetición de las mediciones y la necesidad de contar con un modelo radiométrico completo del instrumento.**

Bibliografía

- [1] Suárez M. & Tieu B., *Aquarius/SAC-D Mission Plan*, CONAE Document, **AS-213-0097**, (2009).
- [2] *Plan Espacial Nacional*, Argentina en el Espacio, (2008).
- [3] Rogalski A., *Infrared detectors: an overview*, Infrared Physics & Technology, **Vol. 43**, 187-210, (2002)
- [4] Walker L. & Spencer D., *R3: Thermal Imaging and Rapid Feature Detection for Small Satellites*, 8th Responsive Space Conference, AIAA, **RS8-2010-3002**, (2010)
- [5] Oelrich B. D., Crastes A., Underwood C. I. & Mackin S., *A low-cost mid-wave IR microsatellite imager concept based on uncooled technology*, University of Surrey, **CI04-493**, 1-10, (2004)
- [6] Tsao H. R., Maschhoff K. R. & Watson W., *A Space Instrument Application Of An Uncooled Infrared Microbolometer Array*, IEEE, 165-172, (2000)
- [7] Bhan R. K., Saxena R. S., Jalwania C. R. & Lomash S. K., *Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their characterization techniques*, Defence Science Journal, **Vol. 59, No. 6**, 580-589, (2009)
- [8] García Blanco S., Pope T., Côté P., Leclerc M., Ngo Phong L. & Chateaufneuf F., *Radio-metric packaging of uncooled bolometric infrared focal plane arrays*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, **7206**, (2009)
- [9] Marraco H. & Ngo Phong L., *NIRST: a satellite-based IR instrument for fire and sea surface temperature measurement*, Non Intrusive Inspection Technologies, Proc. SPIE, **6213**, 1-2, (2006)

- [10] Châteauneuf F., Marchese L., Coté P., Leclerc M., Chevalier C., Marraco H. & Ngo Phong L., *Test campaign results for the engineering model of the SAC-D/NIRST radiometer*, Proceedings of the 7th International Conference on Space Optics, ICSO, Toulouse, France 2008)
- [11] Gauvin J., Chateauneuf F., Marchese L., Coté P., Leclerc M., Chevalier C., Marraco H. & Ngo Phong L., *Design of the SAC-D NIRST camera module*, Proc. SPIE, {bf 6678, 14-24, (2009)
- [12] Lombardo V., Merucci L., Buongiorno M.F., *Wavelength influence in sub-pixel temperature retrieval using the dual-band technique*, Annals of Geophysics, **Vol. 49, No. 1**, 227-234, (2006)
- [13] Musacchio M., Silvestri M., Merucci L., Corradini S., Spinetti C., Lombardo V., Behncke B., Guerrieri L., Gangale G., Buongiorno F., Perelli S., Teggi S., Pugnaghi S., Amodio A., Sansosti E., Zoffoli S. & Cardaci C., *Generation of Added Values Products Supporting Risk Analysis*, Risk Management in Environment, Production and Economy, **Chap 3**, 47-75, (2011)
- [14] Peli T., Monsen P., Stahl R., Pauli M. & McCamey K., *Signal Processing Improvements for Infrared Missile Warning Sensors*, Aerospace and Electronics Conference, NAECON 1997., Proceedings of the IEEE, 1052-1064 (1997)
- [15] Jiang G.M., Zhou W. & Liu R., *Development of Split-Window Algorithm for Land Surface Temperature Estimation From the VIRR/FY-3A Measurements*, IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters, **Vol. 10, NO. 4**, 952-956, (2013)
- [16] Wan Z. & Dozier J., *A Generalized Split- Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space*, IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing, **Vol. 34,NO. 4**, 892-905, (1996)
- [17] Niclos R., Caselles V., Croll C. & Valor E. *Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation*, Remote Sensing for Environment, **Vol. 111**, 107-121, (2007)
- [18] Li X., Pichel W., Maturi E., Clemente-Colón P., Sapper J., *Deriving the operational non-linear multichannel sea surface temperature algorithm coefficients for NOAA-15 AVHRR/3*, International Journal Of Remote Sensing, **Vol. 22, No. 4**, 699704, (2001)
- [19] Ganopol A., Marchese L. & Marraco H., *First approach for on-ground radiometric characterization of the new infrared sensor technology camera*, Journal of Applied Remote Sensing, SPIE, *Vol. 7*, 1-20, (2013)

- [20] Ganopol A. & Marraco H., *NIRST mirror on ground characterization*, Journal of Applied Remote Sensing, SPIE, (2014), enviado.
- [21] Dinguirard M & Slater P.N., *Calibration of Space-Multispectral Imaging Sensors: A review*, Remote Sens. Environ, **Vol. 68**, 194-205, (1999)
- [22] Teillet, P. M., Slater, P. N., Ding, Y., Santer, R. P., Jackson, R. D.,& Moran, M. S. *Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight*, Remote Sensing of Environment, **31**, 105120,(1990)
- [23] Daniels A., *Field guide to infrared systems, detectors and FPAs* 2nd edition, SPIE Field Guides, Volume GFIS, 1-173, 2010
- [24] Cao C. & Heidinger A., *Inter-comparison of the longwave infrared channels of MODIS and AVHRR/NOAA-16 using simultaneous nadir observations at orbit intersections*, Earth Observing Systems VII, Proceeding of SPIE, **Vol. 4814**, (2002)
- [25] Christensen P.R., *Calibration report for the Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the 2011 MARS Odyssey Mission*, Rev 0.98, (2002)
- [26] Murphy-Morris J. & Wack E., *Prelaunch instrument calibration in the real world: The GOES example*, Adv. Space Res., **Vol 32, No. 11**, 2113-2122, (2003)
- [27] Bruegge C.J., Duval B.G., Chrien N.L., Korechoff R.P., Gatley B.J. & Hochberg E.B, *MISR prelaunch instrument calibration and characterization results*, IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, (1998)
- [28] Bruegge C., Chrien N. & Haner D., *A Spectralon BRF data base for MISR calibration applications*, Remote Sensing of Environment, **Vol. 77**, 354-366, (2001)
- [29] Corsini G., Diani M. & Walzel T., *Stripping removal in MOS-B data*, IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, **Vol. 38, No. 3**, 1439-1446, (2000)
- [30] Carfantan H. & Idier J., *Statistical linear destripping of Satellite-based Pushbroom-type images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **Vol. 48, No. 4**, 1860-1871, (2009)
- [31] Ponzoni F.J. & Carneiro Albuquerque B.F., *Pre-launch absolute calibration of CCD/CBERS-2B sensor*, Sensors, **Vol. 8**, 6557-6565, (2008)

- [32] Xiong X., Salomonson V., Chiang K., Wu A., Guenther B. & Barnes W., *On-orbit Characterization of RVS for MODIS Thermal Emissive Bands*, Passive Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds IV, Proceeding of the SPIE, **Vol. 5652**, 210-218, (2004)
- [33] Qu J. J., Gao W., Kafatos M., Murphy R. & Salomonson V. V., *Earth Science Satellite Remote Sensing, Data, Computational Processing, and Tools*, **Vol. 2**, Springer, 1-356,(2006)
- [34] Pagano T.S., Aumann H.H., Hagan D.E. & Overoye K., *Prelaunch and In-Flight Radiometric Calibration of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **Vol. 41, No. 2**, 265-273, (2003)
- [35] Thome K., Arai K., Hook S, Kieffer H., Lang H., Matsunaga T., Ono A., Palluconi F., Sakuma H., Slater P., Takashima T., Tonooka H., Tsuchida S., Welch R.M. & Zalewski E., *ASTER preflight and inflight calibration and the validation of level 2 products*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **Vol. 36, No. 4**, 1161-1172, (1998)
- [36] Thome K., Markham B., Barker J., Slater P. & Biggar S., *Radiometric Calibration of Landsat*, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, **Vol. 63, No. 7**, 853-858, (1997)
- [37] Xiong X. & Barnes W., *An Overview of MODIS Radiometric Calibration and Characterization*, Advances in Atmospheric Sciences, **Vol. 23, No. 1**, 69-79, (2006)
- [38] Thome K., Reuter D., Richardson C. & Smith R., *Calibration of the Thermal Infrared Sensor on the Landsat Data Continuity Mission* Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International, 1660-1663, (2010)
- [39] Xiong X., Chiang K., Chen N., Xiong S., Barnes W. L. & Guenther B., *Results and Lessons from MODIS Thermal Emissive Bands Calibration: Pre-launch to On-orbit*, Proceeding of the SPIE, **Vol. 6296**, 1-12, (2006)
- [40] Irwin A., Oleson J. & Robinson R., *MIRAGE: calibration radiometry system*, Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing, **Vol. 4027**, 271-277, (2000)
- [41] Xiong J., Toller G., Sun J., Wenny B., Angal A. & Barnes W., *MODIS Level 1B Algorithm Theoretical Basis Document*, National Aeronautics and Space Administration document **Version 4**, 1-43, (2013)

- [42] Chatterjee S. & Hadi A. S., *Influential observations, High leverage points and Outliers in linear regression*, Statistical Science, **Vol. 1, No. 3**, 379-393, (1986)
- [43] D. Oberhettinger, Jet Propulsion Laboratory, *Schedule a Lessons Learned Debriefing at Each Major Project Milestone*, Public Lessons Learned, NASA Engineering Network, **Lesson Number 3536**, 1-3, (2010/08/17)
- [44] ECSS Secretariat, ESA Requirements and Standards Division, *Cost and Schedule Management*, Space Project Management, **ECSS-M-ST-60C**, 1-85, (31 July 2008)
- [45] ECSS Secretariat, ESA Requirements and Standards Division, *System Engineering General Requirements*, System Engineering, **ECSS-E-ST-10C**, 1-100, (6 March 2009)
- [46] ECSS Secretariat, ESA Requirements and Standards Division, *Technical Requirements Specification*, System Engineering, **ECSS-E-ST-10-06C**, 1-31, (6 March 2009)
- [47] Xiong X., Barnes W. L., Guenther B. & Murphy R. E., *Lessons Learned from MODIS*, Advanced Space Res., **32, No 11**, 2107-2112, (2003)
- [48] Irons J. R., Dwyer J. L. & Barsi J. A., *The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission*, Remote Sensing of Environment , **Vol. 122**, 11-21, (2012)
- [49] Tsujino Y., *An approach for the performance analysis of an uncooled infrared bolometer imager*, Infrared Physics & Technology, **Vol. 53, NO. 1**, 50-60, (2010)
- [50] Niklaus F., Decharat A., Jansson C & Stemme G., *Performance model for uncooled infrared bolometer arrays and performance predictions of bolometers operating at atmospheric pressure*, Infrared Physics & Technology, **Vol. 51**, 168-177, (2008)
- [51] Gopal V., *Noise equivalent temperature difference performance of an IR detector in a hybrid focal plane array*, Infrared Physics & Technology, **Vol. 36**, 937-948, (1995)
- [52] Xiong X., Wenny B. N., & Barnes W. L., *Overview of NASA Earth Observing Systems Terra and Aqua moderate resolution imaging spectroradiometer instrument calibration algorithms and on-orbit performance*, Journal of Applied Remote Sensing, SPIE, **Vol. 3**, 1-25, (2009)

- [53] Barker J. L., Harnden J. M. K., Montgomery H., Anuta P, Kvaran G., Knight E., Bryant T., McKay A., Smid J. & Knowles D., *MODIS Level 1 Geolocation, Characterization and Calibration Algorithm Theoretical Basis Document*, National Aeronautics and Space Administration document, **Vol. 2**, 1-196, (1994)
- [54] Goddard Space Flight Center, *Specification for the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, **422-20-02, Revision A**, March 24 1993
- [55] Slater P. N. & Biggar S. F., *Suggestions for Radiometric Calibration Coefficient Generation*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, **Vol. 13**, 376-382, (1995)
- [56] Pagano T. S., Aumann H. H. & Weiler M., *Lessons learned from the AIRS pre-flight radiometric calibration*, Earth Observing Systems XVIII, Proc. SPIE, **Vol. 8866**, 1-12,(2013)
- [57] Guenther B., Barnes W., Knight E., Barker J., Harnden J., Weber R., Roberto M., Godden G., Montgomery H. & Abel P., *MODIS Calibration: A brief review of the strategy of the at-launch calibration approach*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, **Vol. 13**, 274-286, (1996)
- [58] Xiong X., Wenny B. N., Wu A. & Barnes W. L., *MODIS Onboard Blackbody Function and Performance*, IEEE Transactions Geoscience And Remote Sensing, **Vol. 47, NO. 12**, 4210-4222, (2009)
- [59] ECSS Secretariat, ESA-ESTEC Requirements and Standards Division, *Off-the-shelf items utilization in space systems*, Space product assurance, **ECSS-Q-ST-10C**, 1-35, (8 October 2010)
- [60] Segl K., Guanter L., Rogass C. & Kaufmann H., *EETES: AN END-TO-END IMAGE SIMULATION TOOL FOR THE ENMAP MISSION*, EARSel 7th SIG-Imaging Spectroscopy Workshop, Proceedings, **Vol. 11, NO. 4**, 1-6, (2011)
- [61] Bower S. M., Kou J. & Saylor J. R., *A method for the temperature calibration of an infrared camera using water as a radiative source*, Review of Scientific Instruments, **Vol. 80**, 1-7, (2009)
- [62] Sidi M., *Spacecraft Dynamics and Control - A practical engineering approach*, Cambridge Aerospace Series, Cambridge University Press, (1997)

- [63] Wertz J.R., *Spacecraft Attitude Determination and Control*, Kluwer Academic Publishers, (1978)
- [64] *Fundamentals of remote sensing*, Canada Center for Remote Sensing, 1-258

Apéndice A

Misión SAC-D/Aquarius

Este capítulo presenta un panorama general de la Misión SAC-D/Aquarius. La Sección A.1 provee una descripción sobre la órbita de la misma para posteriormente presentar las distintas etapas que atraviesa el satélite luego del lanzamiento (Sección A.2). En la Sección A.3 se detalla la misión a nivel sistemas. Se describen en particular los elementos que componen el Segmento de Vuelo, a saber, la Plataforma de Servicios del satélite y los instrumentos de ciencia que van montados sobre la misma. Se brinda también información sobre el Lanzador y el Segmento Terreno.

A.1. Órbita de la Misión SAC-D/Aquarius

Con el objetivo de cumplir con los requerimientos de ciencia, la órbita seleccionada para la Misión SAC-D es de tipo helio-sincrónica, cuya altitud es 657 km y cuyas propiedades más relevantes se listan a continuación:

- Se trata de una órbita cuyo período es de 7 días, realizando 103 revoluciones, i.e., un promedio de 14.7 revoluciones por día alrededor de la Tierra con un período de 98 minutos.
- Provee un cubrimiento global del planeta al cabo de 7 días, brindando 4 revisitas para pasadas ascendentes y descendentes en menos de 30 días.
- Posee un Nodo Ascendente a las 6 PM, elegido para maximizar la pisada en sombra y tener mayor cobertura sobre el Artico que en la Antártida.

- Se trata de una órbita de tipo congelada, i.e., de excentricidad y perigeo fijos. Este tipo de órbita tiene la propiedad de minimizar la pisada en tierra y las variaciones de altitud para una dada latitud geográfica.

Debido a los cambios relativos de posición del Sol con respecto al plano orbital, existen períodos de eclipse. Los mismos tienen lugar en el Hemisferio Sur aproximadamente desde mediados de Mayo hasta mediados de Agosto y su duración máxima es de entre 19 y 20 minutos.

A.2. Fases de la misión

Una vez puesta en órbita, la Misión atraviesa las etapas de Lanzamiento y Primeras Orbitas, Commissioning, Operaciones Nominales y Final de Vida. A continuación se provee una breve descripción de cada una.

- **Etapas de Lanzamiento y Primeras Orbitas:**

La Etapa de Lanzamiento y Primeras Orbitas, también conocida como LEOP (del inglés *Launch and Early Orbits Phase*) incluye el lanzamiento propiamente dicho, ascenso, separación de la cofia, secuencia inicial del satélite durante la cual se encienden las cargas esenciales necesarias para su funcionamiento y se despliegan los paneles solares. Esta etapa contempla además el chequeo inicial de los subsistemas de la Plataforma de Servicios durante un lapso de unos 3 a 5 días.

- **Etapas de Commissioning:**

Esta fase incluye la evaluación, caracterización y puesta a punto de los subsistemas de la Plataforma de Servicios y de los instrumentos, así como también la adquisición final de la órbita operativa realizando maniobras de propulsión. Comienza al final de la etapa de LEOP y finaliza una vez que el Observatorio ha sido puesto a punto, en condiciones de operar nominalmente.

- **Etapas de Operaciones Nominales:**

Esta etapa está destinada a la generación de datos de ciencia, configurando los instrumentos en sus modos operativos de adquisición, transfiriendo sus datos al segmento terreno, procesándolos y distribuyéndolos a los usuarios finales de los mismos. Esta fase comienza al final de la etapa de commissioning y termina cuando el satélite llega al final

de su vida (*End Of Life*, EOL). Con el propósito de cumplir con los requerimientos de ciencia de la misión, en esta fase se realizan regularmente maniobras de mantenimiento de órbita y maniobras de calibración, conocidas como *Cold Sky Calibration* en las cuales se rota el satélite de forma tal que algunos instrumentos realicen adquisiciones del espacio profundo cuya temperatura es conocida.

- **Final de Vida:**

Esta etapa, también conocida como EOL (del inglés, *End Of Life*) concluye las operaciones de ciencia del satélite, apagando todos los instrumentos. Se realizan maniobras de descenso de altitud utilizando el combustible restante, asegurando el re-ingreso dentro de la atmósfera terrestre en un lapso menor a 25 años.

A.3. Descripción de la Misión a nivel sistemas

Los sistemas requeridos para llevar a cabo la misión SAC-D/Aquarius incluyen el Lanzador, el Segmento de Vuelo y el Segmento Terreno. A continuación se provee una breve descripción de cada uno.

A.3.1. Segmento de Vuelo

El Observatorio SAC-D/Aquarius es un satélite científico de órbita baja (LEO, del inglés, Low Earth Orbit), orientado hacia la Tierra, estabilizado en tres ejes, de momento cero (ver Refs [62], [63]). Consta de una Plataforma de Servicios y ocho instrumentos de ciencia montados sobre la misma. La Figura A.1 muestra el Segmento de Vuelo y su sistema de referencia definido como sigue: el eje $+x$ (roll) corresponde a la dirección de vuelo, el eje $+y$ (pitch) apunta en el sentido contrario a la normal a la órbita y el eje $+z$ (yaw) está orientado en la dirección nadiral. Puede apreciarse que el instrumento Aquarius se encuentra montado sobre la tapa superior $+y$ mientras que en las cubiertas $+x$ y $-x$ próximas a la tapa inferior $-y$ se encuentran dos bisagras diametralmente opuestas que soportan las alas del panel solar¹. Las mismas miden 2 metros de alto por 2.15 metros de ancho. La masa total del satélite al momento del lanzamiento, incluyendo el combustible, fue de 1675 kg.

¹Nótese que la radiación solar proviene del lado $-y$ del satélite.

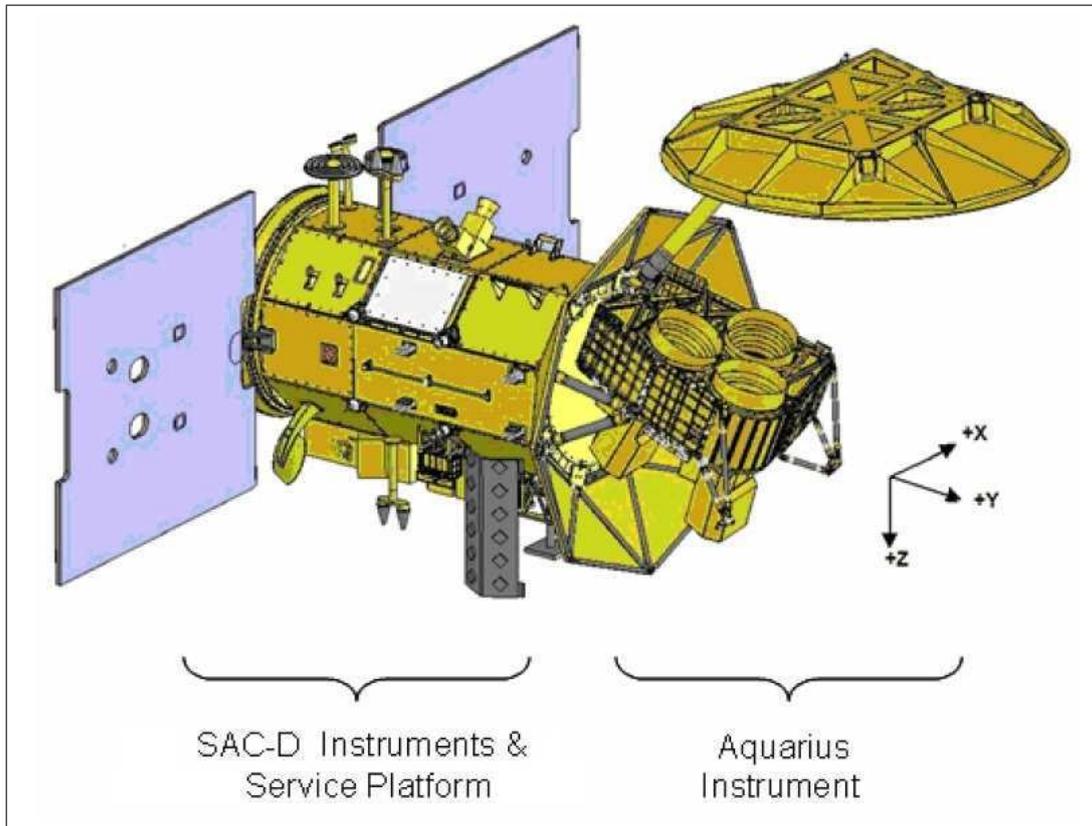


Figura A.1: El Observatorio SAC-D/Aquarius (Ref. [1]). Puede apreciarse el sistema de referencia en donde el eje $+x$ (roll) corresponde a la dirección de vuelo, el eje $+y$ (pitch) apunta en el sentido contrario a la normal a la órbita y el eje $+z$ (yaw) esta orientado en la dirección nadiral.

Plataforma de Servicios (*Service Platform, SP*)

La Plataforma de Servicios del SAC-D/Aquarius está compuesta por los subsistemas de Estructura, Control de Actitud y Orbita, Propulsión, Potencia, Térmico, Gestión de Comandos y Datos, Comunicaciones y Memoria Masiva.

- **Subsistema de Estructura:**

La función principal del subsistema de Estructura es proveer el soporte mecánico para las distintas cajas y cargas útiles del satélite. La Plataforma de Servicios posee una estructura octogonal y alberga la mayor parte de las cajas de los subsistemas en su interior, mientras que las caras externas llevan montados los instrumentos científicos, con excepción del Aquarius cuya ubicación corresponde a la parte superior de la estructura

(tapa $+y$).

- **Subsistema de Control de Actitud y Órbita** (*Attitude and Orbit Control Subsystem, AOCS*):

AOCS es el subsistema responsable de determinar y controlar la actitud del satélite manteniendo el apuntamiento dentro de los valores requeridos para poder cumplir con los objetivos de los distintos instrumentos. Para realizar la determinación y control de actitud el subsistema cuenta con un conjunto de sensores (sensores solares gruesos, magnetómetros tri-axiales, giróscopos, *star trackers*) y actuadores (ruedas de inercia, barras de torque, toberas). El subsistema realiza además la determinación y control de órbita utilizando información del GPS a bordo y un propagador orbital. La información brindada por AOCS es fundamental para evaluar cuándo son necesarias las maniobras de mantenimiento de órbita.

- **Subsistema de Propulsión:**

El subsistema de Propulsión está concebido para ejecutar las maniobras de propulsión necesarias para corregir errores de inyección que impactan en la altitud y la inclinación del plano orbital. Estos errores de inyección se corrigen durante la etapa de Commissioning (ver Sección A.2). Este subsistema también es utilizado para realizar las maniobras de mantenimiento de órbita durante la fase de Operaciones nominales y evasión de chatarra espacial en casos de contingencia. Finalmente, será utilizado cuando el satélite llegue a la etapa de EOL para realizar las maniobras de descenso de altitud.

- **Subsistema de Potencia** (*Power Control Subsystem, PCS*):

PCS es responsable de distribuir y regular la potencia del satélite a lo largo de toda la vida de la misión. Los paneles solares proveen toda la potencia necesaria al Observatorio, mientras que la batería se encarga de dicha tarea durante los períodos de eclipse o durante las maniobras que implican un desapuntamiento de los paneles solares al Sol.

- **Subsistema de Control Térmico** (*Thermal Control Subsystem, TCS*):

TCS tiene el rol de mantener la SP y sus subsistemas y equipamiento dentro del rango operativo de temperaturas especificado. El subsistema realiza un control pasivo mediante superficies radiadoras, mantas térmicas, productos aislantes, juntas térmicas y

pinturas. Asimismo, realiza un control activo mediante calentadores eléctricos (*heaters*), sensores de temperatura (PT2000) y termostatos.

- **Subsistema *Command & Data Handling* (CDH):**

El subsistema CDH monitorea el estado del satélite, actúa como decodificador de los comandos de tierra y distribuidor de los mismos a las distintas cargas. Provee el procesamiento y almacenamiento de los comandos subidos a bordo, recolecta y procesa la telemetría, provee protección autónoma ante fallas y se comunica con los distintos subsistemas a través de una interfaz 1553.

- **Subsistema de Comunicaciones:**

El subsistema de Comunicaciones consiste en tres canales de comunicación: *Uplink* de Banda S, *Downlink* de Banda S y *Downlink* de Banda X. Estos canales a su vez se dividen en canales de Telemetría y Telecomandos (Banda S) y Bajada de Datos de Telemetría de Tiempo Real y Almacenada (Banda X). El primero provee la comunicación entre el satélite y el Segmento Terreno (ver Sección A.3.3) para monitoreo y control del Observatorio a lo largo de las distintas fases operativas. El segundo provee la comunicación entre el subsistema de Memoria Masiva y el Segmento Terreno con el fin de asegurar la bajada de datos de los instrumentos de ciencia.

- **Subsistema de Memoria Masiva (*Mass Memory*, MM):**

El subsistema de MM tiene como finalidad almacenar los datos de *Housekeeping* (HK) de CDH, PCS y AOCS, así como sus propios datos de HK. MM también almacena los datos de ciencia de CARMEN, TDP y del GPS y permite bajarlos al Segmento Terreno por medio del canal dedicado de Banda X.

Instrumentos de ciencia

La misión SAC-D/Aquarius se compone de ocho instrumentos cuya descripción se provee a continuación y cuyas propiedades principales se resumen en la Tabla A.1. La Figura A.2 presenta un CAD del satélite en el cual se pueden apreciar los instrumentos de CONAE y sus socios internacionales montados sobre la Plataforma de Servicios.

- **Aquarius:**

El instrumento Aquarius provisto por la NASA consta de seis subsistemas: la antena, los radiómetros de banda L con una frecuencia central de 1413 MHz, un escaterómetro

que transmite en la frecuencia protegida de 1260 MHz, subsistema de *command & data handling*, subsistema de potencia y subsistema mecánico y de control térmico.

Aquarius fue concebido para proveer mediciones de la salinidad superficial del mar con gran precisión observando la emisión natural térmica de la superficie del océano con el radiómetro. En mar abierto la salinidad oscila entre los 32 a los 37 PSS. Una precisión de 0.2 PSS es necesaria para lograr los objetivos de ciencia de la misión. Mediante el escaterómetro, Aquarius corrige los efectos de interferencia generados por otras fuentes como por ejemplo las olas.

- **Microwave Radiometer (MWR):**

El MWR es un instrumento desarrollado por la CONAE y consta de dos radiómetros: uno en la frecuencia de 23.8 GHz (Banda K) y el otro en la frecuencia de 36.5 GHz (Banda Ka). El MWR mide la temperatura de brillo de la superficie en un rango de frecuencias sensible a parámetros geofísicos sobre el océano. Los principales productos de ciencia del MWR son vapor de agua, velocidad del viento en la superficie marina, tasa de lluvias, agua líquida en las nubes y concentración de hielo en el mar. Las mediciones del MWR tienen como finalidad complementar la precisión del Aquarius, teniendo ambos instrumentos un ancho de barrido (*swath*) en tierra del mismo tamaño.

- **New Infrared Sensor Technology (NIRST):**

La NIRST es un instrumento desarrollado colaborativamente por la CONAE y la Agencia Espacial Canadiense (*Canadian Space Agency, CSA*) y cuyo objetivo principal es medir la radiancia del fuego con el fin de establecer sus principales características, a saber, su temperatura y la energía liberada. Otro de los objetivos de ciencia de la NIRST es proveer mediciones de la temperatura superficial del mar. La Sección 1.2 provee mayores detalles sobre este instrumento, cuya caracterización y calibración radiométricas son el objeto del presente trabajo.

- **High Sensitivity Camera (HSC):**

La cámara óptica HSC es un instrumento desarrollado por CONAE. El objetivo de ciencia de la HSC es mejorar el conocimiento relacionado con la distribución de fuego, erupciones volcánicas y tormentas eléctricas. La cámara es también utilizada en el estudio de la intensidad de luces urbanas y las auroras polares. La HSC apunta en sentido nadiral, midiendo la radiancia en el tope de la atmósfera en el rango visible

del espectro electromagnético (450 nm - 610 nm). El instrumento se compone de dos cajas: la *Electro Optical Component* (HSCO) y la *Electronics Component* (HSCE). La HSCO consta de dos cámaras basadas en la tecnología *Time Delay Integration* (TDI) *Charge Coupled Device* (CCD). La HSCE provee las señales de control y sincronismo a la HSCO y almacena los datos de ciencia del instrumento.

- **Data Collection System (DCS):**

DCS es un instrumento desarrollado por la CONAE. Su objetivo es monitorear la evolución de emergencias y desastres antropogénicos. Satisface demandas sobre el manejo acuífero superficial y de subsuelos, adquiere parámetros de interés en agricultura y detecta la presencia de contaminantes en la atmósfera baja. Para tales fines, DCS recibe y almacena datos ambientales transmitidos por Plataformas de Recolección de Datos (*Data Collection Platforms*, DCP) ubicados en tierra y equipados con sensores ambientales. La frecuencia de transmisión de las DCP es 401.55 MHz (UHF). El instrumento DCS consta de un receptor y una unidad procesadora de señales, además de la antena receptora UHF.

- **Radio Occultation Sounder for Atmosphere (ROSA):**

El instrumento ROSA, desarrollado por la Agencia Espacial Italiana (*Agenzia Spaziale Italiana*, ASI) consta de un receptor de GPS integrado para aplicaciones espaciales. Se trata de una sonda de radio-ocultación para la atmósfera, cuyo foco es la ocultación de señales de GPS. El instrumento recolecta mediciones en la frecuencia de 1575 MHz (Banda L1) y 1226 MHz (Banda L2).

- **Caractérisation et Modélisation de l' Environnement (CARMEN):**

CARMEN es un instrumento desarrollado por el *Centre National d' Etudes Scientifiques* (CNES). Se compone del instrumento ICARE y de tres detectores SODAD (SODAD-1, SODAD-2, SODAD-3). ICARE tiene el objetivo de medir el flujo de radiación en el espacio. Además, incluye un subsistema independiente dedicado al estudio de los efectos de la radiación en componentes electrónicos. Los SODAD detectan micrometeoritos y desechos espaciales.

- **Technological Demonstration Package (TDP):**

TDP es un prototipo desarrollado por CONAE que combina una Unidad de Referencia Inercial (*Inertial Reference Unit*, IRU) para medir la velocidad angular inercial y un

receptor de GPS que provee la posición, velocidad y tiempo del satélite. El objetivo de TDP es demostrar la performance de ambos sensores en vuelo y proveer una base para sensores en futuras misiones de la CONAE.

NIRST, MWR, ROSA y DCS almacenan sus datos de ciencia en el subsistema de Procesamiento y Adquisición de Datos (PAD). PAD y ROSA comparten una interfaz 1553, mientras que en el caso de NIRST, MWR y DCS las interfaces implementadas son canales RS-422. El subsistema PAD es de redundancia fría y se compone de dos cajas electrónicas idénticas, PAD-A y PAD-B.

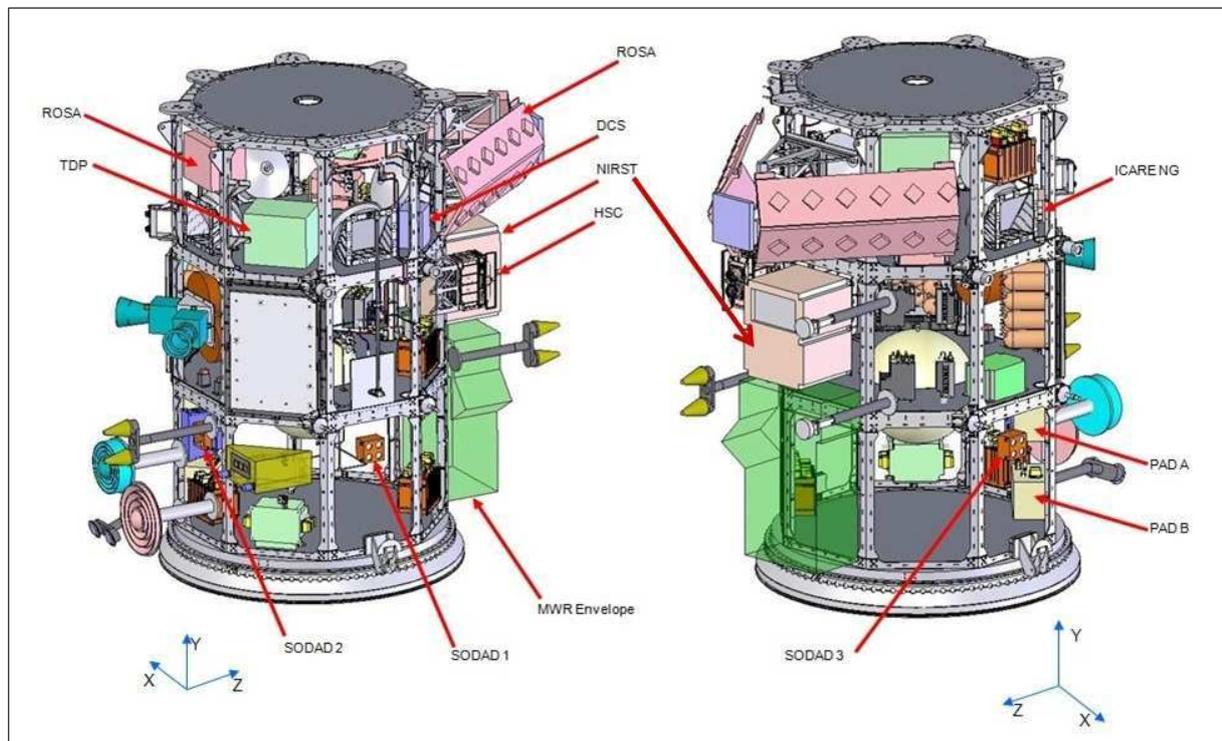


Figura A.2: CAD representando los instrumentos de CONAE y sus socios montados en la Plataforma de Servicios del SAC-D (Ref. [1]). En la figura de la izquierda pueden apreciarse la caja electrónica y la antena de ROSA, DCS, HSC, MWR y TDP, así como también los detectores SODAD-1 y SODAD-2 de CARMEN. En la figura de la derecha se aprecian los instrumentos NIRST, ICARE, el detector SODAD-3 de CARMEN y ambas PAD.

Instrumento	Objetivos	Especificaciones	Resolución	Agencia
Aquarius	Salinidad Superficial del mar	Radiómetro en Banda L (1.413GHz), escatómetro (1.26GHz), <i>Swath</i> : 390km	3 haces: (76 x 94)km (84 x 120)km (96 x 156)km	NASA
MWR	Precipitaciones, velocidad del viento, concentración de hielo marino, vapor de agua	23.8 GHz (Pol V) 36.5 GHz (Pol H y V) <i>Swath</i> : 390km	8 haces por frecuencia < 54km	CONAE
NIRST	Eventos de alta temperatura, temperatura superficial del mar	3 bandas: 3.8 μ m, 10.85 μ m, y 11.85 μ m <i>Swath</i> : 180km	350m	CONAE CSA
HSC	Iluminación urbana, auroras, tormentas eléctricas	Bandas: 450 - 610 nm <i>Swath</i> : 700km	200-300 m	CONAE
DCS	Datos meteorológicos y medioambientales	Banda: 401.55 MHz uplink	2 contactos por día con 200 plataformas	CONAE
ROSA	Perfiles de temperatura, presión y humedad	Técnicas de ocultación de GPS	Horizontal: 300km Vertical: 300km	ASI
CARMEN	Efectos de la radiación cósmica en la electrónica. Distribución de micrometeoritos y desechos espaciales	ICARE: Tres detectores Si y Si/Li. SODAD: Cuatro sensores MOS	ICARE: 256 canales. SODAD: sensibilidad de 0.5 μ part. a 10km/s	CNES
TDP	Posición, velocidad, tiempo y velocidad angular	Receptor GPS Unidad de referencia inercial	Posición: 100m Velocidad: 1m/sec Tiempo 0.2msec ARW:0.008 $^{\circ}/s^2$	CONAE

Tabla A.1: Instrumentos a bordo de la misión SAC-D/Aquarius. La columna 1 provee el nombre del instrumento, la columna 2 muestra los objetivos de ciencia principales, la columna 3 indica las especificaciones técnicas, la columna 4 detalla la resolución y la columna 5, la institución que desarrolló el instrumento.

A.3.2. Lanzador

El Lanzador utilizado para la misión SAC-D/Aquarius fue un DELTA II 7320 de dos etapas cuyas características principales son:

- Una primera etapa con tres motores de combustible sólidos amarrados a la primer etapa, para aumentar el empuje en el despegue. Estos motores son eyectados antes de la separación de la primera etapa la cual cuenta además con un núcleo Delta II standard con un motor RS-27A.
- Una segunda etapa con un motor AJ10 y una unidad de control de vuelo inercial redundada.
- Una cofia de 3 metros de diámetro donde va ubicada la carga útil del lanzador, i.e., el SAC-D/Aquarius.

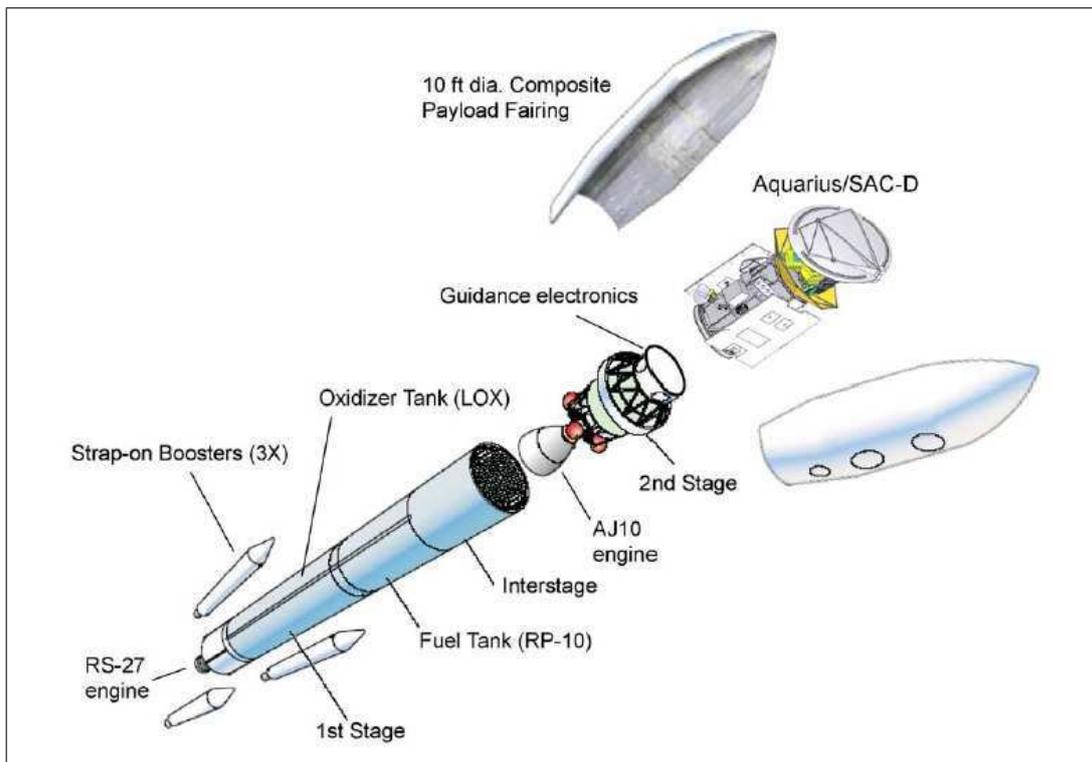


Figura A.3: Configuración del Lanzador DELTA II 7320 para la misión SAC-D/Aquarius (Ref. [1]).

La Figura A.3 muestra la configuración del Lanzador en donde las dos etapas y la cofia pueden ser apreciadas. El panel izquierdo de la Figura A.4 muestra el Observatorio en su configuración de lanzamiento, dentro de la cofia del DELTA II. Tanto el reflector del Aquarius como la antena de ROSA y los paneles solares se encuentran plegados. El panel derecho presenta el Observatorio en su configuración desplegada.

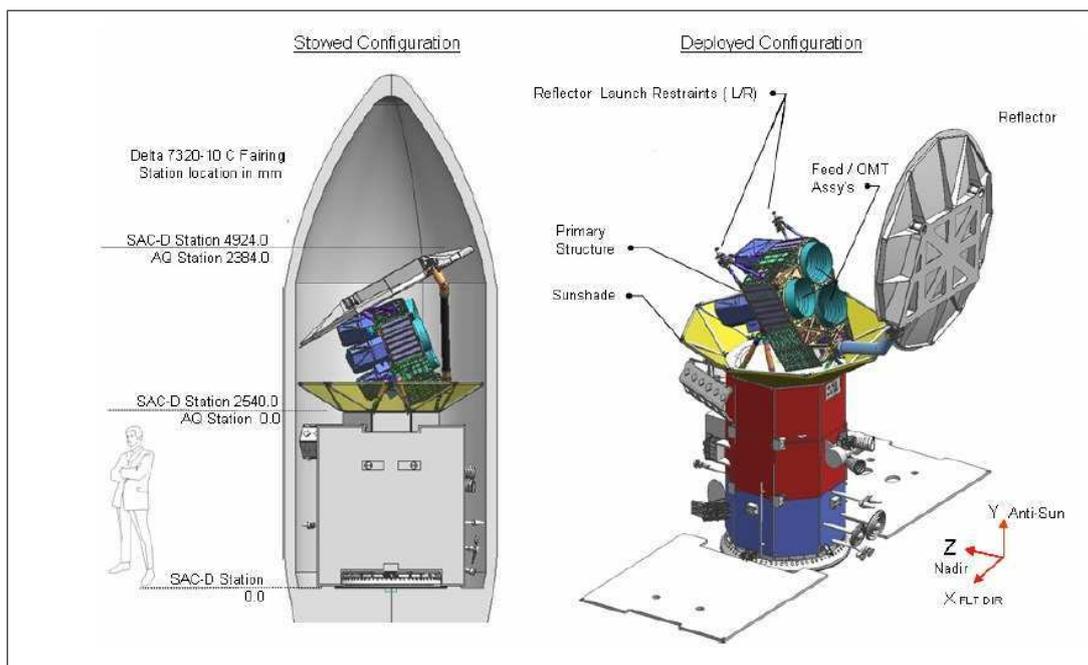


Figura A.4: Configuraciones del Observatorio SAC-D/Aquarius (Ref. [1]). Izquierda: dentro de la cofia del Lanzador, con el reflector del Aquarius y los paneles solares plegados. Derecha: Reflector del Aquarius y paneles solares desplegados.

A.3.3. Segmento Terreno

El Segmento Terreno de la misión SAC-D/Aquarius se compone de:

- Las estaciones terrenas seleccionadas para acompañar las operaciones durante las distintas fases de la misión (ver Sección A.2). Durante la fase de operaciones nominales, estas estaciones son: la Estación Terrena Córdoba (ETC), que provee servicios de Banda X y Banda S y la estación terrena de Matera, que provee servicios de Banda X.
- El Centro de Operaciones de la Misión (*Mission Operations Center*, MOC) donde

la planificación de las actividades de la Plataforma de Servicios y los instrumentos (excepto Aquarius) así como también la atención de las pasadas tienen lugar.

- El Segmento Terreno del Aquarius, responsable de definir la planificación del instrumento, realizar el monitoreo de su estado de salud y de procesar los datos de ciencia generados por el mismo.
- El Servicio de Dinámica Orbital de CONAE (*CONAE Orbit Dynamics Service*, CODS) cuyas tareas principales con respecto a la misión SAC-D/Aquarius son la determinación y propagación de la órbita, la generación de eventos (contactos con las estaciones terrestres, eclipses, intrusiones de luna, entre otros) y el cómputo de las maniobras necesarias tanto para mantenimiento de órbita como para evasión de desechos espaciales.
- El Segmento de Servicios al Usuario de CONAE (*CONAE User Segment Services*, CUSS) para usuarios de Argentina y extranjeros interesados en los productos de ciencia generados.

Apéndice B

Tópicos sobre teledetección

Este capítulo presenta algunos conceptos generales sobre teledetección. El sensado remoto consiste en obtener información de la superficie terrestre sin entrar en contacto con la misma mediante la adquisición de la energía reflejada o emitida, procesando, analizando y aplicando luego dicha información. La Figura B.1 presenta un diagrama simplificado del proceso de sensado remoto. Pueden apreciarse los distintos actores involucrados en el proceso, a saber:

- **Fuente de energía (A):** El sensado remoto requiere una fuente que ilumine o provea energía al blanco de interés.
- **La radiación y la atmósfera (B):** La energía emitida por la fuente, así como la reflejada por el blanco de interés atraviesan e interactúan con la atmósfera terrestre.
- **Interacción con el blanco (C):** Luego de atravesar la atmósfera, la energía emitida por la fuente interactúa con el blanco.
- **Almacenamiento de la información obtenida con el sensor (D):** La energía emitida por el blanco llega al sensor y es guardada en el sistema de almacenamiento de datos del satélite.
- **Transmisión, recepción y procesamiento (E):** La información almacenada a bordo es transmitida a una estación terrena donde los datos son procesados obteniéndose una imagen.
- **Interpretación y análisis (F):** La imagen es luego interpretada con el fin de extraer información sobre el blanco.

- **Aplicación (G):** El objetivo final es la aplicación de la información obtenida para una mejor comprensión de un problema particular.

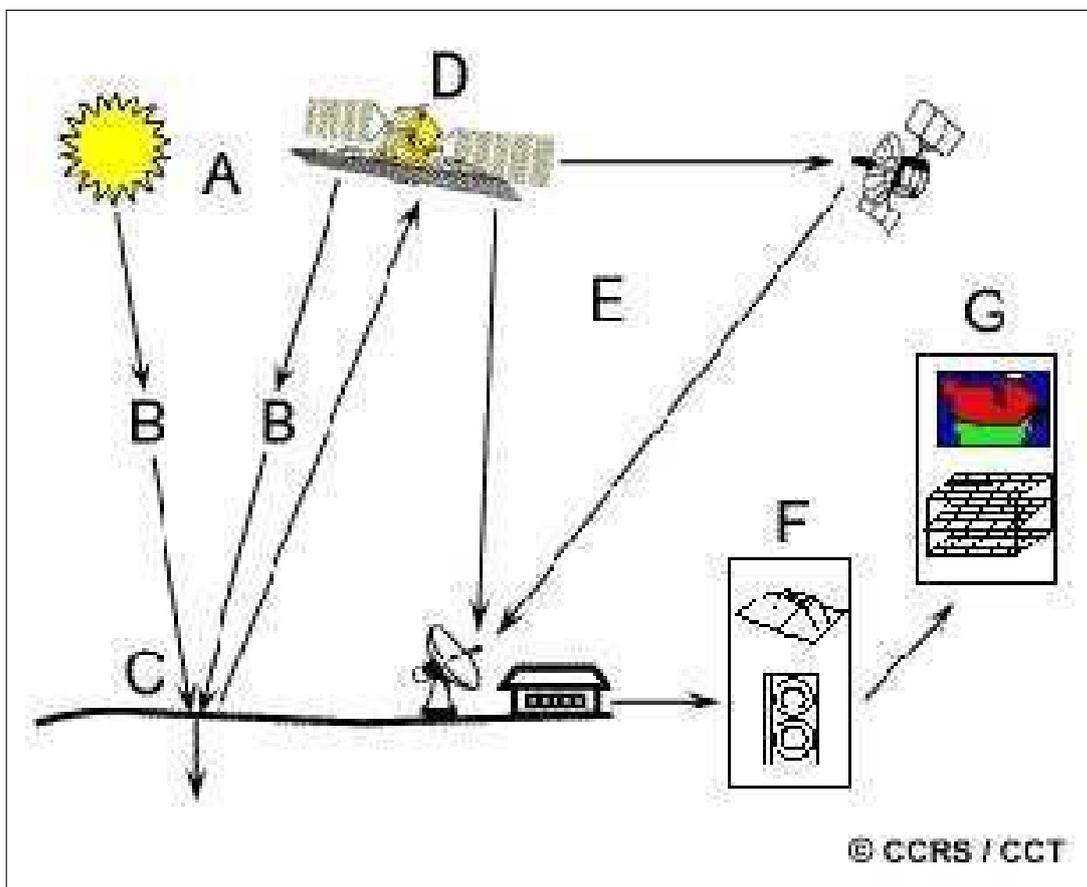


Figura B.1: Diagrama del proceso de sensorado remoto (Ref. [64]).

A continuación se describen las principales características de los sensores pasivos y activos (Sección B.1), de la pisada en tierra (Sección B.2) y del tipo de barrido (Sección B.3).

B.1. Sensorado pasivo y activo

El sensorado remoto puede dividirse en sensorado pasivo y sensorado activo. La Figura B.2 muestra un diagrama simplificado del sensorado pasivo (izquierda) y activo (derecha).

Los sistemas de sensorado remoto que miden la energía disponible naturalmente son llamados sensores pasivos. En el sensorado pasivo la energía solar es reflejada (en la región visible del

espectro electromagnético) o absorbida y luego reemitida (en la región del infrarrojo térmico y las microondas). Los sensores pasivos que detectan radiación reflejada sólo pueden ser utilizados de día, mientras que aquellos que detectan la radiación emitida pueden emplearse de día o de noche. Las cámaras infrarrojas como la NIRST constituyen un ejemplo de sensor remoto pasivo.

Los sistemas de sensado activo proveen su propia fuente de energía o iluminación emitiendo radiación dirigida al blanco de interés. La radiación reflejada por el blanco es detectada posteriormente por el sensor. Los sensores activos pueden ser empleados de día o de noche. Los radares de apertura sintética constituyen un ejemplo de sensor remoto activo.

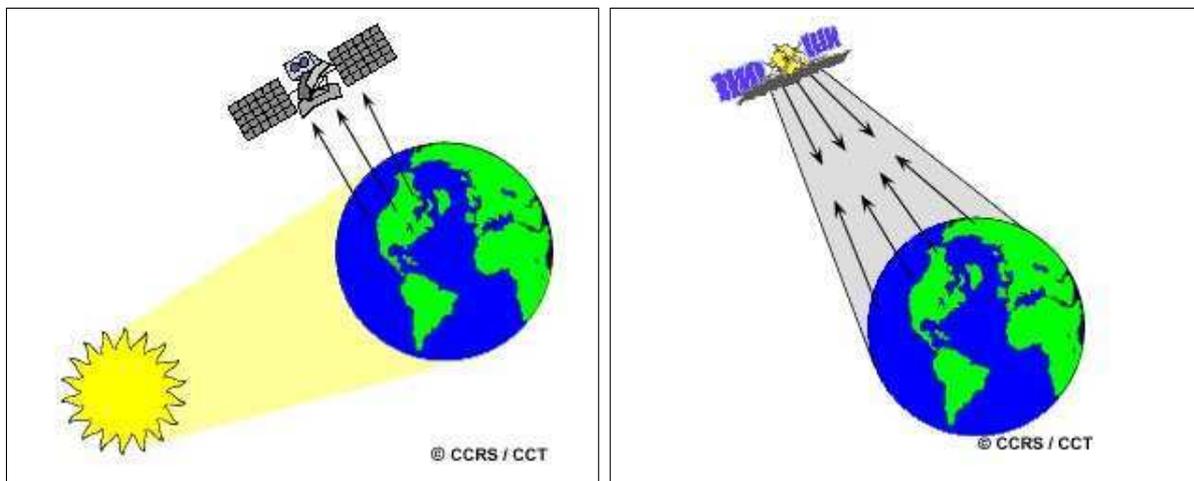


Figura B.2: Izquierda: Sensado pasivo. Derecha: Sensado activo (Ref. [64]).

B.2. Pisada o *Swath*

Conforme un satélite orbita alrededor de la Tierra recorre una porción de la superficie terrestre conocida como pisada o *swath*. La órbita del satélite y la rotación de la Tierra se combinan permitiendo una cobertura global de la superficie terrestre al cabo del período de revisita del mismo (ver Figura B.3).

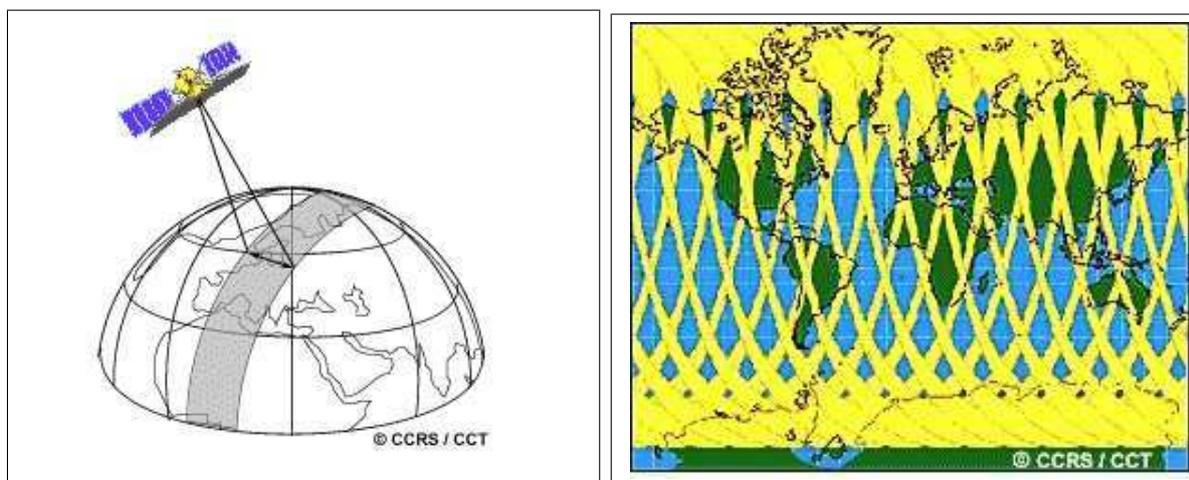


Figura B.3: Izquierda: pisada en tierra o *swath* en una órbita. Derecha: cobertura de la superficie terrestre al cabo de varias órbitas (Ref. [64]).

B.3. Scanners *Across-track* y *Along-track*

Una gran variedad de sensores remotos adquieren datos "escaneando" la superficie terrestre. Existen dos modos principales de "scaneo": a través de la pisada (*Across-track*) y a lo largo de la pisada (*Along-track*).

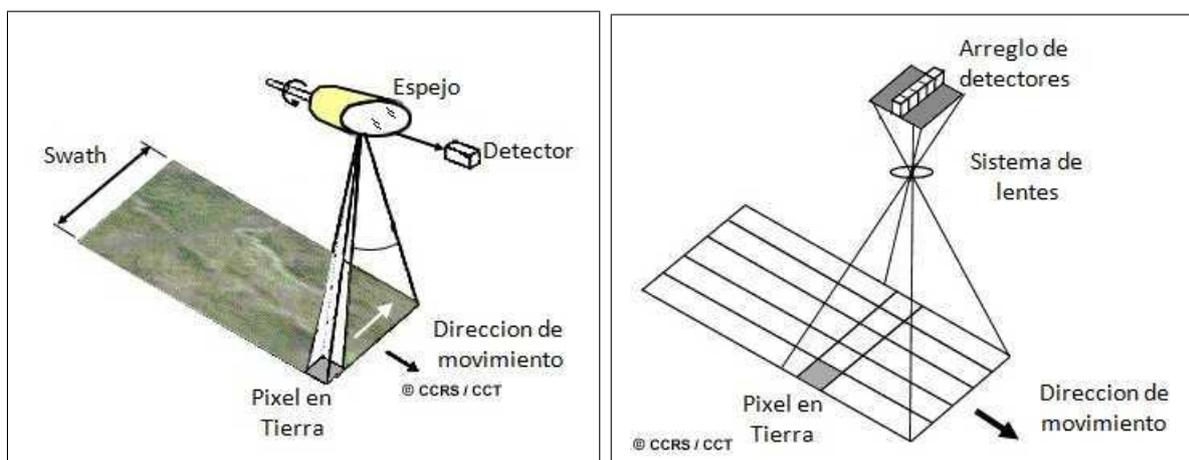


Figura B.4: Izquierda: Sensores *across-track*. Derecha: Sensores *along-track* (Ref. [64]).

Los sensores *across-track* escanean la Tierra en forma de líneas orientadas perpendicularmente a la dirección de movimiento del sensor, i.e., a través del *swath* (ver Figura B.4,

izquierda). Cada línea es escaneada de un lado a otro mediante la utilización de un espejo rotante.

Los sensores *along-track* también barren la superficie terrestre en forma de líneas. Sin embargo, en lugar de un espejo emplean arreglos de detectores dispuestos perpendicularmente a dirección de vuelo (ver Figura B.4, derecha).

Apéndice C

Lista de acrónimos y abreviaturas

El objetivo de este capítulo es proveer la lista de acrónimos y abreviaturas utilizadas con mayor frecuencia en esta tesis.

Acrónimo/Abreviatura	Descripción
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ASTRO	Autonomous Space Transport Robotic Operations
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite
EMC	ElectroMagnetic Compatibility
EMI	ElectroMagnetic Interference
EnMAP	Environmental Mapping and Analysis Program
FPA	Focal Plane Array
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
LWIR	Long Wave Infrared
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
MLI	Multi Layer Insulation
MOS	Modular Optoelectronic Scanner
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MWIR	Mid Wave InfraRed
NIRST	New InfraRed Sensor Technology
NIST	National Institute of Standards & Technology

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
OBC	OnBoard Calibrator
RVS	Response Versus Scan angle
SiTF	Signal Transfer Function
SP	Service Platform
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SWIR	Short Wave Infrared Radiometer
THEMIS	Thermal Emission Imaging System
TIR	Thermal Infrared Radiometer

Tabla C.1: Lista de acrónimos y abreviaturas utilizados.