

VNIVERSITAT E VALÈNCIA

Facultat de Física
Departament de Física de la Terra i Termodinàmica

Doctorado en Teledetección



Calibración Radiométrica del Satélite Peruano PerúSAT-1

TESIS DOCTORAL

Luis Gonzalo Saldarriaga Reyes

Directores:

Jesús Delegido Gómez

Jorge Vicent Servera

José Moreno Méndez

Junio, 2023



VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

JESÚS VALERIANO DELEGIDO GÓMEZ, Profesor Catedrático de Universidad adscrito al Departament de Física de la Terra i Termodinàmica de la Facultat de Física de la Universitat de València

JORGE VICENT SERVERA, Doctor en Teledetección e Ingeniero de Investigación y Desarrollo en Magellium (Toulouse, Francia)

JOSÉ FELICÍSIMO MORENO MÉNDEZ, Profesor Catedrático de Universidad adscrito al Departament de Física de la Terra i Termodinàmica de la Facultat de Física de la Universitat de València

HACEN CONSTAR QUE:

La tesis doctoral titulada “**Calibración Radiométrica del Satélite Peruano PerúSAT-1**”, presentada por D. Luis Gonzalo Saldarriaga Reyes ha sido realizada bajo nuestra dirección y autorizan su presentación para optar el grado de Doctor por la Universidad de Valencia en el programa de doctorado en Teledetección.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos en Burjassot, a 2 de junio de 2023

Fdo.: Jesús Delegido

Fdo: Jorge Vicent Servera

Fdo.: José Moreno

Agradecimientos

Un corazón agradecido, además de la mayor virtud, es la madre de todas.

Marco Tulio Cicerón

Presto agradecimiento a mis directores de tesis: Jorge Vicent Servera y José Moreno Méndez, quienes me dieron la oportunidad de trabajar de manera pausada pero decidida en este proyecto. Muchas gracias por sus guías, consejos y sobre todo, por su paciencia. Les dedico todo mi esfuerzo.

Quiero hacer un agradecimiento especial a mi tutor y director Jesús Delegido Gómez. Su apoyo personal y orientación han sido invaluable desde el principio. Agradezco no solo su apoyo académico y administrativo sino también su dedicación y predisposición únicas a nivel personal y familiar. Su compromiso es y será siempre una fuente de inspiración para mí y para mi familia. ¡¡Muchas gracias, Jesús!! no lo habría logrado sin ti.

A Renaud Fraise de AIRBUS DS en Francia, Jeffrey Czaplá-Myers de la Universidad de Arizona en Estados Unidos y Meygret Aime del CNES de Francia, quienes me brindaron asesoramiento y consejos durante la investigación, permitiéndome mejorar las técnicas aplicadas.

Al MAG FAP Jose García M., COR FAP Rafael Medina C., COR FAP Miguel Otero C. y a Erika Callirgos de la Agencia Espacial del Perú - CONIDA, quienes siempre me han apoyado en todos los aspectos administrativos de mis investigaciones.

A Maycol Palma, Christian Mío, Luis Enciso, Ricardo Abanto, Gonzalo Guevara y en sus nombres por no extender los más, a todos los miembros del Segmento Terrestre del CNOIS, muchas gracias por el apoyo y ánimo brindados.

A mis queridos amigos en València, Victor y Encarni Sahuquillo, gracias por tanto cariño y apoyo que me brindaron durante mi estancia en esta ciudad. Ustedes me ayudaron a superar momentos de soledad y tristeza por la ausencia de los míos. Que Dios los bendiga siempre.

A mi amada esposa Lourdes y a mis adorados hijos Luis y Paula por su amor, apoyo incondicional, ánimo permanente y sobre todo, por los muchos años tolerando mis aventuras por aprender; a mis amados padres Luis y Mercedes por su amor infinito y haberse sacrificado tanto para darme la educación que no pudieron tener; a mis hermanos Emma, Roggel y Milton por el ánimo permanente y por su amor.

No puedo dejar de mencionar a aquellas personas especiales en mi vida que no podrán leer estas líneas, pues gozan de la dicha de Nuestro Señor. Mi inolvidable “Papá Talí” Neptalí Zegarra, que me ayudo mucho para obtener la beca del Máster en Teledetección; mi “Papá Gonzalo”, mi abuelo, que me forjó de niño a la virtud como premisa; mi abuelito Pascual de infinita ternura y paciencia; y a todos mis demás familiares y amigos que influyeron en mí antes de partir, algunos demasiado pronto, . . . Gracias !!

Dedicatoria

Dedicado a . . .

Mis adorados padres: Luis y Mercedes
Mi amada esposa y compañera Lourdes
Mis muy amados hijos Luis H y Paula M
Mis queridos hnos. Emma, Roggel y Milton

*Cuando se nace pobre,
estudiar es el mayor acto
de rebeldía contra el sistema
el saber rompe cadenas de esclavitud
. . . Tomás Bulat*

Resumen

Esta tesis tiene como objetivo principal establecer una metodología integral para la calibración radiométrica del instrumento *NAOMI* a bordo del satélite *PerúSAT-1*. La metodología desarrollada se adapta a las características técnicas, empleo y modos de adquisición de *PerúSAT-1* y se basa en el uso de datos propios y externos disponibles. Se establecieron 11 períodos de calibración de frecuencia semestral para los años 2016-2022, con excepción del primer semestre del año 2017 debido a la falta de datos.

La tesis se divide en dos partes. En la primera parte, se realiza la calibración radiométrica relativa del sensor (*RelCal*), considerando los requerimientos operacionales y técnicos para calcular la señal en oscuridad a partir de las imágenes obtenidas durante el paso en eclipse del satélite. Además, se aborda la caracterización de la respuesta no uniforme de píxeles mediante el procesamiento y análisis de imágenes sobre sitios de pseudo-invariante uniformidad espacial y temporal (*PICS*).

La segunda parte se enfoca en la calibración radiométrica absoluta (*AbsCal*). Se analiza el comportamiento radiométrico global del sensor utilizando tres técnicas en paralelo: (1) análisis de tendencia en reflectancia al techo de la atmósfera (*ReflTOA*) sobre *PICS*, (2) calibración cruzada simultánea con los satélites Sentinel 2A|2B basado en la *ReflTOA* y (3) calibración absoluta usando datos de la red *RadCalNet*. Antes de realizar los cálculos en cada técnica, se corrigen los coeficientes de *RelCal* que se aplicaron a las imágenes durante su proceso de producción. Los resultados de estas técnicas se ponderan en base a la cantidad de datos y su *RMSE*, obteniéndose la tendencia global por bandas y sus respectivas incertidumbres a las que se les agrega las incertidumbres del instrumento. Finalmente se calculan los coeficientes de *AbsCal* para los períodos de calibración establecidos.

Los resultados finales obtenidos para *RelCal* muestran un crecimiento lineal alrededor del 4% semestral en la señal oscura o de fondo del sensor. Esta variación puede corregirse utilizando los coeficientes calculados. Además, se observa una alta estabilidad en las respuestas individuales de los píxeles, sin encontrarse detectores inactivos o defectuosos. En cuanto a *AbsCal*, se obtienen los coeficientes de ganancia radiométrica para las bandas multiespectrales y la banda pancromática, con incertidumbres que oscilan entre 4.4% y 6.6% para todos los períodos incluyendo la incertidumbre del instrumento. Estos márgenes se consideran aceptables de acuerdo a los requerimientos de la misión satelital.

La aplicación de los resultados y la implementación de la metodología propuesta permitirá a la Agencia Espacial del Perú, garantizar la precisión de las imágenes de *PerúSAT-1* en aplicaciones de carácter cuantitativo. Asimismo, se asegurará su interoperabilidad con otros sistemas de teledetección con rangos de incertidumbre asociados. La metodología también permitirá evaluar la degradación del sensor *NAOMI* a bordo del satélite. De esta manera, se podrá monitorear y corregir el rendimiento de dicho sensor a lo largo del tiempo, asegurando la calidad y confiabilidad de los datos adquiridos.

Índice

I	Introducción	1
1.	La teledetección satelital	3
1.1.	Definiciones básicas	3
1.2.	El procesamiento de imágenes	10
1.3.	Las aplicaciones de teledetección	11
2.	La calibración radiométrica	15
2.1.	Concepto de calibración radiométrica	15
2.2.	Tipos de calibración radiométrica	15
2.3.	Métodos y técnicas de calibración radiométrica	17
2.4.	Calibración radiométrica basada en <i>PICS</i>	21
2.5.	Calibración radiométrica basada en datos de RadCalNet	24
2.6.	Importancia de la calibración radiométrica	26
2.7.	Las etapas de calibración radiométrica	27
3.	PerúSAT-1	29
3.1.	Presentación general del satélite	29
3.2.	Carga útil de <i>PerúSAT-1</i>	30
3.3.	Características de las imágenes	31
3.4.	Aspectos operacionales	32
3.5.	El empleo de las imágenes de <i>PerúSAT-1</i>	35
3.6.	Antecedentes de calibración radiométrica de PerúSAT-1	37
4.	Metodología de la investigación: estructura y fundamentos	39
4.1.	Realidad problemática	39
4.2.	Justificación de la investigación	40
4.3.	Limitaciones de la investigación	41
4.4.	Esquema metodológico	41
II	Materiales y Métodos: Datos y Procedimientos	45
5.	Datos empleados	47
5.1.	Estado inicial de los datos	47
5.2.	Selección de las muestras	50
6.	Procedimientos	65
6.1.	Modelo radiométrico general	65

6.2. Procedimientos realizados para <i>RelCal</i>	67
6.3. Procedimientos realizados para <i>AbsCal</i>	71
7. Resultados y discusión	85
7.1. Calibración relativa	85
7.2. Calibración absoluta	98
7.3. Lecciones aprendidas durante la investigación	111
8. Conclusiones y recomendaciones	113
8.1. Conclusiones generales	113
8.2. Recomendaciones	116
Bibliografía	117

Índice de figuras

1.1. La teledetección en sensores pasivos	4
1.2. Transparencia atmosférica y selección de bandas en Landsat	5
1.3. <i>SRFs</i> de los sensores LI-200R, LI-200R, MSI(S2B) y OLI(L8)	5
1.4. Diferencias en <i>GSD</i> entre <i>PerúSAT-1</i> y Sentinel 2A	6
1.5. Geometría de adquisición en Teledetección pasiva	7
1.6. Ángulos de visión de los <i>EOS</i>	8
1.7. Duración de la iluminación solar en la Tierra según la Latitud	8
1.8. Tipos de reflectancia de la superficie	9
1.9. Ángulos que determinan la BDRF	9
1.10. Pasos típicos del procesamiento de imágenes	10
1.11. Ejemplos de uso de imágenes de <i>PS1</i> en aplicaciones	12
2.1. Distribución de PICS en la Tierra	18
2.2. Imágenes de algunos PICS controlados	18
2.3. Imágenes de algunos PICS no controlados	19
2.4. Precisión en geocalización de <i>PerúSAT-1</i> calculada en el 2022	23
2.5. Esquema de proceso de RadCalNet	25
2.6. Corrección de errores sistemáticos en una imagen <i>PS1</i>	26
3.1. Esquema de un sensor tipo “pushbroom”	30
3.2. Ejemplo de una imagen Pansharpened de <i>PerúSAT-1</i>	32
3.3. Modos de adquisición de <i>PerúSAT-1</i>	34
3.4. Empleo de las imágenes de <i>PerúSAT-1</i>	35
3.5. Distribución de imágenes por ángulo de incidencia	36
5.1. Listado general de imágenes de <i>PS1</i> desde el 20/09/2016 hasta el 31/10/2022	47
5.2. Distribución geográfica de imágenes de calibración y en oscuridad	48
5.3. Distribución geográfica de imágenes sobre sitios de Radiometric Calibration Network (<i>RadCalNet</i>)	48
5.4. Gráfico representativo de condiciones orbitales para DSNU	52
5.5. Comparación DSNU en Luna llena y nueva para las bandas MS	53
5.6. Comparación DSNU en Luna llena y nueva para la banda PAN	53
5.7. Cantidades de imágenes <i>DSNU</i> utilizadas en el cálculo de <i>RelCal</i>	56
5.8. Cantidades de imágenes <i>PRNU</i> utilizadas en el cálculo de <i>RelCal</i>	56
5.9. Distribución de <i>DN's</i> en oscuridad para la banda PAN	57
5.10. Eliminación de <i>PRNU</i> alejados de la tendencia general	57
5.11. Distribución mensual de adquisiciones para análisis de tendencia	59
5.12. Verticalidad del total de imágenes sobre sitios de <i>RadCalNet</i>	63

6.1. Modelo radiométrico general para sistemas pushbroom	65
6.2. Análisis de bordes de retinas para la banda MS2	68
6.3. Análisis de bordes de retinas para la banda PAN	68
6.4. Flujograma de cálculo de coeficientes de <i>RelCal</i>	70
6.5. Ejemplo de <i>AOI</i> y <i>ROI</i>	74
6.6. Proceso de correregistro de <i>AOI</i> y selección de <i>ROI</i>	74
6.7. Flujograma de cálculo de tendencia de reflectancia	76
6.8. Ejemplo de coincidencia espacial entre Hyperion, <i>PerúSAT-1</i> y Sentinel 2 . .	77
6.9. Enmascaramiento de imágenes Hyperion	78
6.10. Medias de reflectividad Hyperion sobre el sitio Mauritania_2	78
6.11. Perfil de reflectividad final para el sitio Mauritania_2	78
6.12. Flujograma de cálculo de <i>CrossCal</i>	80
6.13. Flujograma de cálculo de <i>AbsCal</i> usando datos de <i>RadCalNet</i>	82
7.1. Resultados de calibración relativa <i>DSNU</i> para la banda <i>MS0</i>	87
7.2. Resultados de calibración relativa <i>DSNU</i> para la banda <i>MS1</i>	88
7.3. Resultados de calibración relativa <i>DSNU</i> para la banda <i>MS2</i>	89
7.4. Resultados de calibración relativa <i>DSNU</i> para la banda <i>MS3</i>	90
7.5. Resultados de calibración relativa <i>DSNU</i> para la banda pancromática	91
7.6. Resultados de calibración relativa <i>PRNU</i> para la banda <i>MS0</i>	93
7.7. Resultados de calibración relativa <i>PRNU</i> para la banda <i>MS1</i>	94
7.8. Resultados de calibración relativa <i>PRNU</i> para la banda <i>MS2</i>	95
7.9. Resultados de calibración relativa <i>DSNU</i> para la banda <i>MS3</i>	96
7.10. Resultados de calibración relativa <i>PRNU</i> para la banda pancromática	97
7.11. Resultados de análisis de tendencia sobre <i>PICS</i>	100
7.12. Resultados de calibración cruzada entre <i>PerúSAT-1</i> y Sentinel 2	102
7.13. Resultados de calibración absoluta usando datos de <i>RadCalNet</i>	104
7.14. RMSE y desviación del error en los ajustes lineales de las técnicas	105
7.15. Resultados de calibración absoluta final	109
7.16. Corrección de efecto estacional durante el análisis de tendencias	112

Índice de Tablas

1.1.	Clasificación de los satélites de observación	3
2.1.	Definiciones y acrónimos usados en calibración radiométrica	16
2.2.	<i>PICS</i> no controlados analizados por Lacherade et al. (2013) [35]	19
2.3.	Sitios de calibración disponibles en RadCalNet	24
3.1.	Características principales de <i>PerúSAT-1</i>	29
3.2.	Características generales del sensor <i>NAOMI</i>	30
3.3.	Detectores por retina y banda	31
3.4.	Bandas y rangos espectrales de PS1	31
3.5.	Clasificación según ángulo de incidencia	32
3.6.	Clasificación según parámetros de programación	33
3.7.	Clasificación según nivel de proceso	33
3.8.	Fechas de calibración radiométrica realizada a <i>PerúSAT-1</i>	37
4.1.	Matriz de operacionalización de la variable radiometría	44
5.1.	Total de imágenes disponibles según parámetros de programación e incidencia	47
5.2.	Imágenes de <i>PS1</i> adquiridas sobre sitios de calibración al 31/10/2022	49
5.3.	Imágenes de <i>PS1</i> sobre <i>PICS</i> de desiertos	58
5.4.	Bandas análogas entre S2A & S2B y PS1	61
5.5.	Muestras de imágenes de <i>PerúSAT-1</i> para <i>CrossCal</i> con Sentinel 2	62
5.6.	Muestras para <i>RadCalNet</i>	63
6.1.	Valores actuales de coeficientes <i>AbsCal</i> y <i>ESUN</i>	72
7.1.	R^2 de ajustes lineales de la evolución de <i>DSNU</i>	86
7.2.	Resultado del ajuste lineal de análisis de tendencia sobre <i>PICS</i>	99
7.3.	Resultados de la calibración cruzada con Sentinel 2(A&B)	101
7.4.	Resultados de calibración empleando datos de <i>RadCalNet</i>	103
7.5.	Resultados de la ponderación de pesos para los cálculos de la tendencia general	107
7.6.	Modelo lineal final para la tendencia global del sensor	107
7.7.	<i>AbsCal</i> pre-lanzamiento de PS1	108
7.8.	Coefficientes de calibración absoluta <i>GAIN</i> calculados para el período de estudio	110
7.9.	Uso de sitios en cálculo de <i>PRNU</i>	111
7.10.	SBAF calculados durante el proceso de <i>CrossCal</i>	112

Índice de Ecuaciones

1.1.	Función de Distribución Bidireccional de Reflectancia BRDF	10
2.1.	Función de ajuste espectral de bandas	22
2.2.	Aplicación del <i>SBAF</i>	22
2.3.	Umbral donde no se requiere el cálculo de <i>BRDF</i>	22
5.1.	Tamaño de muestra cuando se desconoce la población	51
6.1.	Ecuación del modelo radiométrico a nivel de píxel	66
6.2.	Ecuación del modelo radiométrico a nivel de bandas	66
6.3.	Ecuación de cálculo de radiancias para las imágenes de <i>PS1</i>	67
6.4.	Ecuación general para el cálculo de <i>DSNU</i>	69
6.5.	Cálculo de DSNU considerando el umbral $\bar{DN} \pm 4\sigma$	69
6.6.	Ecuación general para el cálculo de <i>PRNU</i>	69
6.7.	Corrección de <i>RelCal</i> aplicado en el proceso de producción	72
6.8.	Cálculo de <i>ReflTOA</i> para <i>PerúSAT-1</i>	73
6.9.	Ajuste de la constante solar	73
6.10.	Ecuación general de propagación de errores	75
6.11.	Estimación de reflectancia espectral a la hora de paso del satélite	81
6.12.	Ponderación de pendientes de la técnicas aplicadas	83

Glosario de Términos

AOI	Area of Interest - Área de interés.
AbsCal	Absolute Calibration - Calibración absoluta.
BRDF	B idirectional R eflectance F unction - Función de reflectancia bidireccional.
CONOP	Concepto Operacional - Manera cómo se lleva a cabo una operación.
CrossCal	Cross Calibration - Calibración cruzada.
DN	Digital Number - Número o nivel digital.
DSNU	D ark S ignal N on U niformity - Señal en oscuridad no uniforme.
EEM	Energía electromagnética.
EMR	Electromagnetic Radiation - Radiación electromagnética.
EMS	Electromagnetic Spectrum - Espectro electromagnético.
EOS	Earth Observation Satellite - Satélites de observación de la Tierra.
GAIN	Ganancia o Factor de escalamiento de valores digitales a valores de radiancia.
GIPP	Ground Image Processing Parameters- Parámetros de procesamiento de imágenes en Tierra.
GSD	Ground Sampling Distance - Distancia de muestreo en el suelo.
LEO	Low Earth Orbit - Órbita baja de satélites, ubicada entre la atmósfera y el cinturón de radiación de Van Allen, con un ángulo bajo de inclinación, típica en satélites de teledetección.
NAOMI	New AstroSat Optical Modular Instrument - Sensor a bordo de PerúSAT-1.
NIR	Near Infrared - Infrarrojo cercano.
OFFSET	Compensación - Valores de fondo de las adquisiciones.
PICS	Pseudo-Invariant Calibration Sites - Sitios de Calibración Pseudoinvariantes.
PRNU	Pixel Response Non Uniformity - Respuesta no uniforme de píxel.
PS1	PerúSAT-1 - Satélite óptico de observación de la Tierra del Perú'.
ROI	Region of Interest -Región de interés.
RadCal	Calibración radiométrica - concepto general.
ReflTOA	Reflectancia en el techo de la atmósfera.
RelCal	Calibración radiométrica relativa.
SBAF	Spectral Band Adjustment Factor - Factor de ajuste espectral de bandas.
SRF	Spectral Response Function - Función de respuesta espectral.
VIS	Visible Spectral Range - Rango espectral visible.

Siglas empleadas

<i>CEOS</i>	Committee on the Earth Observation Satellite.
<i>CNOIS</i>	Centro Nacional de Operaciones de Imágenes de Satélite.
<i>CONIDA</i>	Agencia Espacial del Perú - CONIDA.
<i>CONOP</i>	Concepto Operacional.
<i>ESA</i>	European Space Agency.
<i>IGS</i>	Image Ground Segment - Segmento terrestre de imágenes..
<i>RadCalNet</i>	Radiometric Calibration Network.
<i>SSP</i>	Sistema Satelital del Perú.
<i>USGS</i>	United States Geological Survey.
<i>WGCV</i>	Working Group on Calibration and Validation.

Parte I

Introducción

Capítulo 1

La teledetección satelital

1.1. Definiciones básicas

La teledetección, también conocida como sensoramiento remoto, es una técnica que permite obtener información de un objeto sin tener contacto directo con él. En el ámbito de las ciencias de la Tierra, se considera como un conjunto de técnicas para capturar, procesar y analizar imágenes digitales obtenidas por sensores instalados en aeronaves, drones y satélites artificiales [1, 2, 3].

Los satélites artificiales son dispositivos fabricados en la Tierra que se lanzan al espacio para orbitar alrededor de planetas o cuerpos celestes, con el propósito de llevar a cabo misiones de observación, de comunicaciones, meteorología, etc. Este trabajo se enfoca en un satélite de observación de la Tierra (*EOS* por sus siglas en inglés). Los *EOS* se clasifican según las cualidades de sus sensores a bordo, el tipo de órbita, la fuente de iluminación y otras características (Tabla 1.1).

Tabla 1.1: Clasificación de los satélites de observación

Criterio	Clasificación	Definición
altura de órbita	baja - LEO	200 km - 1200 km
	geostacionaria - GEO	fija a 35,875 km
fuente de iluminación	activa	artificial
	pasiva	natural
cantidad de bandas*	mono espectrales	1 banda
	multiespectrales	3 - 10 bandas
	superespectrales	10 - 45 bandas
	hiperespectrales	>45 bandas
muestreo espacial	baja resolución	>500 m
	mediana resolución	50 m - 500 m
	alta resolución	5 m - 50 m
	muy alta resolución	<5 m
modo de escaneo	pushbroom (empuje)	lineal
	whiskbroom (barrido)	oscilante lateral

* Excluye las bandas pancromáticas.

PerúSAT-1 es un *EOS* que se encuentra en órbita *LEO*. Su carga útil es el instrumento “New AstroSat Optical Module Instrument” (*NAOMI*) de tipo pushbroom.

La generación de imágenes en sensores pasivos se logra gracias a la medición de *EEM*. Este tipo de energía se transporta en forma de radiación electromagnética (*EMR* por sus siglas en inglés) a distintas longitudes de onda (λ). Cuando ingresa *EMR* al sistema óptico de un sensor, se estimula el material sensible de los detectores internos, generándose corrientes de electrones que son cuantificadas y registradas. Existe entonces una relación directa entre el total de *EEM* que ingresa y los valores que se registran en función de la λ de la *EMR* que la transportó [4, 5, 6].

La λ de la *EMR* se encuentra en relación proporcional inversa a la *EEM* que transporta la onda, por lo que son interdependientes y en modo práctico se refieren al mismo fenómeno. Por ello, en adelante se usará solo el término *EEM* para evitar confusiones. Asimismo, la distribución de todo el rango de λ de la *EEM* se conoce como espectro electromagnético (*EMS* por sus siglas en inglés).

La *EEM* se propaga por el espacio de forma indefinida y continua, salvo que interactúe con materia durante su trayecto. En el proceso de captura de imágenes satelitales, la *EEM* interactúa con la atmósfera, experimentando procesos de absorción, transmisión, dispersión y reflexión (Figura 1.1). La absorción atmosférica genera opacidad en determinados rangos de λ , lo cual impide el uso de todo el *EMS* en teledetección satelital. Las porciones del *EEM* a las que la atmósfera es transparente se conocen como “ventanas atmosféricas”. La opacidad atmosférica es causada por la absorción de gases como el dióxido de carbono, el oxígeno, el ozono y el vapor de agua. Además, los aerosoles generan absorción y dispersión [7].

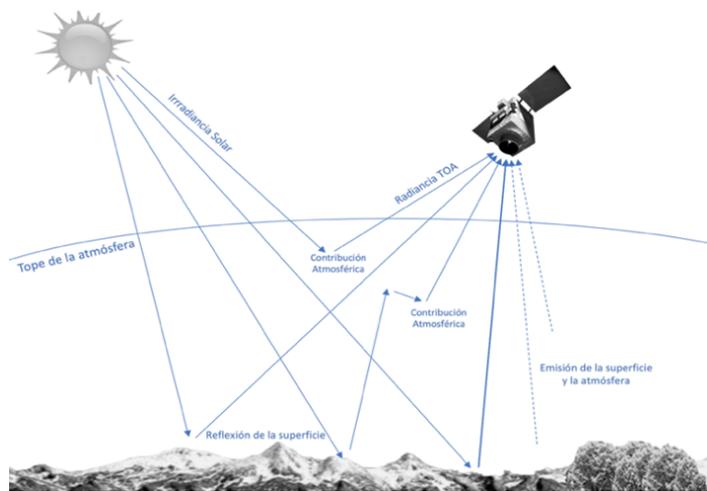


Figura 1.1: La teledetección en sensores pasivos

La *EEM* abarca una amplia gama de radiaciones, como la luz visible, microondas, luz infrarroja, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma [8]. En teledetección, se eligen bandas espectrales dentro de las ventanas atmosféricas para poder captar información relevante (Figura 1.2). Estas bandas se definen en función de la misión y pueden incluir el rango óptico-visible (*VIS*), el infrarrojo cercano (*NIR*), el infrarrojo de onda corta (*SWIR*), el infrarrojo de onda larga (*LWIR*) y el infrarrojo térmico (*TIR*). El satélite *PerúSAT-1* trabaja en el rango *VIS-NIR*.

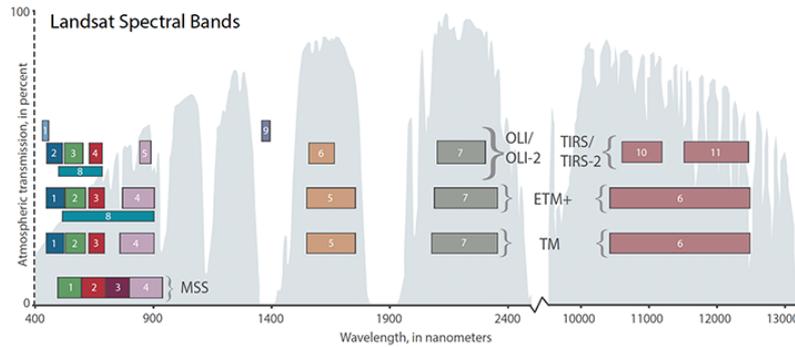


Figura 1.2: Transparencia atmosférica y selección de bandas en Landsat
 Fuente: NASA (2020) [9]

La teledetección pasiva satelital es un proceso complejo que incluye variables provenientes de las características y desempeño propias del sensor, aspectos operacionales y propiedades inherentes de la superficie que se escanea. Esto significa que si bien existen procedimientos comunes, muchas veces un enfoque de trabajo empleando un sensor no es aplicable a otro. Centrándonos en el objeto de estudio de esta investigación, es necesario especificar algunos conceptos importantes relacionados con las variables de trabajo que se utilizarán.

1.1.1. Variables generadas por las características del sensor

a) La función de respuesta espectral:

La sensibilidad a la λ varía incluso entre sensores que trabajan en rangos espectrales similares o iguales debido a la respuesta espectral relativa (*RSR* por sus siglas en inglés) de sus sistemas de detección. Esta respuesta espectral se refiere a cómo, de forma global, el material sensible de los detectores responde frente a una determinada λ . Cuando se evalúa la *RSR* en función de λ , se determina la “función de respuesta espectral” (*SRF* por sus siglas en inglés), la cual es particular a cada sistema (Figura 1.3).

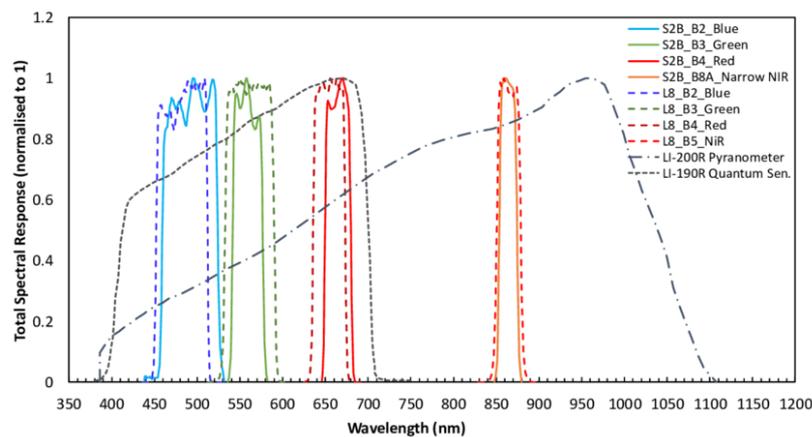


Figura 1.3: *SRFs* de los sensores LI-200R, LI-200R, MSI(S2B) y OLI(L8)
 Fuente: Canisius et al. (2019) [10]

b) El ancho de banda espectral:

El ancho de banda espectral se refiere al rango de λ que el sensor de un satélite puede detectar y medir en cada una de sus bandas. Este ancho de banda varía según el diseño y los objetivos de la misión. Algunas bandas están diseñadas para detectar rangos de λ dentro del *VIS* separando al rojo, verde, azul, etc.; mientras que otras bandas pueden detectar rangos más amplios que abarquen a todo el espectro *VIS*, tales como las bandas pancromáticas (*PAN*).

c) El muestreo espacial:

La longitud de muestreo espacial (*GSD*, por sus siglas en inglés) es la distancia en la superficie terrestre que representa un píxel nominal en una imagen satelital (Figura 1.4), es un concepto sistémico que depende de diversas variables, incluyendo las capacidades del sensor y del instrumento óptico, el diseño del sistema y factores operacionales. El tamaño de la *GSD* se ve influenciado por la frecuencia de muestreo del sensor, la distancia focal del instrumento óptico, la altura nominal del satélite y el ángulo de incidencia. Para *PerúSAT-1*, los 3 primeros son sistémicos y no varían salvo la altura del satélite que puede cambiar ligeramente pero sus efectos son desdeñables. Sin embargo, el cuarto es resultado de las operaciones y puede variar en cada adquisición. Muchas veces se confunde la *GSD* con el tamaño final del píxel en las imágenes, pero no es lo mismo, mientras que una se relaciona con la toma de datos, el otro es resultado de la creación de imágenes georreferenciadas que se deben remuestrear para obtener elementos cuadrados en las matrices.

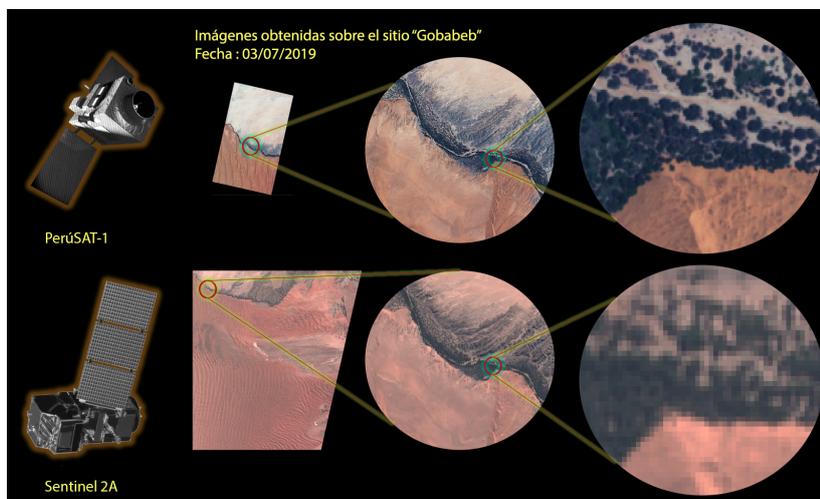


Figura 1.4: Diferencias en *GSD* entre *PerúSAT-1* y Sentinel 2A

1.1.2. Variables generadas por aspectos operacionales

a) La geometría de adquisición:

La *EEM* proveniente del Sol se proyecta sobre la superficie terrestre formando dos ángulos: el ángulo azimutal solar (*SAA*) con respecto al Norte terrestre, y el ángulo cenital solar (*SZA*) con respecto a la normal de la superficie. A su vez, los *EOS* también observan la Tierra formando dos ángulos: el ángulo de visión azimutal (*VAA*) y el ángulo de visión cenital (*VZA*). El conjunto de todas estas medidas angulares se conoce como “geometría de adquisición” y afecta el proceso de medición de *EEM*, siendo necesario considerar sus efectos en el procesamiento de imágenes, desarrollo de aplicaciones y/o para procesos de calibración radiométrica de sensores. (Figura 1.5)

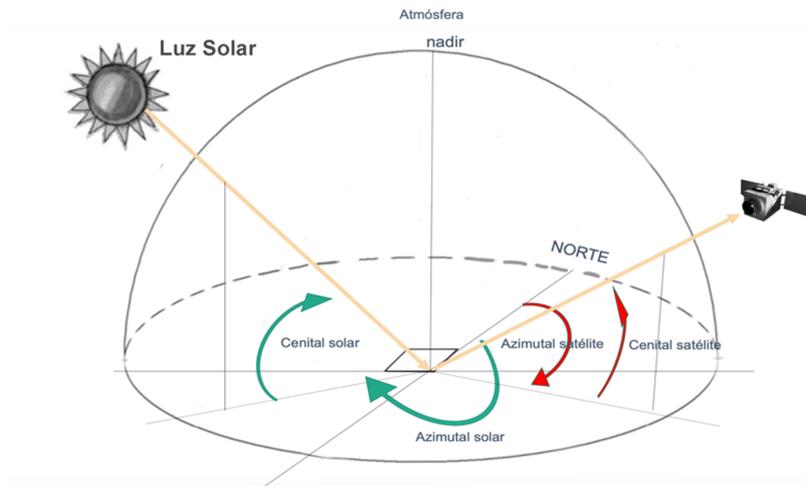


Figura 1.5: Geometría de adquisición en Teledetección pasiva

b) El ángulo de incidencia:

La generación de los ángulos de visión de los *EOS* varía entre sistemas. Algunos están diseñados para escanear permanentemente la superficie en forma perpendicular o al nadir, mientras que otros tienen una alta dinámica de vuelo que les permite girar en *Roll* (giro con respecto al vector de desplazamiento hacia adelante del satélite), *Pitch* (giro con respecto al vector perpendicular al desplazamiento del satélite) y *Yaw* (giro con respecto a la proyección al nadir del satélite). La combinación de *Pitch*, *Roll*, y el arco de curvatura de la Tierra generan el “Ángulo de Incidencia” (Figura 1.6) el cual es un valor de referencia típico para explicar de la geometría de una adquisición [11].

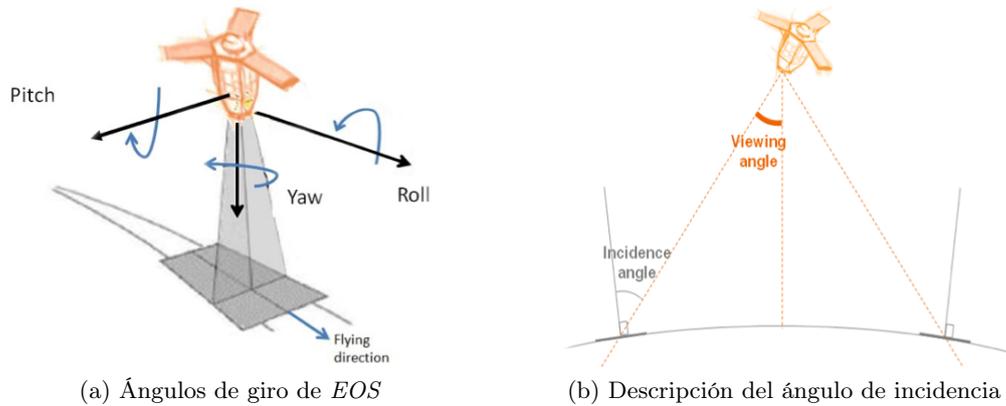


Figura 1.6: Ángulos de visión de los *EOS*.

Fuente: ESA (2019)[11]

c) Iluminación según la Latitud:

La teledetección se ve influenciada por la combinación de la fecha de adquisición de la imagen y la órbita del satélite, especialmente en casos que requieren condiciones particulares como la calibración radiométrica. La cantidad de energía electromagnética (*EEM*) proveniente del Sol en el techo de la atmósfera cambia cíclicamente en intensidad según la fecha del año. Los periodos de iluminación también varían en función de la latitud del lugar, siendo más prolongados en latitudes bajas o ecuatoriales y presentando una mayor variación estacional en latitudes altas, lo que afecta a los satélites en órbita polar como *PerúSAT-1* (Figura 1.7).

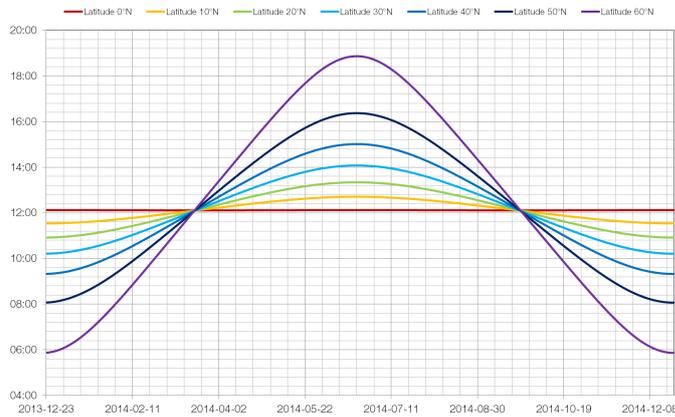


Figura 1.7: Duración de la iluminación solar en la Tierra según la Latitud

Fuente: Obtenida de *MrRaid.org*

1.1.3. Variables generadas por las propiedades de la superficie

a) La reflexión superficial:

Las superficies reflejan la *EEMs* de distinta forma según sus propiedades físicas (Figura 1.8), aquellas que la reflejan de la misma manera en todas las direcciones se denominan isotrópicas, lambertianas o difusores perfectos, mientras que, aquellas que reflejan de forma distinta en intensidad y dirección se llaman anisotrópicas, especulares y/o difusas [12, 13, 14].

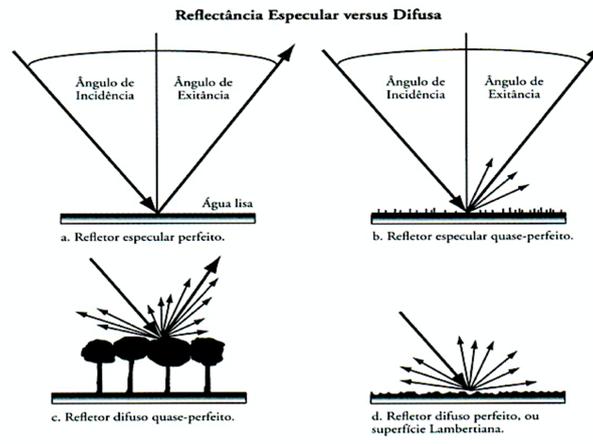


Figura 1.8: Tipos de reflectancia de la superficie

Fuente: [13]

b) La función de reflectancia bidireccional (*BRDF*):

La Función de Distribución Bidireccional del Reflectancia (*BRDF* por sus siglas en inglés) es la relación entre la radiación reflejada en un ángulo sólido unitario y la radiación incidente total, definiendo cómo se refleja la *EEM* en una determinada superficie lo que influye en la percepción o apariencia visual de los objetos contenidos en las escenas [15, 16, 17]. En teledetección, se genera por la geometría de adquisición relacionando los ángulos de iluminación solar y de vista con la superficie observada caracterizando de esa manera las propiedades reflectivas de las superficies observadas. Se representa mediante la Ecuación 1.1 y se ilustra en la Figura 1.9.

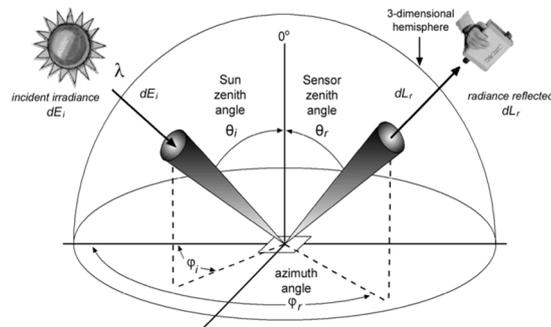


Figura 1.9: Ángulos que determinan la BDRF

Fuente: [16]

$$BRDF(\lambda, \Omega_s, \Omega_v) = \frac{L(\lambda, \Omega_v)}{E(\lambda, \Omega_s)} (sr^{-1}) \quad (1.1)$$

Función de Distribución Bidireccional de Reflectancia BRDF
Baghdadi & Zribi (2016) [18]

Donde :

- λ : Longitud de onda
- $L(\lambda, \Omega_v)$: Radiancia espectral reflejada en la dirección Ω_v
- $E(\lambda, \Omega_s)$: Radiancia espectral incidente en la dirección Ω_s

1.2. El procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo satisfacer las necesidades de información para el desarrollo de aplicaciones. Generalmente, sigue las fases descritas en la Figura 1.10, que son adaptables a la mayoría de las disciplinas. En esta figura, la tercera fase “Calibración Radiométrica”, consiste en convertir los valores digitales de la imagen a unidades físicas para caracterizar el comportamiento de la *EEM* al interactuar con la materia de la superficie terrestre, siendo la etapa en la que se aplican los coeficientes de calibración absoluta. Esta fase del procesamiento de imágenes no debe confundirse con “Calibración Radiométrica del Sensor” el que, por otro lado, se enfoca en el análisis y corrección del desempeño de medición del instrumento a bordo. La unidad física del SI (Sistema Internacional de Unidades) que se usa como referencia en Teledetección es la radiancia (L) en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$, y cuando se calcula en función de las bandas espectrales del sensor se usa la radiancia espectral (L_λ) en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ [19, 20, 21].

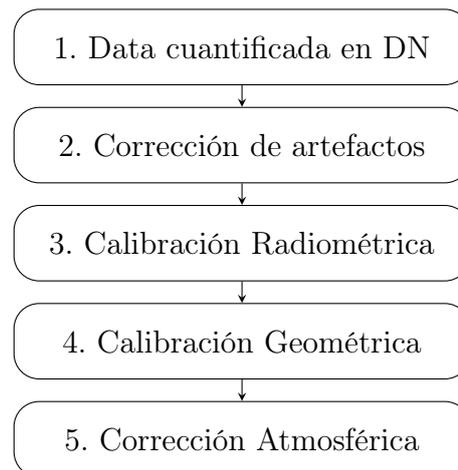


Figura 1.10: Pasos típicos del procesamiento de imágenes

En el caso de imágenes en el espectro visible (*VIS*), infrarrojo cercano (*NIR*), infrarrojo de onda corta (*SWIR*) e infrarrojo de onda larga (*LWIR*) típicamente, la variable principal a analizar no es la radiancia, sino la reflectancia o reflectividad (ρ). La ρ se refiere a la ratio entre la radiación incidente y la reflejada desde la superficie, ya que el comportamiento o perfil reflectivo de los elementos está en función de cuánta *EEM* reciben y reflejan.

El procesamiento de imágenes se realiza con diversos objetivos, y en este caso particular se considera como un proceso típico en el desarrollo de aplicaciones de teledetección. Los objetivos de las aplicaciones de teledetección y sus resultados justifican el esfuerzo tecnológico de ubicar sensores en vehículos espaciales controlados. Existe una amplia diversidad de aplicaciones ya que suelen ser multidisciplinarias y abarcar diferentes niveles de complejidad. Cada sistema satelital se diseña con una serie de propósitos que constituyen su misión. Estos propósitos se basan en las expectativas del desarrollo de aplicaciones necesarias para el país o propietario del sistema.

1.3. Las aplicaciones de teledetección

Las aplicaciones de teledetección son proyectos particulares destinados a la investigación, evaluación, análisis y seguimiento de fenómenos naturales o antropogénicos. Estos proyectos implican medir y evaluar situaciones, condiciones y efectos en los dominios espacial, espectral y temporal sobre un área física determinada. Para llevar a cabo estas aplicaciones, se utilizan principalmente imágenes generadas por sensores a bordo de *EOS* y en algunos casos, se requiere información adicional obtenida en campo. Por lo general, los resultados se presentan en forma de imágenes o de informes.

En la formulación y diseño de aplicaciones de teledetección, resulta crucial determinar el tipo de datos a utilizar y los procedimientos necesarios, en función de los objetivos establecidos [22]. En ciertas ocasiones, no es necesario llevar a cabo todos los pasos del procesamiento de imágenes, ya que el objetivo principal puede no requerir un alto nivel de precisión. En tales casos, resulta más importante optimizar el tiempo y los recursos de procesamiento, especialmente durante situaciones de emergencia ocasionadas por fenómenos naturales.

En la Figura 1.11 se muestran tres tipos de productos obtenidos utilizando imágenes de *PerúSAT-1* adquiridas en diferentes fechas sobre la misma zona. En el marco del Sistema Satelital del Perú (*SSP*), se utilizan las definiciones de “aplicación cualitativa” y “aplicación cuantitativa”, las cuales dependen de si se basan en análisis de formas o en cálculos numéricos.

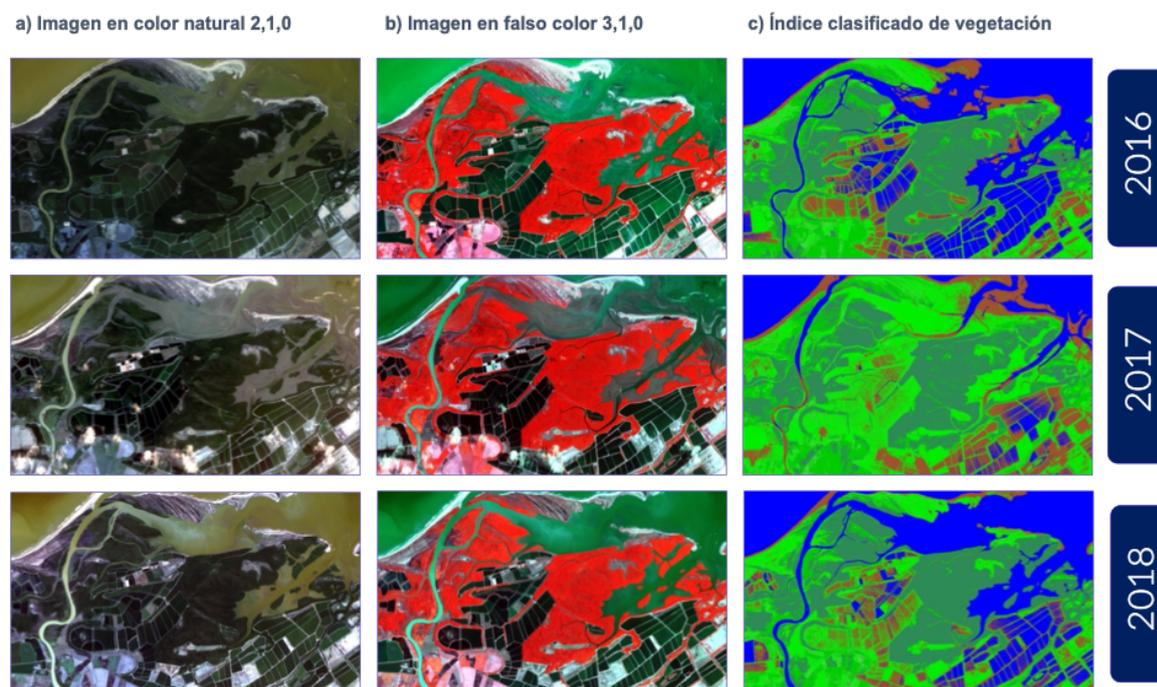


Figura 1.11: Ejemplos de uso de imágenes de PS1 en aplicaciones

La experiencia del Centro Nacional de Operaciones de Imágenes Satelitales (*CNOIS*), sede principal del *SSP*, ha demostrado que las consideraciones del uso de imágenes en las aplicaciones para las que son requeridas pueden afectar el *CONOP*. Las aplicaciones para las que mayormente se requieren las imágenes de *PerúSAT-1* pueden dividirse en tres categorías: referencia visual, cartografía y análisis e investigación.

En las aplicaciones de referencia visual, las imágenes se utilizan como “fotografías” para evaluar eventos como desastres naturales, medir áreas y distancias, entre otros. La calidad gráfica y geométrica son críticas, y los errores pueden depender de varios factores sistémicos como la precisión de apuntamiento, el sistema de adquisición, las líneas de vista, los datos de geoprocreso, el muestreo espacial, etc. Aunque la tolerancia en precisión geométrica puede ceder ciertos límites en situaciones de emergencia, existen métodos para corregir errores en los productos finales.

Las aplicaciones con fines cartográficos incluyen la generación de cartas topográficas y modelos de elevación digital. Estas aplicaciones requieren calidad gráfica y una localización precisa de los píxeles para garantizar la representación exacta de las formas físicas de los elementos. Se basan en técnicas fotogramétricas que utilizan 2 o más imágenes del mismo lugar, adquiridas con diferentes ángulos de observación y bajo ciertos parámetros, como la relación base-altura en función del relieve del terreno. En este caso, la precisión en la geolocalización no es necesaria, ya que se utilizan imágenes sin referencia geográfica.

Por último, las aplicaciones con fines de análisis e investigación utilizan imágenes para medir propiedades reflectivas y/o emisivas de la superficie escaneada. Si bien la calidad gráfica y geométrica son importantes, la calidad radiométrica, es decir, la precisión de medición del sensor, es la necesidad más importante. Esto depende de factores como la eficiencia de los detectores, el diseño óptico y los rangos de longitudes de onda captados.

La clasificación de aplicaciones según se conceptúa en el *SSP* no excluye los requisitos

de calidad en una u otra categoría, ya que incluso aquellas con el propósito de generar informes o reportes deben cumplir con requisitos mínimos de calidad gráfica, geométrica y/o radiométrica para garantizar resultados consistentes [23]. Para cumplir con todos estos requisitos, es necesario realizar calibraciones en los sub-sistemas del satélite, como mejoras en la geolocalización y correcciones en la radiometría. Esta tesis, se enfoca en la calidad gráfica y radiométrica de las imágenes de *PerúSAT-1*, y no en la calidad geométrica, aunque ésta tendrá un importante impacto en la implementación de la metodología, especialmente por el rendimiento en geolocalización del satélite.

En el próximo capítulo. . .

El capítulo siguiente es denominado LA CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA, y en él se realiza una revisión del estado del arte sobre esta actividad técnico-operativa, haciendo uso de los conceptos explicados.

Capítulo 2

La calibración radiométrica

2.1. Concepto de calibración radiométrica

Según el Working Group on Calibration and Validation (*WGCV*) del Committee on the Earth Observation Satellite (*CEOS*) la calibración radiométrica es el proceso de definición cuantitativa de las respuestas del sensor en base a señales de entrada controladas. Permite convertir las salidas de los sensores en unidades físicas traceables bajo un estándar conocido y dentro de una incertidumbre específica. Autores como Liang (2017) [24] y Barrientos et al. (2016) [25] agregan que es el factor crítico que asegura la utilidad real de las imágenes en aplicaciones cuantitativas de teledetección.

La calibración radiométrica (en adelante *RadCal*) garantiza el éxito de una misión de observación, ya que permite identificar el rendimiento y las limitaciones de la medición; proporcionar ecuaciones y parámetros característicos que relacionan la señal medida con el resplandor de la escena real y su contenido espacial; interpretar oportuna y correctamente los datos para tomar decisiones más precisas; así como cuantificar la incertidumbre de la medición y verificar que el sensor cumpla con los requisitos de la misión [26, 2, 20, 27].

2.2. Tipos de calibración radiométrica

En el marco de la presente Tesis, dado que el objeto en estudio es un satélite de tipo pushbroom, existen 2 tipos de calibraciones radiométricas necesarias [28, 29].

- a) La calibración radiométrica relativa, ecualización o corrección radiométrica:

Esta calibración se refiere a la corrección de distorsiones en las imágenes. Su objetivo es garantizar que la imagen esté libre de errores o fallas sistemáticas provenientes de la detección. Es especialmente importante en sistemas pushbroom, ya que estos tienen conjuntos de detectores independientes entre sí. Es necesaria para igualar la respuesta de un conjunto de detectores evitando que las diferencias de sensibilidad y la medición de fondo registrados por cada detector afecten la calidad gráfica de las imágenes [30, 31, 21, 32].

La calibración radiométrica relativa (*RelCal*) garantiza que se generen imágenes sin diferencias radiométricas entre columnas, lo que es crítico para las aplicaciones cartográficas ya que evita la presencia de “artefactos” en el proceso fotogramétrico durante la restitución y errores en la definición de alturas. En adelante, se utilizará el acrónimo *RelCal* para referirse a este tipo de calibración.

b) La calibración radiométrica absoluta:

La calibración radiométrica absoluta (*AbsCal*) se refiere al cálculo de coeficientes que permiten la conversión precisa de los valores crudos de la imagen en unidades físicas estandarizadas. Tal como se explicó en el capítulo anterior las unidades de referencia utilizadas en el Sistema Internacional de Unidades son la radiancia (L) y la radiancia espectral (L_λ). Esta conversión permite caracterizar numéricamente el comportamiento reflectivo o emisor de una superficie así como escalar los valores radiométricos de las imágenes para que puedan compararse con datos de otros sensores en bandas análogas. En adelante, se utilizará el acrónimo *AbsCal* para referirse a este tipo de calibración.

Tanto la *RelCal* como la *AbsCal* requieren procesos continuos que inician desde la fabricación del sensor y continúan durante toda su vida útil. Para *RelCal*, los resultados son coeficientes de ganancia relativa o *PRNU*, y de señal oscura o *DSNU*; mientras que para la *AbsCal*, se calculan coeficientes de ganancia *GAIN* y de sesgo *OFFSET* (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Definiciones y acrónimos usados en calibración radiométrica

Acrónimo	Definición
<i>GAIN</i>	Coefficiente de ganancia para <i>AbsCal</i> en $DN/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$
<i>OFFSET</i>	Coefficiente de sesgo para <i>AbsCal</i> en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
<i>PRNU</i> *	“Pixel Response Non Uniformity”, adimensional, similar al <i>GAIN</i> relativo en <i>RelCal</i> , coeficiente de equalización de columnas usado para corregir diferencias de sensibilidad individual en comparación con el conjunto de detectores.
<i>DSNU</i> *	“Dark Signal Non Uniformity”, valor en <i>DN</i> , también denominado como “señal oscura o de fondo”, generada por corrientes eléctrica internas al momento de la adquisición que no tienen relación con la excitación generada por la radiancia que ingresa.

* Sufijo “NU” significa “Non Uniformity” y se refiere a la diferencia de respuestas entre detectores, tanto para señal en oscuridad como para respuesta de píxel.

Después de que se realiza el sensoramiento, los datos registrados por los satélites se descargan y se archivan a modo de data cruda. En el caso de *PerúSAT-1* la data cruda se denomina “Nivel 0” (*L0*). Los usuarios finales reciben imágenes en los niveles *L2A* (Primario) y *L3* (Ortorectificado) a las cuales se les ha aplicado *RelCal*. Para la calibración radiométrica de dichas imágenes (ver Capítulo 1.2), a nivel de usuario, se deben emplear los valores de los coeficientes de *AbsCal* contenidos en los metadatos que se adjuntan en las carpetas de los productos.

2.3. Métodos y técnicas de calibración radiométrica

Existen diferentes métodos de *RadCal* que se utilizan para asegurar la calidad radiométrica de los *EOS* algunos de ellos son sistémico - operacionales y otros son vicarios. Los primeros se realizan en *EOS* que cuentan con Calibradores a bordo (*OBC*, por sus siglas en inglés) ejecutando operaciones remotas de control radiométrico. Cuando no se cuenta con esta tecnología, se ejecutan entonces los métodos de “calibración vicaria”, basados en el análisis de las imágenes adquiridas, existiendo varios enfoques y técnicas. *PerúSAT-1* no posee *OBC*'s por lo que le corresponde *RadCal* usando métodos vicarios.

En el caso de *RelCal* los métodos vicarios son específicos para cada sensor, ya que depende de las características propias del sistema de detección. Para *AbsCal* vicaria de sensores que trabajan en los rangos VIS y NIR como *PerúSAT-1*, las técnicas más comunes son:

a) Campañas de campo basadas en la reflectancia:

Esta técnica vicaria es la más utilizada en *RadCal* consiste en comparar las reflectancias calculadas en el techo de la atmósfera (*ReflTOA*) con las medidas por el sensor sobre una misma ubicación o sitio. La *ReflTOA* representa la relación entre la radiancia que llega al techo de la atmósfera desde la superficie y la irradiancia solar incidente. La selección del sitio de calibración es crucial y debe cumplir ciertas características: alta reflectividad, uniformidad espacial, estabilidad atmosférica y cuasi-lambertianidad. Aunque no hay una superficie ideal, cualquier ubicación puede ser utilizada si se caracteriza correctamente la reflectancia y las condiciones atmosféricas en el momento de la adquisición. Sin embargo, usar datos de *ReflTOA* calculadas en fechas diferentes a la adquisición puede afectar el proceso como por ejemplo si se realiza sobre superficies cubiertas de vegetación que tienen variaciones estacionales. Por otro lado, las condiciones atmosféricas influyen significativamente en el cálculo, por lo que se prefiere una “Atmósfera Cero” como condición ideal.

De acuerdo con Liang (2017) [24] existen 5 fases en la aplicación de esta técnica:

- Medición de la reflectancia de la superficie
- Predicción de la *ReflTOA* sobre el sitio
- Análisis y comparación de la *ReflTOA* del sitio con la medida por el sensor
- Reajuste de coeficientes
- Cálculo de la incertidumbre

Para llevar a cabo las fases se utilizan radiómetros y/o espectralradiómetros, fotómetros solares y modelos atmosféricos de transferencia radiativa, entre otros. Además, es importante tener en cuenta las diferentes fuentes de incertidumbre asociadas a la medición de la reflectancia de la superficie, del código de transferencia radiativa, de la caracterización de la atmósfera y del cálculo del promedio registrado según la *GSD* del sensor. Todos los cálculos y comparaciones son relativos a cada banda, de esta manera, puede haber valores de incertidumbre mayores o menores según el rango de λ .

b) El uso de sitios de calibración Pseudo-invariantes:

Los sitios de calibración Pseudo-invariantes (en adelante *PICS*, por sus siglas en inglés) son áreas geográficas estables a lo largo del tiempo, se ubican en zonas muy áridas y con poca actividad humana. Los *PICS* cuentan con características de alta uniformidad espacial, mínima cobertura nubosa y un relativo bajo efecto atmosférico. Actualmente, existe una lista de más de 20 sitios que se consideran aptos para *RadCal* (Figura 2.1).

Los *PICS* pueden ser controlados, semi-controlados o no controlados, siendo los dos primeros aquellos que cuentan con instalaciones e instrumentos permanentes o semi-permanentes para medir la reflectancia de la superficie y condiciones atmosféricas del sitio. En general, el uso de *PICS* se considera una forma confiable y efectiva de calibrar los sensores de teledetección [24, 28, 33, 34, 35, 36, 21, 37].

En la Figura 2.2 se muestran imágenes de algunos *PICS* controlados y/o semi-controlados: Dome C (Antártida), Dunhuang (China), Frenchman Flat e Ivanpah Playa (EE.UU.), La Crau (Francia), Negev (Israel), Railroad Valley Playa (EE.UU.), y Tuz Golu (Turquía). Estos *PICS* son considerados sitios de calibración oficial por el Comité en satélites de observación de la Tierra (*CEOS*, por sus siglas en inglés) [38]. En la Figura 2.3, se muestran imágenes de algunos *PICS* no controlados.

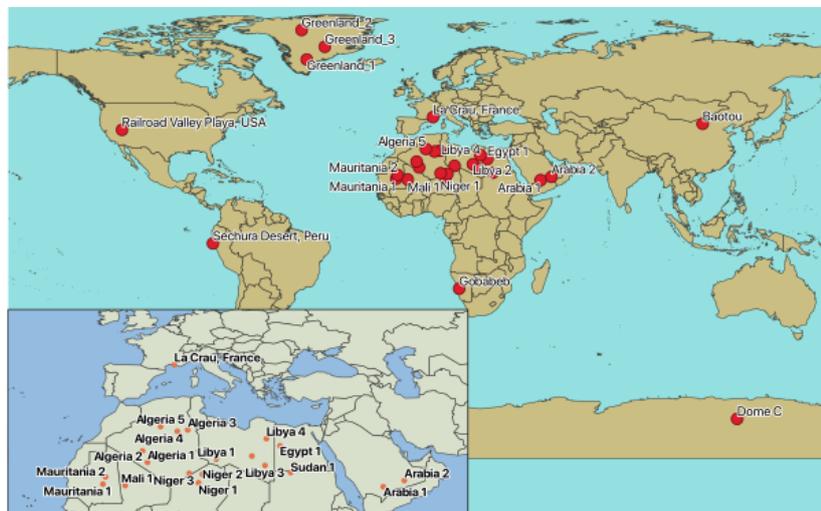


Figura 2.1: Distribución de *PICS* en la Tierra
Nota: el desierto de Sechura - Perú, aún en fase de evaluación



Figura 2.2: Imágenes de algunos *PICS* controlados
Fuente: USGS (2022) [39]



Figura 2.3: Imágenes de algunos *PICS* no controlados
Fuente: Lacherade et al. (2012)[36]

Lacherade et al. (2013) [35] analizaron *PICS* no controlados y sus características de homogeneidad cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.2, en ella se presentan solo los sitios que fueron finalmente utilizados en esta tesis, aunque al inicio se analizó una lista más larga.

Tabla 2.2: *PICS* no controlados analizados por Lacherade et al. (2013) [35]

<i>PICS</i>	Lat. central	Long. central	Homogeneidad Radiométrica	Promedio Altura(m)	σ Altura (m)
Arabia 1	18.88	46.76	muy homogéneo	672.8	54.7
Arabia 2	20.13	50.96	homogéneo	217.0	19.0
Argelia 3	30.32	07.66	homogéneo	235.0	33.0
Argelia 5	31.02	02.23	muy homogéneo	515.3	35.5
Libia 2	25.05	20.48	heterogéneo	359.6	46.0
Mali 1	19.12	-04.85	muy homogéneo	304.0	6.9
Mauritania 1	19.40	-09.30	homogéneo	386.1	9.1
Mauritania 2	20.85	-08.78	homogéneo	382.3	10.4
Nigeria 1	19.67	09.81	no homogéneo	583.2	56.4

Debido a la importancia del uso de *PICS* en calibración radiométrica en el marco de esta tesis, la técnica se detalla en un sub capítulo aparte.

c) Calibración cruzada:

La técnica de calibración cruzada (en adelante *CrossCal*) se basa en comparar las mediciones de dos o más sensores sobre una misma zona, empleando uno de ellos como referencia (en adelante *Ref*) y al otro(s) como sensor(es) por calibrar (en adelante *Cal*). La *CrossCal* puede realizarse bajo un enfoque de radiancia o de reflectancia al TOA [20, 21, 37, 24, 40, 28]. Teóricamente se puede realizar *CrossCal* sobre cualquier superficie, sin embargo es preferible realizarlo sobre sitios de calibración que cuenten con propiedades reflectivas adecuadas. Debido a la importancia de esta técnica en el marco de esta tesis, se detalla en un sub capítulo aparte.

d) Calibración empleando la Red de Calibración Radiométrica:

La red de calibración radiométrica (en adelante *RadCalNet*) es una iniciativa del Grupo de Trabajo de Calibración y Validación de Committee on the Earth Observation Satellite (*CEOS*). Proporciona perfiles de reflectancia de superficie y al TOA traceables por el sistema internacional de unidades (*SI*) para calibración y validación radiométrica post-lanzamiento en el dominio óptico (*VIS*, *NIR* y *SWIR*). El acceso a los datos es gratuito y proporciona un archivo histórico con incertidumbres asociadas. Los datos se presentan en un intervalo espectral de 10 nm, para un rango de λ desde los 380 nm - 2,500 nm a intervalos temporales de 30 minutos, y la reflectancia al TOA se predice en proyección al *Nadir*. Debido a la importancia de uso de *RadCalNet* en el marco de esta tesis, la técnica se detalla en un sub capítulo aparte.

e) Sobrevuelo simultáneo al nadir:

Esta técnica, aunque podría considerarse más un enfoque, se emplea para *CrossCal* de dos sensores que coincidan espacial, temporal y geoméricamente. Se basa en la suposición de que las condiciones atmosféricas son idénticas para ambos, siendo la variable más influyente la diferencia entre sus respectivos *SRF*. Se siguen los mismos principios de *CrossCal* (que se detallan mas adelante), pero con la diferencia de que la hora de adquisición debe ser la misma o muy cercana. La mayor dificultad es encontrar la coincidencia temporal y espacial de las adquisiciones.

Los requisitos de diferencia temporal no están definidos concretamente, algunos trabajos realizados han usado intervalos de 10 - 30 minutos y otros una hora de diferencia [25, 41, 42]. Por otro lado, *Ref* y *Cal* pueden ser del tipo *GEO* y/o *LEO* con sus respectivas combinaciones, estableciéndose procedimientos específicos en cada caso.

f) Otros métodos y técnicas de calibración:

Existen otros enfoques, métodos y técnicas para *RadCal*, algunos autores separan la *CrossCal* como una técnica independiente de los métodos vicarios [37, 20, 43]. Al respecto, la clasificación presentada en esta tesis se basa en Liang (2017) [24] y Barrientos et al. (2016) [25], y es específica para calibración en el espectro *VIS-NIR*. Otros métodos de *AbsCal* conocidos son:

- Calibración con nubes convectivas profundas (*DCC*, por sus siglas en inglés), y
- Calibración con la Luna, estrellas u otros cuerpos celestes [36, 44].

Estos últimos métodos no son aplicables a *PerúSAT-1* tanto por la no disponibilidad de datos *DDC* como por sus restricciones operacionales de agilidad que no permiten adquirir imágenes de la Luna.

2.4. Calibración radiométrica basada en *PICS*

El uso de *PICS* se encuentra generalizado para ejecutar calibración radiométrica. Para la implementación de técnicas basadas en *PICS* la selección de los sitios es importante pero la disponibilidad de imágenes es crítica. Emplear *PICS* controlados convierte a la técnica en una calibración de campaña de campo vicaria. En cambio, para los no controlados, existen las siguientes técnicas:

a) Análisis multitemporal de tendencias en la reflectancia:

Es la técnica más antigua y empleada con respecto al uso de *PICS* en *RadCal*. Se basa en la suposición de que los sitios son invariantes temporalmente, aunque pueden existir pequeñas variaciones en la reflectancia debido a los ángulos de iluminación y cambios atmosféricos. Sin embargo, las variaciones en la atmósfera ocurren normalmente en pequeños períodos de tiempo (de allí el prefijo “Pseudo”), y los efectos angulares pueden ser procesados si se cuenta con información suficiente de las condiciones de adquisición [21, 34, 45, 46, 47].

Los pasos principales en esta técnica son:

- Adquisición de imágenes sobre los sitios
- Eliminación de zonas nubosas y/o elementos que afecten la homogeneidad
- Corrección de los efectos de iluminación solar y de los ángulos de adquisición
- Cálculo del promedio de los valores de *ReflTOA* en regiones de interés (*ROI's*)
- Análisis de la evolución en función del tiempo
- Ajuste lineal o no lineal de la evolución de *ReflTOA*
- Predicción de coeficientes usando el ajuste y cálculo del error

A menudo es suficiente un ajuste lineal para determinar la evolución; sin embargo, la limitación principal es el período temporal de adquisiciones. Para obtener cálculos precisos de tendencias a largo plazo, se requiere un set de datos mayor a 3 años y el empleo de varios *PICS* [24].

b) Calibración cruzada basada en *PICS*:

Dado que los *PICS* abarcan grandes áreas y tienen una alta estabilidad, es posible usar sensores con distintos *GSD*, y no es obligatorio que las adquisiciones se realicen simultáneamente, pero se debe considerar la geometría de las adquisiciones y las diferencias en *SRF*. Siempre es recomendable separaciones temporales cortas para evitar cambios en las condiciones de iluminación solar. El requisito principal es que *Ref* debe estar correctamente calibrado, de lo contrario transferirá errores a *Cal*. Por otro lado, para ajustar los efectos de las diferencias en *SRF* es necesario calcular y aplicar el factor de ajuste espectral de bandas (*SBAF*, por sus siglas en inglés) el cual permite escalar radiométricamente los valores medidos por ambos sensores. Para calcular el *SBAF* se debe emplear un perfil de reflectividad del sitio en el rango de λ sobre el que se trabaja (Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2) [33, 48, 49, 50, 41, 51, 20, 52, 17, 43].

$$SBAF = \frac{\frac{(\int \rho_{\lambda} RSR_{\lambda(Cal)} d_{\lambda})}{(\int RSR_{\lambda(Cal)} d_{\lambda})}}{\frac{(\int \rho_{\lambda} RSR_{\lambda(Ref)} d_{\lambda})}{(\int RSR_{\lambda(Ref)} d_{\lambda})}} \quad (2.1)$$

Función de ajuste espectral de bandas

Fuente: Chander (2013) [33] & Barrientos et al. (2016) [25]

Donde :

- ρ_{λ} : Perfil de reflectividad del sitio
- $SRF_{\lambda(Cal)}$: SRF del sensor a calibrar
- $SRF_{\lambda(Ref)}$: SRF del sensor de referencia

$$\bar{\rho}_{\lambda(Cal)} = \frac{\bar{\rho}_{\lambda(Cal)}}{SBAF} \quad (2.2)$$

Aplicación del $SBAF$

Fuente: [33, 25]

Donde :

- $\bar{\rho}_{\lambda(Cal)}$: Reflectancia compensada al TOA del sensor a calibrar
- $\bar{\rho}_{\lambda}$: Reflectancia al TOA del sensor a calibrar

En esta técnica es también importante considerar la $BRDF$, cuyo cálculo exacto requiere trabajo de campo con equipos especializados, lo que complica el determinar los modelos de anisotropía de las superficies, especialmente en $PICS$ no controlados que normalmente se ubican en sitios remotos [26, 53, 54, 55, 20]

Para simplificar este proceso, Lacherade et al. (2013) [35] han propuesto ampliar la ventana de posibilidades sin que la $BRDF$ afecte los cálculos o, en todo caso, sus efectos sean desdeñables. Para ello, plantean que se puede obviar su aplicación en $CrossCal$ sobre $PICS$, si se cumple con ciertos umbrales basados en los valores angulares de las geometrías de adquisición de Ref y Cal (Ecuación 2.3).

$$\begin{aligned} |\theta_s^{Cal} - \theta_s^{Ref}| &< 2^{\circ} \\ |\theta_v^{Cal} - \theta_v^{Ref}| &< 2^{\circ} \\ ||\varphi_s^{Cal} - \varphi_v^{Cal}| - |\varphi_s^{Ref} - \varphi_v^{Ref}|| &< 5^{\circ} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Umbrales donde no se requiere el cálculo de $BRDF$

Fuente: Lacherade et al. (2013) [35]

Donde :

- θ_s, φ_s : Ángulos solares cenital y azimutal
- θ_v, φ_v : Ángulos de vista cenital y azimutal
- Observación : Rangos ampliables a 5° y 10° si la base de datos es insuficiente

Por otro lado, también es necesario considerar la precisión en geolocalización de las imágenes, ya que no todos los *EOS* tienen el mismo desempeño en este aspecto. Típicamente, la precisión en geolocalización se calcula mediante el *CE90* en metros. *PerúSAT-1* tiene un desempeño en geolocalización de 25 m *CE90* en condiciones de baja pendiente superficial y latitudes bajas.

En el año 2022, se realizó una evaluación global de su error en geolocalización considerando una muestra general, tanto al nadir como fuera del nadir. Los resultados se muestran en la Figura 2.4. En esta figura se observa que, para un error circular al 90 % de los píxeles, la localización de estos en el terreno puede variar hasta ~ 26.6 m, diferenciándose espacialmente de píxeles de imágenes capturadas por otros sensores de mejor desempeño.

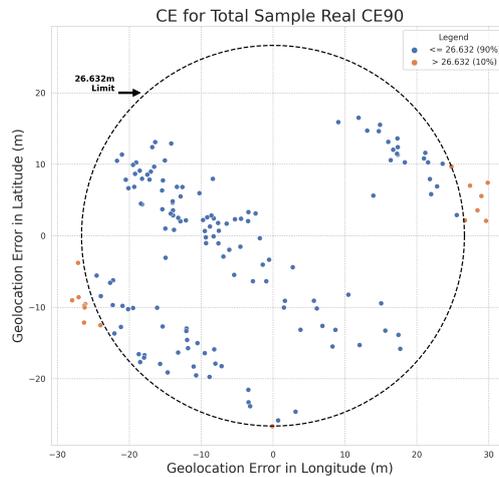


Figura 2.4: Precisión en geolocalización de *PerúSAT-1* calculada en el 2022

La pérdida de precisión en la geolocalización se origina principalmente debido a errores sistémicos y de procesamiento, como el apuntamiento, la dilatación de materiales, la precisión de los sistemas de posicionamiento a bordo y el uso de referencias precisas de puntos de control, entre otros. También influye la geometría de adquisición, como el ángulo de incidencia.

Para realizar la *CrossCal* correctamente, es necesario que las regiones de interés (*ROI*) utilizadas para *Ref* y *Cal* coincidan espacialmente. Por lo tanto, si las imágenes difieren en geolocalización, se deben corregir.

Asimismo, aunque la *CrossCal* se puede aplicar en un solo par de imágenes, es recomendable utilizar un conjunto de datos más amplio para evitar errores aleatorios, promediando las mediciones [33].

De cumplirse con los umbrales de la Ecuación 2.3, la técnica sigue los siguientes pasos:

- Adquisición de imágenes sobre sitios coincidentes
- Corregistro de imágenes
- Cálculo del promedio de L_λ o $ReflTOA$ en ambos sensores
- Corrección de los efectos de los ángulos de iluminación solar y de adquisición
- Cálculo y aplicación del $SBAF$
- Cálculo de la ratio de ajuste entre ambos sensores
- Cálculo de los nuevos coeficientes de calibración para Cal

2.5. Calibración radiométrica basada en datos de RadCalNet

Existen 5 sitios de calibración *RadCalNet* a los que se puede acceder mediante su portal web (Tabla 2.3). Todos los datos que brinda la red se encuentran en valores de reflectancia. La incertidumbre de la predicción al TOA es estimada al 5%, el cual es un valor típico requerido para misiones espaciales de monitoreo de superficies continentales. Esto limita su empleo para casos en los que la misión requiere mayor precisión radiométrica, como por ejemplo el color de los océanos [56, 57].

Tabla 2.3: Sitios de calibración disponibles en RadCalNet

Sitio	Lat. central	Long. central	Área oficial	País
Railroad Valley Playa (<i>RVUS</i>)	38.497	-115.690	1 km × 1 km	USA
La Crau (<i>LCFR</i>)	43.559	4.864	20 km × 20 km*	Francia
Gobabeb (<i>GONA</i>)	-23.600	15.119	60 m × 60 m**	Namibia
Baotou (<i>BTCN</i>)	40.851	109.629	200 m × 200 m	China
Baotou Sand (<i>BSCN</i>)	40.866	109.615	300 m × 300 m	China

* Requiere evaluar la homogeneidad del sitio para seleccionar *AOIs*

** Correspondiente a un área circular de 30 m de radio

Los sitios de RadCalNet son lo suficientemente grandes como para ser empleados por sensores de mediana, alta y muy alta resolución. Estos sitios son controlados por organizaciones expertas como el *CNES* (Centre National d'Etude Spatiales) de Francia, la *CAS* (Chinese Academy of Sciences) y la *ESA* (European Space Agency). Cada sitio posee características generales y particulares. Entre las características generales se encuentran la estabilidad atmosférica y la cuasi-lambertianidad. Y entre las características particulares se incluyen la organización a cargo, el tipo de superficie, las propiedades reflectivas del sitio y los equipos que se emplean para las mediciones. El *BTCN* es el único sitio que utiliza una superficie artificial como referencia, mientras que los demás utilizan superficies naturales [58, 57, 59].

Todos los sitios que conforman *RadCalNet* están equipados con instrumentos automatizados o semiautomatizados para medir la reflectancia de la superficie y datos atmosféricos. Aunque no existe un estándar para los equipos, las organizaciones realizan las mediciones sujetas a revisión por pares y a una comparación rigurosa que garantiza su consistencia y trazabilidad al *SI*. Después de realizar las mediciones, se generan productos en nivel 2 para que sean procesados y evaluados de forma centralizada utilizando el Código de Transmisión Atmosférica de Resolución Moderada (*MODTRAN*). Finalmente, los resultados se publican

como datos hiperespectrales en intervalos temporales de 30 minutos con proyección al nadir (Figura 2.5). La consistencia radiométrica de todos los sitios es evaluada utilizando sensores de alto nivel de calibración como el *MSI* de Sentinel 2 [60, 61, 62].

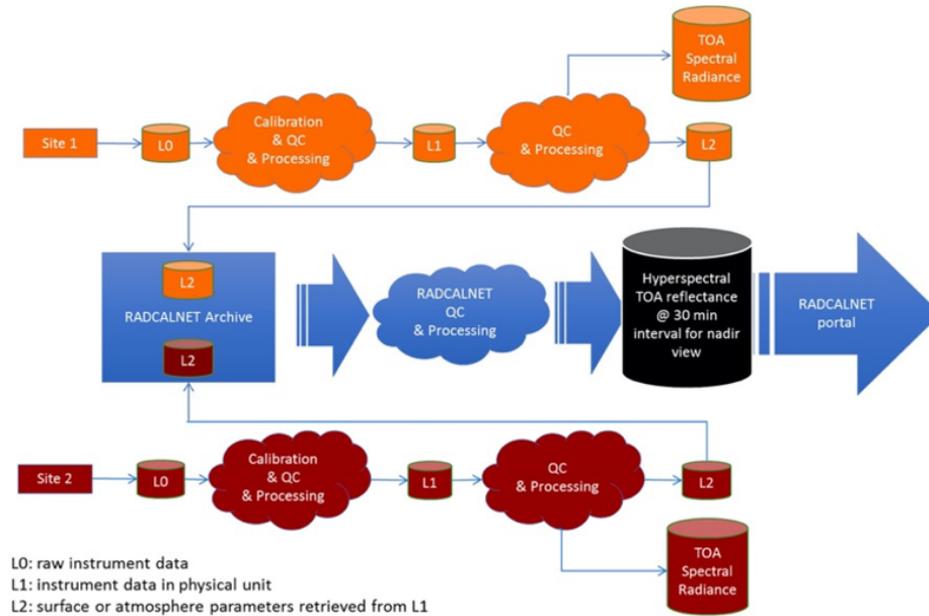


Figura 2.5: Esquema de proceso de RadCalNet

Fuente: Bouvet et al. (2019) [57]

Para realizar *AbsCal* utilizando los datos de *RadCalNet*, se sigue un proceso similar al de las campañas de campo vicarias. La diferencia radica en que la reflectancia de la parte superior de la atmósfera (*ReflTOA*) de referencia ya está calculada. En el desarrollo de la técnica, se debe aplicar la corrección de la función de respuesta espectral (*SRF*) del sensor a calibrar para los rangos de longitud de onda (λ) de cada banda, a fin de escalar radiométricamente las reflectancias medidas antes de compararlas con las de *RadCalNet*. La relación entre la *ReflTOA* de *RadCalNet* y la calculada para el sensor después de ser escalada a su *SRF* se utiliza para actualizar los coeficientes.

Usar *RadCalNet* tiene ciertas limitaciones, como la necesidad de coincidencia espacial de las adquisiciones con los sitios y que estas hayan sido tomadas en forma vertical debido a que la *ReflTOA* de *RadCalNet* se proyecta al nadir. Además, dado que los datos se entregan para cada 30 minutos, puede no haber coincidencia con la hora de adquisición, siendo necesario interpolar o utilizar los perfiles con menor diferencia de tiempo. Otra restricción puede estar dada por la disponibilidad de informes para la fecha de la adquisición, aunque existe una sólida base de datos que incrementa las posibilidades.

La calibración absoluta con *RadCalNet* se puede realizar mediante dos enfoques: (1) utilizando los valores de reflectividad de superficie para predecir la *ReflTOA* mediante modelos de transferencia radiativa (*RTM*, por sus siglas en inglés), a los cuales se les ingresan los datos atmosféricos disponibles; y (2) utilizando directamente los datos de *ReflTOA* provistos por la red.

2.6. Importancia de la calibración radiométrica

La precisión en el desarrollo de aplicaciones depende de la calidad de las imágenes utilizadas. La corrección de errores sistemáticos, así como la consistencia y precisión de las mediciones contenidas en dichas imágenes son fundamentales para los objetivos que se buscan. En el Capítulo 1.3, se agruparon las aplicaciones típicas de *PerúSAT-1* en tres categorías según la experiencia del Sistema Satelital del Perú (*SSP*). Las dos primeras categorías requieren una alta calidad gráfica y geométrica, lo cual implica corregir errores como el “stripping” que se genera por la señal de fondo y la respuesta individual relativa de los detectores (Figura 2.6).

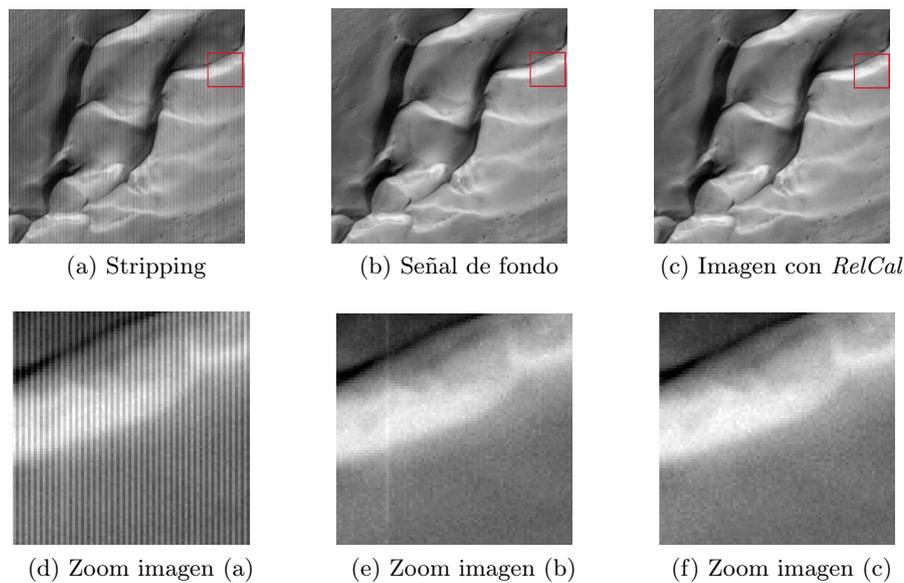


Figura 2.6: Corrección de errores sistemáticos en una imagen *PS1*

Para la tercera categoría, la precisión radiométrica es fundamental, en cuyo caso, considerando el efecto sobre los productos, y de acuerdo con lo descrito por Giri (2012) [28], las razones de mantener calibrado el sensor son:

- a) Para aplicaciones basadas en análisis temporales:
Las imágenes adquiridas en diferentes fechas permiten analizar la evolución de un fenómeno. Mantener actualizados los coeficientes de calibración garantiza que las mediciones radiométricas sean consistentes a lo largo del tiempo, lo que facilita el seguimiento y la comparación de los cambios en la superficie escaneada en diferentes momentos.
- b) Para aplicaciones multisensor:
Existe una gran cantidad de imágenes de *EOS* disponibles, algunas de las cuales son de libre acceso y ampliamente utilizadas por la comunidad de teledetección (por ejemplo, Landsat y Sentinel). Sin embargo, trabajar con imágenes de distintas fuentes requiere que todas ellas se escalen a un mismo estándar mediante la aplicación de sus respectivos coeficientes de *AbsCal* actualizados a la fecha de su adquisición.
- c) Para aplicaciones basadas en la calibración absoluta:
Algunas aplicaciones permiten generar productos especializados como los índices de vegetación; los que deben calcularse sobre medidas precisas para detectar las pequeñas

diferencias que suelen obtenerse. La *AbsCal* permite reducir los márgenes de error en estos cálculos y determinar los valores de incertidumbre en los productos finales.

d) Para aplicaciones basadas en mosaicos:

A veces las imágenes individuales no ocupan toda un área de interés (*AOI*) por lo que se usan varias de ellas para generar un producto único. Sin embargo, las imágenes de distintas fechas difieren radiométricamente entre sí debido a distintas geometrías de adquisición, irradiancia solar y al nivel de degradación temporal de los sensores. Es necesario calibrar las imágenes según su fecha de adquisición antes de la generación de los mosaicos, especialmente si se usan datos con grandes diferencias de tiempo.

e) Para aplicaciones basadas en la corrección de la reflectancia de superficie:

Muchas aplicaciones especializadas utilizan la reflectividad a nivel de superficie, para ello se elimina el efecto atmosférico empleando modelos de simulación de la atmósfera lo cual requiere calcular valores precisos de L_λ a fin de evitar la acumulación de errores en la simulación. Siendo los coeficientes de calibración los factores que escalan los DN a radiancia, es necesario mantenerlos siempre actualizados.

La *RelCal* se enfoca en corregir la respuesta individual no uniforme de los detectores y sustraer la señal en oscuridad, garantizando así la uniformidad y calidad gráfica. Por otro lado, la *AbsCal* garantiza la utilidad de los datos en aplicaciones cuantitativas. En el caso de sensores que no realizan *RadCal* de manera sistémica (empleando *OBC*), es necesario establecer procesos técnicos y operativos para analizar los datos y programar adquisiciones en sitios de calibración, con el fin de calcular los coeficientes de *PRNU*, *DSNU*, *GAIN* y *OFFSET*. El proceso general comienza con la revisión del diseño del sistema.

La calibración radiométrica (*RadCal*) es de suma importancia para los usuarios de los satélites (*EOS*). Las organizaciones administradoras u operadoras deben llevar a cabo esta actividad de forma periódica para analizar la degradación temporal de los sensores en el Espacio, debido a factores como la contaminación y la exposición a altas radiaciones. Estos fenómenos son inevitables y requieren una actualización constante de los coeficientes de calibración. De esta manera, se asegura que el comportamiento radiométrico del sensor se mantenga ajustado a los cambios a lo largo del tiempo. Las agencias responsables de los satélites se encargan de realizar esta tarea y comunican los resultados a los usuarios a través de los metadatos u otros medios [63, 64].

2.7. Las etapas de calibración radiométrica

La realización de la calibración radiométrica (*RadCal*) implica dos etapas principales. La primera etapa es la calibración pre-lanzamiento, que es llevada a cabo por el fabricante en un entorno de laboratorio. Uno de los métodos comunes empleados es el uso de una fuente de integración esférica de radiancia (*SIS* por sus siglas en inglés). Durante esta etapa, se caracteriza el comportamiento radiométrico del sensor en su totalidad, incluyendo la *SRF*, la porción de *EMS* que cada banda captura y los coeficientes *GAIN*, *OFFSET*, *PRNU* y *DSNU*. Sin embargo, es importante destacar que esta etapa solamente garantiza el rendimiento del sensor antes de su lanzamiento [28, 20, 47].

La segunda etapa es la calibración post-lanzamiento o en vuelo, la cual es realizada por las organizaciones encargadas de administrar u operar los sistemas satelitales. Esta etapa se extiende a lo largo de toda la vida útil del satélite y es necesaria para mantener actualizados los

coeficientes de calibración a medida que el sensor experimenta degradación. Algunos autores como Morain & Budge (2004) [65] y Kacker & Yoon (NIST, 2015) [26] sugieren que también se realice un proceso de calibración inmediatamente después del lanzamiento del satélite (conocido como “Early Launch”). En el caso específico de *PerúSAT-1*, esta etapa correspondería a la fase de pruebas en órbita (*IOT* por sus siglas en inglés). La calibración en vuelo es necesaria debido a que las condiciones de la calibración pre-lanzamiento no son perfectas. Por ejemplo, la temperatura de color lograda en el laboratorio no simula completamente el efecto atmosférico real, por lo que se requiere ajustar los coeficientes al comienzo de la vida operativa del satélite (*BOL* por sus siglas en inglés) [28, 20].

En el próximo capítulo...

El capítulo siguiente es denominado *PERÚSAT-1* y en él se presenta al satélite peruano explicando sus características principales y su empleo.

Capítulo 3

PerúSAT-1

¡¡ Arriba, . . . Siempre Arriba !!

Postrimeras de Jorge Chávez Dartnell
Aviador Franco - Peruano
Estribillo del Himno de la Fuerza Aérea del Perú

3.1. Presentación general del satélite

PerúSAT-1 es el primer satélite de observación de la Tierra del Perú, su administración operacional está a cargo del Centro Nacional de Operaciones de Imágenes de Satélite (*CNOIS*) perteneciente a la Agencia Espacial del Perú - CONIDA (*CONIDA*). Provee de imágenes satelitales a organismos públicos peruanos para aplicaciones con fines de Defensa y Desarrollo Nacional. Fue lanzado en setiembre de 2016 entrando en fase operacional en diciembre del mismo año, a la fecha ya ha cumplido más de 6 años en servicio.

Fue fabricado por la empresa Airbus Defence and Space (en adelante *ADS*), como resultado de la experiencia de dicha empresa en misiones como Pleiades 1A & B, SPOT 6 & 7, Ingenio, KazEOSat-1, Sentinel 2 A & B y Sentinel 5P. Tiene una masa de 430 kg, su sistema óptico es ultra compacto basado en la tecnología de Carburo de Silicio óptico (SiC); dispone de múltiples arreglos de detectores y planos focales integrados y sus características principales se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características principales de *PerúSAT-1*

Característica	Descripción
agilidad (en roll)	$\pm 35^\circ$
altura de referencia	~ 712 km
hora local ascendente (al Ecuador)	22:25:00 UTC
hora local descendente (al Ecuador)	10:25:00 UTC
inclinación de órbita	$98,191^\circ \pm 0,027^\circ$
sistema óptico	Korsch de SiC
tiempo de vida útil	10 años

Fuente: eoPortal (2016) [66]

3.2. Carga útil de *PerúSAT-1*

La carga útil del satélite la conforma el sensor *NAOMI* de tipo pushbroom (Figura 3.1) alojado en una plataforma espacial del tipo *Astrobis S*. Sus características generales se detallan en la Tabla 3.2

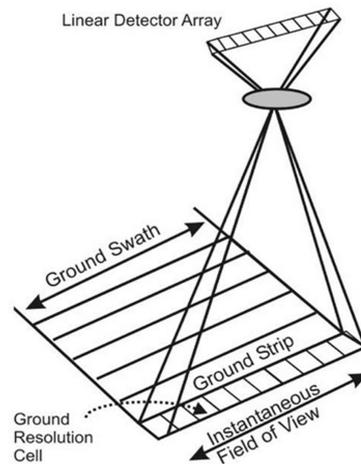


Figura 3.1: Esquema de un sensor tipo “pushbroom”

Tabla 3.2: Características generales del sensor *NAOMI*

Característica	Descripción
<i>GSD</i> @ nadir MS	~ 2,8 m
<i>GSD</i> @ nadir PAN	~ 0,7 m
sistema óptico	Korsch de SiC
swath @ nadir	~ 14,5 km
tipo de Escaneo	Pushbroom
cuantificación nominal	12 bits

Fuente: eoPortal (2016) [66]

El sistema óptico tiene un diámetro de apertura de 640 mm. Este sistema permite el ingreso de *EEM* a 3 retinas o sub-cámaras denominados “A”, “B” y “C”. Cada retina tiene 2 grupos de arreglos o conjunto de detectores, un único para la banda pancromática (*PAN*) y otro compacto de 4 sub-arreglos para las multiespectrales (*MS*). Para el arreglo *MS*, la *EEM* se separa según los rangos espectrales que le corresponde a cada banda a través de filtros. Esto significa que cada adquisición de *PerúSAT-1* genera 15 matrices de datos.

Las bandas son denominadas respectivamente “MS0” (azul), “MS1”(verde), “MS2”(rojo), “MS3”(NIR) obsérvese que la notación empieza con cero. Existe una relación proporcional de 4 entre la cantidad de detectores *MS* y *PAN*. Asimismo, entre retinas hay un solape aproximado de 288 en *PAN*, y 72 píxeles en *MS*, lo cual es importante conocer para los procesos de *RelCal* ya que estos se realizan por retina. Las imágenes que entrega el sistema a los usuarios es una sola *PAN* y/o *MS* compuesta por la unión de las retinas. La cantidad de detectores por retina y banda se describen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Detectores por retina y banda

Retina y Banda	Cantidad	Total
Retina A,B,C PAN	7,000	21,000
Retina A,B,C MS [0-3]	1,750	5,250

Fuente: eoPortal (2016) [66]

Las bandas de *PerúSAT-1* permiten captar rangos de λ en el rango *VIS* y *NIR* (Tabla 3.4). El ancho de cada banda varía entre ellas.

Tabla 3.4: Bandas y rangos espectrales de PS1

Banda	Rangos Espectrales	GSD (Nadir)
PAN	$0.450 \pm 0.010 \mu\text{m} - 0.750 \pm 0.010 \mu\text{m}$	$\sim 0.7 \text{ m}$
MS B0 (Azul)	$0.450 \pm 0.005 \mu\text{m} - 0.520 \pm 0.005 \mu\text{m}$	$\sim 2.8 \text{ m}$
MS B1 (Verde)	$0.530 \pm 0.010 \mu\text{m} - 0.590 \pm 0.010 \mu\text{m}$	$\sim 2.8 \text{ m}$
MS B2 (Rojo)	$0.630 \pm 0.010 \mu\text{m} - 0.700 \pm 0.010 \mu\text{m}$	$\sim 2.8 \text{ m}$
MS B3 (IRC)	$0.752 \pm 0.010 \mu\text{m} - 0.885 \pm 0.010 \mu\text{m}$	$\sim 2.8 \text{ m}$

Fuente: Metadatos DIMAP (*.XML) de imágenes *MS* y *PAN* de PS1

Observación: Los productos MS se generan en el orden: MS2, MS1, MS0, MS3

3.3. Características de las imágenes

Las características ópticas, tecnología de detección, tiempo de integración y definición de órbita de *PerúSAT-1* permiten obtener imágenes con un *GSD* de $\sim 0.7 \text{ m}$ para la banda pancromática y $\sim 2.8 \text{ m}$ para las bandas multiespectrales, tanto en escaneo horizontal como vertical. También se pueden producir imágenes MS submétricas mediante pansharpening. La resolución radiométrica nominal del sensor es de 12 bits pero los productos son remuestreados a 16 bits en formato *GEOTIFF*. En la Figura 3.2 se muestra una imagen de *PerúSAT-1* fusionada o pansharpened, mostrando la mina Cuaajone al sur del Perú y el nivel de detalle logrado.

La alta resolución espacial de las imágenes de *PerúSAT-1* es la característica que lo hace ideal para proyectos de pequeña y mediana escala, pero su baja resolución espectral significa que algunas aplicaciones muy especializadas necesitarán combinar sus imágenes con datos de otros sensores. Las imágenes de *PerúSAT-1* se clasifican de 3 maneras: (1) según el ángulo de incidencia (Tabla 3.5), (2) según los parámetros de programación (Tabla 3.6) y (3) según el nivel de procesamiento (Tabla 3.7).

Se empleará sucesivamente la definición de “imágenes de calibración” para referirnos a las imágenes clasificadas en el sistema según los parámetros de programación como “Calibration - Calibration”, y la definición de “imágenes en oscuridad” para referirnos a las imágenes “Calibration-Darkness acquisition”. Además, se utilizarán los términos “al Nadir”, “Cerca al nadir”, “Oblicua” y “Lejos del nadir” para clasificar las imágenes según el ángulo de incidencia bajo la codificación de “verticalidad”. La terminología de clasificación según los niveles de procesamiento se mantendrá como “*L0*, *L1*, *L2*, y *L3*”.

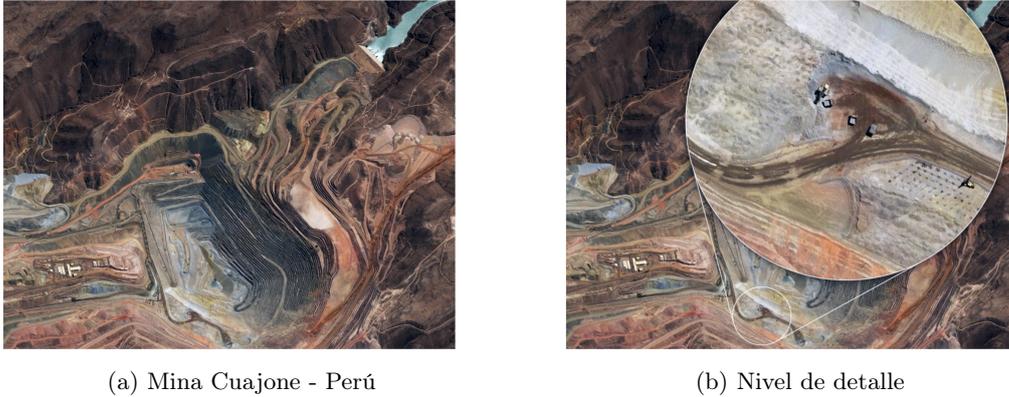


Figura 3.2: Imagen Pansharpened de *PS1*
Fuente: *CNOIS*

Tabla 3.5: Clasificación según ángulo de incidencia

Codificación *	Rango de incidencia
“Nadir”	0.00° - 0.18°
“Close to Nadir”	0.18° - 8.50°
“Oblique”	8.50° - 30.00°
“Far to Nadir”	30.00° - >30.00°

* Codificación según sistema, se usará otra terminología
Fuente: *CNOIS*

Estas clasificaciones son importantes de tener en cuenta en el proceso de calibración, por ejemplo para la técnica de *AbsCal* se requieren imágenes nominales en el nivel L3 por necesitarse que estén georeferenciadas y, en su mayoría, deben ser al Nadir (dependiendo de la técnica). Asimismo, para *RelCal* se deben usar imágenes de calibración y en oscuridad ambas en el nivel de proceso *L0* siendo para *DSNU* no es relevante el ángulo de adquisición, pero para *PRNU* es importante.

3.4. Aspectos operacionales

PerúSAT-1 se encuentra en órbita heliosincrónica es decir que la proyección al nadir de su paso por cualquier sitio de la Tierra es a la misma hora local. Su ciclo orbital completo es de ~ 26 días, y diariamente circula la Tierra unas ~ 14.586 veces, al final de su ciclo completo ha realizado ~ 379 órbitas.

La distancia mínima entre órbitas cercanas al final del ciclo completo es ~ 105.56 km en el Ecuador lo que disminuye conforme aumenta la latitud. El territorio peruano se ubica entre los $\sim 0^\circ$ - $\sim 18^\circ$ sobre el que la separación media es ~ 104.38 km. Considerando que posee un ancho de barrido relativamente pequeño, para adquirir imágenes sobre áreas que no se encuentran debajo de su huella orbital requiere de agilidad de giro en *Roll* y *Pitch*, generándose ángulos de incidencia distintos en cada adquisición.

Tabla 3.6: Clasificación según parámetros de programación

Codificación**	Descripción
“Nominal”	parámetros nominales de compresión y ecualización a bordo.
“Calibration”	baja compresión y no ecualización a bordo 1) “Calibration”: para imágenes PRNU * 2) “Darkness acquisition”: para imágenes DSNU

* Nótese que el término “calibration” se repite con la codificación origen

** Codificación según sistema, se usará otra terminología

Fuente: *CNOIS*

Tabla 3.7: Clasificación según nivel de proceso

Nivel de proceso	Proceso aplicado
<i>L0</i>	data cruda
<i>L1</i>	sustracción de señal oscura, y ecualización
<i>L2A</i> (primario)	unión de sub-imágenes en un solo marco
<i>L3</i> (ortorectificado)	georreferenciación y ortorectificación

Fuente: *CNOIS*

La agilidad total de PS1 es hasta 35° en *Roll* que le permite adquirir imágenes en zonas ubicadas incluso a ~ 705 km de la línea de proyección nadiral de su paso. Esto le permite adquirir imágenes cada 2 días sobre *AOI*'s ubicados entre las latitudes $\sim 66^\circ\text{S}$ - $\sim 66^\circ\text{N}$ a lo que denominamos “período de revisita”. A medida que aumenta la latitud, este período de revisita se reduce.

El “ciclo de repetición” de las adquisiciones bajo condiciones orbitales similares puede ocurrir aproximadamente cada 26 días, aunque esto depende de varios aspectos operacionales como la cantidad de requerimientos y los modos de adquisición programados. A diferencia de otros sistemas de escaneo permanente al nadir, el “ciclo de repetición” de *PerúSAT-1* sólo permite una mayor probabilidad de obtener imágenes bajo la misma geometría de adquisición cada 26 días pero dependerá de la programación.

PerúSAT-1 tiene tres modos de adquisición: “Spot” o puntuales, “Datastrip” o franjas de imagen y “Área” para imágenes de anchos superiores al Swath nominal (Figura 3.3).

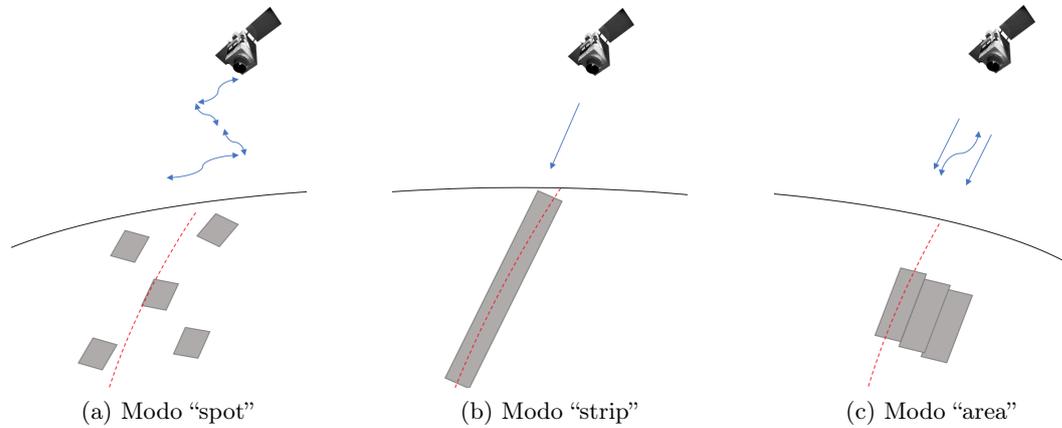


Figura 3.3: Modos de adquisición de *PerúSAT-1*

El modo “Spot” de adquisición de imágenes permite obtener imágenes relativamente pequeñas en longitud y requiere una alta agilidad del satélite para adquirir sobre áreas de interés separadas (*AOIs*). El rendimiento en términos de área adquirida por tiempo de órbita puede variar.

El modo “Datastrip” permite la adquisición de imágenes largas con un movimiento mínimo del satélite, lo que optimiza la disponibilidad de órbita y ofrece la mejor relación área adquirida por tiempo de órbita.

El modo “Área” implica la adquisición de imágenes sobre *AOIs* con anchos superiores al ancho de barrido nominal, y se adquieren imágenes paralelas para completar la cobertura requerida. En este modo, el movimiento necesario del satélite ocupa un tiempo considerable, lo que reduce la disponibilidad de órbita para otras adquisiciones y resulta en una relación área adquirida / tiempo de órbita menos óptima.

Un modo especial adicional es el de adquisiciones de imágenes estéreo y triestéreo, es decir, 2 o 3 imágenes del mismo *AOI* durante la misma órbita, lo que resulta en la relación área adquirida por tiempo de órbita más baja de todos los modos.

PerúSAT-1 logra su agilidad de giro en *Roll*, *Pitch* y *Yaw* mediante el control permanente de la actitud del satélite. Las imágenes nominales se adquieren en proyección descendente sobre la parte de la Tierra iluminada por el Sol. También es posible adquirir imágenes en proyección ascendente (de sur a norte) en eclipse, pero estas operaciones están reservadas únicamente para calcular la señal en la oscuridad (*DSNU*).

Otro efecto importante de las condiciones operacionales se refiere al ancho de barrido, cuyo valor nominal es ~ 14.5 km (al Nadir), pero puede variar según el ángulo de incidencia. Por lo tanto, la única dimensión que se puede definir durante la programación del satélite es la longitud de la adquisición, mientras que el ancho dependerá de las condiciones operacionales.

Las condiciones operacionales influyen en el proceso de calibración vicaria en varios aspectos. En primer lugar, las imágenes normalmente tendrán ángulos de incidencia distintos, incluso en casos donde corresponden a fechas y ciclos de repetición. Es importante corregir sus efectos en todas las técnicas, especialmente en el análisis de tendencias.

En segundo lugar, debido al tipo de órbita heliosincrónica, *PerúSAT-1* pasa siempre por el cenit de cualquier lugar del planeta a la misma hora, independientemente de la iluminación del sitio. Esto es importante para adquirir imágenes en oscuridad para el cálculo de *DSNU*. Además, esta característica permite planificar operaciones sobre áreas en los que puede coincidir con otros satélites para realizar técnicas de calibración cruzada.

Por último, el ángulo de incidencia generado por las condiciones operacionales influye en la precisión de la geolocalización. Puede haber desplazamientos de píxeles de aproximadamente 25 metros en comparación con imágenes de otros satélites con mejor rendimiento, e incluso entre las propias imágenes de *PerúSAT-1* adquiridas en fechas distintas. Por esta razón, es necesario corregir las imágenes con respecto a una referencia para minimizar efectos en los cálculos de calibración.

Las condiciones operacionales pueden ser controladas, pero ello afecta el desempeño del sensor con respecto a los requerimientos de los usuarios y el cumplimiento de la misión específica del satélite. Esto quiere decir que el empleo de las imágenes de *PerúSAT-1* influye en las características operacionales del sistema.

3.5. El empleo de las imágenes de *PerúSAT-1*

El empleo de las imágenes de *PS1* en el Perú se encuentra ampliamente difundido en el sector público, donde se proporcionan de forma gratuita. En el sector privado, también se proporcionan de manera gratuita, pero solo para aquellos que las utilicen con fines de investigación científica y educación. Los usuarios del sistema se clasifican según las características funcionales de sus sectores.

Al mes de setiembre de 2022, el uso de las imágenes de *PS1* en el Perú se muestra en la Figura 3.4. Se puede observar que el mayor porcentaje de uso se concentra en las categorías de “Gestión de Riesgos de Desastres” y “Seguridad y Defensa”. Estas categorías de usuarios, debido a la naturaleza de sus actividades, utilizan las imágenes principalmente como referencia visual en momentos específicos (ver Capítulo 1.3). Por otro lado, los demás usuarios emplean las imágenes en una variedad más amplia de aplicaciones.

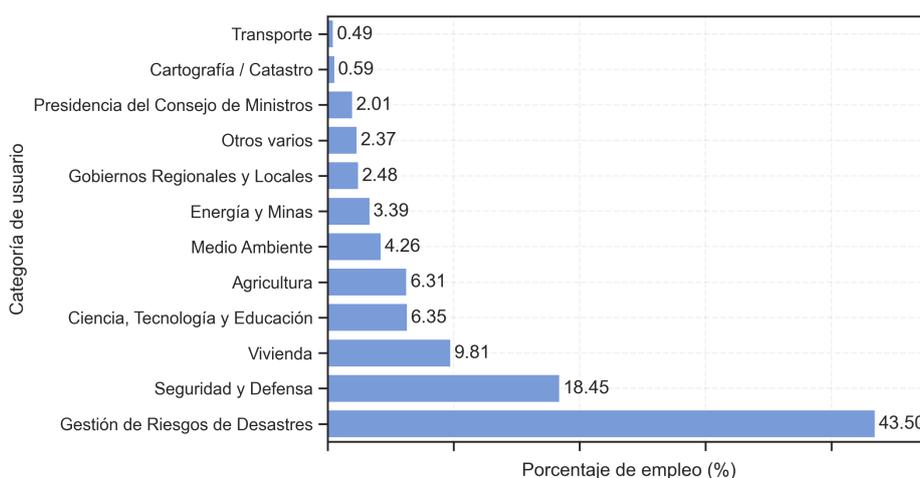


Figura 3.4: Empleo de las imágenes de *PerúSAT-1*

Fuente: Centro Nacional de Operaciones de Imágenes de Satélite (*CNOIS*)

Los usuarios que se benefician en mayor medida de las imágenes de *PerúSAT-1* se consideran prioritarios, debido a que sus actividades están estrechamente relacionadas con la protección de la vida y la integridad física de las personas. Esta prioridad cobra mayor importancia en un país que enfrenta frecuentes desastres naturales y diversas amenazas a la seguridad, como el narcotráfico, el terrorismo, la minería ilegal y la tala ilegal, entre otros.

Debido a la prioridad y urgencia de atención a las categorías de usuarios más importantes, la programación de adquisiciones se realiza lo más pronto posible y de acuerdo a la disponibilidad del satélite (periodo de revisita). Esto tiene un impacto directo en el Concepto Operacional (*CONOP*) del sistema y en la forma en que se programan las adquisiciones en general. La Figura 3.5 muestra la distribución porcentual de las imágenes según el ángulo de incidencia, lo que evidencia que la verticalidad al Nadir no es una prioridad en las operaciones estándar.

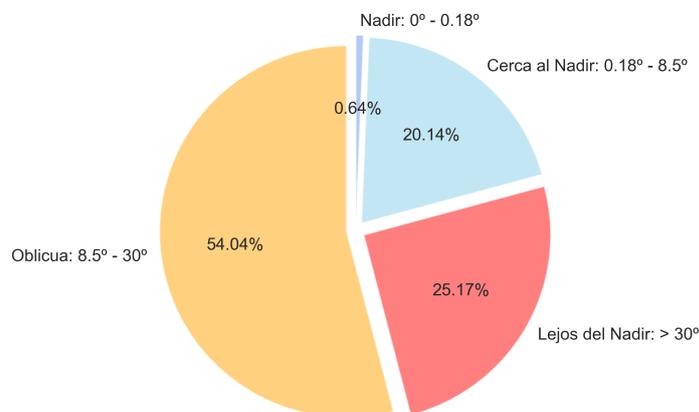


Figura 3.5: Distribución de imágenes por ángulo de incidencia

Fuente: *CNOIS*

En el contexto de esta tesis, esta situación es relevante debido a que, a pesar de contar con una cantidad significativa de datos que podrían ser utilizados en la calibración, es necesario establecer criterios adecuados de selección de muestras y definir los períodos de calibración en función de su disponibilidad.

3.6. Antecedentes de calibración radiométrica de PerúSAT-1

Considerando las etapas y tipos de calibración descritas en el Capítulo 2 y utilizando la información contenida en los metadatos de los productos de *PerúSAT-1* a diferentes niveles de proceso, así como también la información provista por el *CNOIS*, se detallan los antecedentes de calibración del satélite en la Tabla 3.8. Esta tabla sirve como base para la definición de la situación problemática a resolver y los objetivos de investigación, ya que proporciona información sobre las fechas y los tipos de calibración realizados previamente en el satélite.

Tabla 3.8: Fechas de calibración radiométrica realizada a *PerúSAT-1*

Etapa	Tipo	Fecha	Observación
Pre-lanzamiento	AbsCal	08-04-2016	Realizada por ADS
	RelCal	03-06-2015	Realizada por ADS
IOT*	AbsCal	No registra	
	RelCal	15-09-2016	Realizada por ADS
Post-lanzamiento	AbsCal	No registra	No registra
	RelCal	06-10-2016, 01-09-2017, 01-04-2018, 01-10-2018, 01-04-2019, 01-07-2019, 01-04-2020	Sin patrón temporal uniforme

Fuente: *CNOIS* y DIMAP de imágenes *PerúSAT-1*

* IOT: Corresponde al “early launch”

En el próximo capítulo...

El capítulo siguiente es denominado METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN: ESTRUCTURA Y FUNDAMENTOS, y en él se detalla la situación problemática, objetivos, variables y consideraciones que se tuvieron durante el desarrollo de la tesis.

Capítulo 4

Metodología de la investigación: estructura y fundamentos

4.1. Realidad problemática

A modo de resumen de los Capítulos 1, 2 y 3 la calidad de las imágenes satelitales asegura el éxito de las aplicaciones que se desarrollan a partir de ellas. Sin embargo, la degradación de los sensores de los *EOS* con el paso del tiempo afecta los valores y precisión de dichas imágenes. Para el sensor *NAOMI* a bordo de *PerúSAT-1* se requiere realizar *RelCal* y *AbsCal* siendo más crítica esta última, ya que no se ha realizado desde el lanzamiento del satélite. Por otro lado, las *RelCal* que se han realizado no han seguido un patrón o frecuencia temporal uniforme (Tabla 3.8 del Capítulo 3).

El Segmento Terrestre de Imágenes (Image Ground Segment - Segmento terrestre de imágenes. (*IGS*)) del Centro Nacional de Operaciones de Imágenes de Satélite (*CNOIS*) es responsable de la base de datos de carga útil, la producción de imágenes, y la administración de los parámetros de procesamiento de imágenes en Tierra (*GIPP*, por sus siglas en inglés). Estos parámetros son archivos en formato *XML* y contienen, entre otros, a los coeficientes *DSNU*, *PRNU*, *GAIN* y *OFFSET* (establecidos en cero) que se utilizan en la producción de imágenes. Por tanto, corresponde que *IGS* se encargue de la calibración de *PerúSAT-1*. Sin embargo, su personal se encuentra dedicado íntegramente a las operaciones satelitales y no tiene experiencia en el desarrollo o implementación de algoritmos.

PerúSAT-1 no cuenta con calibradores a bordo, por lo que no se puede realizar calibración radiométrica de forma sistémica-operacional. Tampoco existen sitios u organismos oficiales para *RadCal* en el Perú, e *IGS* no cuenta con equipamiento, presupuesto, logística, ni personal especializado para ello. Por estas razones, es necesario definir metodologías y/o procedimientos de *RadCal* adaptables, practicables y aceptables.

La adaptabilidad se refiere a que los procedimientos propuestos solucionen el problema de forma flexible, repetible y escalable en el futuro considerando las características del objeto en estudio. La practicabilidad se refiere a que sean viables técnica y operativamente, considerando los datos y recursos disponibles y/o que sean posibles de obtener. Y la aceptabilidad se refiere a que sean lo suficientemente consistentes, precisos, trazables y efectivos para ser aceptados e implementados de manera sistémica en el *CNOIS*.

Para solucionar el problema, se requiere no solo calcular los coeficientes de *RadCal* actuales, sino también estimar retrospectivamente los coeficientes de *AbsCal* hasta el inicio de su etapa operacional para actualizar los *GIPP*. De esa manera se garantiza la trazabilidad de la capacidad y consistencia radiométrica de *PerúSAT-1* entre sus propias imágenes adquiridas en distintas fechas y/o con las de otros sensores en los mismos rangos de longitudes de onda.

4.2. Justificación de la investigación

La justificación de esta investigación se basó en razones técnicas, económicas y metodológicas, combinando criterios de conveniencia, relevancia, practicidad, valor teórico y utilidad metodológica.

Por razones técnicas, se consideró que es necesario actualizar los coeficientes de *RadCal* de *PerúSAT-1* para garantizar el éxito de su misión, ya que son factores críticos que aseguran la utilidad de sus datos, especialmente en aplicaciones cuantitativas. Además, esta actualización permite la trazabilidad de su radiometría a estándares internacionales, lo que hace que su uso combinado con datos de otros sensores sea consistente. Los resultados de la investigación proporcionan una metodología de calibración adecuada a las características del sensor, así como los valores actuales de los coeficientes y los necesarios para actualizar los *GIPP* que se encuentran actualmente alojados en el sistema. Si se utilizan dichos coeficientes será la primera vez que se calibre completamente a *PerúSAT-1* desde su lanzamiento en septiembre de 2016.

Desde una perspectiva económica, se analizó que realizar *RadCal* mediante métodos de campo vicario era impracticable debido a consideraciones presupuestarias y logísticas. Además, estos métodos no eran completamente adaptables, ya que solo permitían calcular los coeficientes actuales y no en retrospectiva. Por lo tanto, fue conveniente definir métodos que permiten utilizar datos disponibles o fáciles de obtener, y que son suficientemente precisos y trazables para ser aceptados e implementados en el *CNOIS*.

En términos metodológicos, este estudio proporciona métodos de *RadCal* para un sensor de resolución submétrica con un campo de visión angosto, baja resolución espectral y una relativa baja precisión en geolocalización. Los métodos desarrollados emplearon datos propios de *PerúSAT-1* y de sistemas externos respaldados por agencias internacionales especializadas. Además, los algoritmos y métodos propuestos pueden ser implementados en el *CNOIS*, lo que permite repetir el proceso de manera sistémica para mantener el rendimiento y garantizar la precisión radiométrica de las imágenes de *PerúSAT-1* en aplicaciones cuantitativas con fines de Desarrollo y Defensa Nacional en el Perú.

4.3. Limitaciones de la investigación

Las limitaciones que se presentaron durante la investigación fueron:

- a) Se encontró una restricción de acceso a datos, documentación e informes del proceso de calibración pre-lanzamiento y durante el *IOT*. Esta restricción se debe a convenios de confidencialidad firmados entre Francia y El Perú a nivel gubernamental.
- b) Hubo periodos en los cuales no se realizaron adquisiciones de imágenes de *PerúSAT-1* sobre sitios de calibración controlados y/o no controlados, siendo el año 2017 uno de los más críticos.
- c) Se encontró poca disponibilidad de adquisiciones coincidentes entre *PerúSAT-1* y sensores de alto nivel de calibración como Sentinel 2. Esto se debe a que PS1 no escanea permanentemente la superficie, sino que es programado diariamente sobre *AOI*'s según los requerimientos de los usuarios. Además, las diferencias en geometrías de adquisición para calibración cruzada obligaron a descartar coincidencias, lo que redujo la cantidad de datos útiles.
- d) Se encontró la inexistencia o poca disponibilidad de datos hiperespectrales para la definición del perfil de reflectividad de los sitios, dato necesario para el cálculo del *SBAF* en calibraciones de tipo *CrossCal*.
- e) No fue posible hacer un filtrado de cobertura nubosa (*CCN*, por sus siglas en inglés) para los pedidos de imágenes, teniendo que revisarse visualmente las mismas para aplicar criterios de elegibilidad de muestras.

4.4. Esquema metodológico

La investigación científica es un proceso que requiere claridad, orden, sistematicidad, trazabilidad y reproducibilidad. Para lograr esto, es importante detallar aspectos como el tipo de investigación, el enfoque metodológico, el corte, diseño y delimitación. Además, se deben definir claramente las preguntas de investigación y los objetivos planteados, así como las variables de trabajo y su operacionalización. Estos detalles son fundamentales para comprender cómo se llevó a cabo el estudio, evaluar la consistencia de los resultados, compararlos con otros estudios similares y permitir la reproducibilidad de la investigación para futuros estudios o su aplicación en otros contextos [67, 68].

En el caso de esta investigación, se siguió el siguiente esquema metodológico:

- a) Tipo, enfoque, corte, diseño y delimitación:
El enfoque metodológico de la investigación fue de tipo aplicado, ya que se buscó aplicar la teoría existente para resolver una necesidad específica. Se utilizó un enfoque cuantitativo para analizar valores numéricos de magnitudes físicas escalables, tanto medidas como estimadas. El alcance del estudio fue descriptivo-comparativo, con el objetivo de caracterizar el comportamiento radiométrico del sensor y compararlo con referencias consideradas como reales.

En términos de diseño de investigación, se utilizó un diseño no experimental de corte longitudinal. Esto significa que se observaron las situaciones y los datos ya existentes a lo largo de un periodo de tiempo determinado. La delimitación temporal de la investigación abarcó desde el 26 de septiembre de 2016 hasta el 31 de octubre de 2022.

b) Preguntas y objetivos de investigación:

Del análisis de la realidad problemática, se definieron 2 preguntas de investigación a resolver, de las cuales la principal fue:

¿Cuáles son los valores actuales de los coeficientes de calibración radiométrica correspondientes a cada banda espectral del sensor NAOMI a bordo de PerúSAT-1?

La segunda pregunta fue:

¿Cómo han variado los valores de los coeficientes de calibración radiométrica correspondientes a cada banda espectral del sensor NAOMI desde el lanzamiento de PerúSAT-1 el 26 de setiembre del 2016 hasta el 31 de octubre del 2022?

c) Objetivos:

1) Objetivos generales:

- Determinar los valores actuales de los coeficientes de calibración radiométrica para las bandas espectrales del sensor *NAOMI* a bordo de *PerúSAT-1*.
- Analizar y definir la evolución de la capacidad de medición radiométrica del sensor *NAOMI* a bordo de *PerúSAT-1*.

2) Objetivos específicos:

- Determinar métodos y procedimientos factibles, precisos, trazables, asequibles y sencillos de implementar que permitan resolver la problemática planteada en la investigación.
- Evaluar el impacto que las *RelCal* podrían tener en el cálculo de los coeficientes de *AbsCal* para *PerúSAT-1*.
- Proponer mejoras operacionales y técnicas que puedan ser aplicadas a las técnicas de *RelCal* actualmente empleadas.
- Describir la evolución de la capacidad de medición radiométrica del sensor *NAOMI* desde el lanzamiento del satélite en septiembre de 2016.
- Calcular los coeficientes actuales de calibración para cada banda espectral.
- Inferir, en retrospectiva, los valores de los coeficientes de *AbsCal*; así como recalcular los coeficientes de *RelCal* para corregir los *GIPP's* de *IGS*.

d) Hipótesis:

En el ámbito de la investigación cuantitativa, las hipótesis se plantean con el objetivo de predecir numéricamente un hecho y suelen tener un alcance correlacional, explicativo o descriptivo. Esta investigación tuvo un alcance descriptivo-comparativo y habiendo transcurrido 6 años desde el lanzamiento de *PerúSAT-1*, se presumió que los coeficientes de *RadCal* variaron desde el lanzamiento del satélite. Sin embargo, la falta de suficientes antecedentes de calibración absoluta y de otros elementos de juicio impidieron formular una hipótesis de investigación concreta.

e) Variable principal, dimensiones y operacionalización:

La variable principal de investigación fue la radiometría, la cual engloba varios significados. En ciencias físicas, se refiere a la detección y medida de campos de radiación y sus magnitudes. En teledetección, a las mediciones realizadas por los sensores en forma de imágenes. Para esta investigación el término “radiometría” se refiere a los valores de medición de *EEM* registrados por *PerúSAT-1* y otros satélites, así como por instrumentos en tierra y los productos que de ellos se generaron dependiendo de la técnica empleada.

1) Dimensiones de la variable principal:

La radiometría en las imágenes de satélite es influenciada por diversos factores, los cuales se convierten en sus dimensiones de variable. Esta investigación se centró en los factores que afectan el cálculo de la ρ_λ al TOA para *AbsCal* (ver Capítulo 1) y en el registro de cuentas digitales (DN) para *RelCal*, excluyéndose otros, como la polarización de la *EMR*.

2) Operacionalización de la variable principal:

La operacionalización de la variable consiste en la descripción de las unidades de medida que se usaron en el procesamiento de la variable principal. Para esta investigación, la operacionalización realizada se describe en la Tabla 4.1 (página siguiente). Los valores de los indicadores en esa Tabla, a excepción de la orografía del terreno y desplazamiento de los píxeles, se extrajeron de los metadatos de las imágenes utilizadas y de *RadCalNet*.

Tabla 4.1: Matriz de operacionalización de la variable radiometría

Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	U.M.	Escala
Valores de reflectancia calculados en imágenes de satélite y/o por instrumentos en Tierra	Respuesta espectral	Ángulo azimutal solar (<i>SAA</i>)	grados sexagesimales	0° - 360°
		Ángulo cenital solar (<i>SZA</i>)	grados sexagesimales	0° - 90°
		Ángulo de visión azimutal (<i>VAA</i>)	grados sexagesimales	0° - 360°
Valores de reflectancia calculados en imágenes de satélite y/o por instrumentos en Tierra	Resolución espacial	Ángulo de visión cenital <i>VZA</i>	grados sexagesimales	0° - 90°
		Irrad. solar exo-atmosférica (<i>ESUN</i>)	$W \cdot m^{-2}$	~1371*
		<i>SRP</i>	Adimensional	0 - 1
		Fecha juliana de adquisición	adimensional (días)	0 - 365
		Hora de adquisición	adimensional (horas)	0 - 24
		Coef. <i>AbSCal**</i>	$(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})^{-1}$	Varias
		Coef. <i>DSNU**</i>	cuentas digitales (DN)	Varias
		Coef. <i>PRNU**</i>	adimensional	Varias
		Tamaño de píxel	metros	>0
		Desplazamiento respecto a coordenadas	metros	≥0
Geolocalización	Orografía del terreno	categórica	categórica	
Uniformidad espacial	Uniformidad espectral	Dispersión de valores en un conjunto de píxeles	desviación típica	>0
Reflectividad superficial	perfil hiperespectral	perfil hiperespectral	adimensional	0 - 1

* Valor referencial y para todo el rango de longitudes de onda, la irradiancia espectral varía según el ancho de banda y el modelo solar empleado, en este caso se usa como referencia el descrito por Gómez E. (2006) [19]

** Coeficientes de calibración actuales de *PerseusSAT-1*

Parte II

Materiales y Métodos: Datos y Procedimientos

Capítulo 5

Datos empleados

5.1. Estado inicial de los datos

En esta sección, se explica el estado de los datos al inicio de la investigación. Se utilizó un listado general provisto por el *CNOIS* que contenía la descripción de 66,547 imágenes adquiridas por *PerúSAT-1* durante el período de estudio. Dicho listado incluía datos básicos como la fecha, identificador, clasificación por parámetros de programación, entre otros (Figura 5.1). Posteriormente, se procesó el listado para obtener características adicionales, como la hora de adquisición, longitud de imagen y categorías de verticalidad, entre otras. Estos datos adicionales fueron necesarios para determinar las cantidades iniciales disponibles para cada técnica desarrollada.

Fecha_adq	ID_catalogo	Hora_adq	Tipo_adq	Subtipo_adq	Long_centro	Lat_centro	Angulo_incendencia	Nubes(%)	Verticalidad	Sitio
2016-09-20	DS_PER1_201609200731400_PS1_W140N05_005271	07:31:40	CALIBRATION	DARKNESS_ACQUISITION	-140.064	4.913	24.79	0	Oblicua	Pacifico_centro
2016-09-20	DS_PER1_201609202112207_PS1_W147N61_008431	21:12:20	NOMINAL	NOMINAL	-146.792	61.200	0.77	0	Cerca al Nadir	No_Cal_Site
2016-09-20	DS_PER1_201609201337410_PS1_W094S77_011855	13:37:41	CALIBRATION	CALIBRATION	-94.201	-76.642	14.21	0	Oblicua	Antartida_1
2016-09-20	DS_PER1_201609201801585_PS1_W112N36_005839	18:01:58	NOMINAL	NOMINAL	-111.970	36.146	27.04	0	Oblicua	No_Cal_Site
2016-09-20	DS_PER1_201609201803094_PS1_W106N35_003408	18:03:09	NOMINAL	NOMINAL	-106.460	35.209	38.53	0	Lejos del Nadir	No_Cal_Site
...
2022-10-31	DS_PER1_202210310521082_PS1_E087N49_004659	05:21:08	NOMINAL	NOMINAL	86.593	48.631	36.64	87	Lejos del Nadir	No_Cal_Site
2022-10-31	DS_PER1_202210310845059_PS1_E028N22_003894	08:45:05	CALIBRATION	CALIBRATION	27.998	21.897	4.19	0	Cerca al Nadir	Sudan_1
2022-10-31	DS_PER1_202210310205112_PS1_E128N37_008754	02:05:11	NOMINAL	NOMINAL	128.020	37.228	30.64	0	Lejos del Nadir	No_Cal_Site
2022-10-31	DS_PER1_202210310205592_PS1_E128N35_010615	02:05:59	NOMINAL	NOMINAL	128.295	35.186	21.05	0	Oblicua	No_Cal_Site
2022-10-31	DS_PER1_202210310207001_PS1_E128N35_009499	02:07:00	NOMINAL	NOMINAL	128.430	35.065	28.64	0	Oblicua	No_Cal_Site

Figura 5.1: Listado general de imágenes de *PS1* desde el 20/09/2016 hasta el 31/10/2022
Fuente: *CNOIS*

Existen 2 clasificaciones de imágenes de *PerúSAT-1* que son clave para la selección de datos: según parámetros de programación y según ángulos de incidencia (ver Cap. 3.3). Con base en estas clasificaciones, se realizó un análisis inicial que se resume en la Tabla 5.1 (las cantidades de interés se resaltan en negrita), lo que permitió medir el esfuerzo inicial.

Tabla 5.1: Total de imágenes disponibles según parámetros de programación e incidencia

Clasificación:	Nadir	Cerca al Nadir	Oblicua	Lejos del Nadir	Total válidas*
De calibración	41	1,250	755	266	1,291
En oscuridad	24	618	1,011	73	1,726
Nominal	362	11,534	34,199	16,414	11,896

* Total de imágenes útiles según requisitos de ángulos de incidencia

La evaluación de la distribución geográfica de las cantidades de imágenes de calibración y de oscuridad complementó la información obtenida del filtrado según los ángulos de incidencia. En la Figura 5.2 se observa que no todas las imágenes clasificadas como “en oscuridad” y “de calibración” se adquirieron en ubicaciones adecuadas. Al respecto, es fundamental contar con imágenes en oscuridad adquiridas en áreas sin iluminación, preferiblemente sobre océanos, para calcular el $DSNU$. Por otro lado, las imágenes necesarias para calcular el $PRNU$ deben ser obtenidas en $PICS$.

Las imágenes que se usan para $PRNU$ también pueden ser usadas en técnicas de análisis de tendencias y calibración cruzada sobre $PICS$ variando solo el nivel de proceso (L0 para $PRNU$ y L3 para $AbsCal$). En el caso de $RadCalNet$ la distribución geográfica demostró la existencia de imágenes para los sitios $RVUS$, $GONA$, $BTCN$, y $BSCN$ las cuales fueron adquiridas en el modo “Nominal” (Figura 5.3).

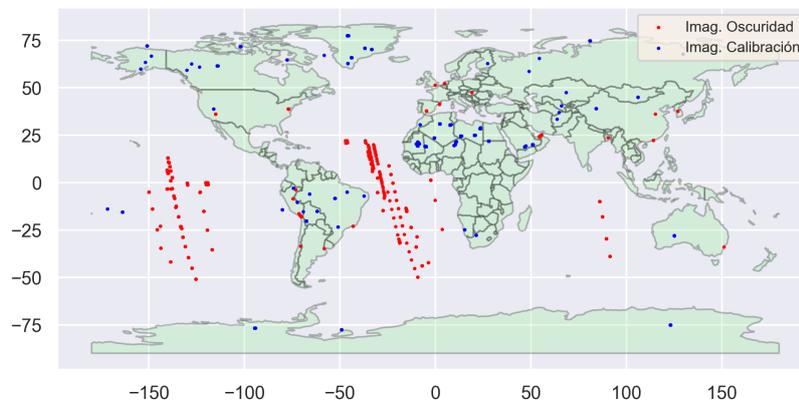


Figura 5.2: Distribución geográfica de imágenes de calibración y en oscuridad

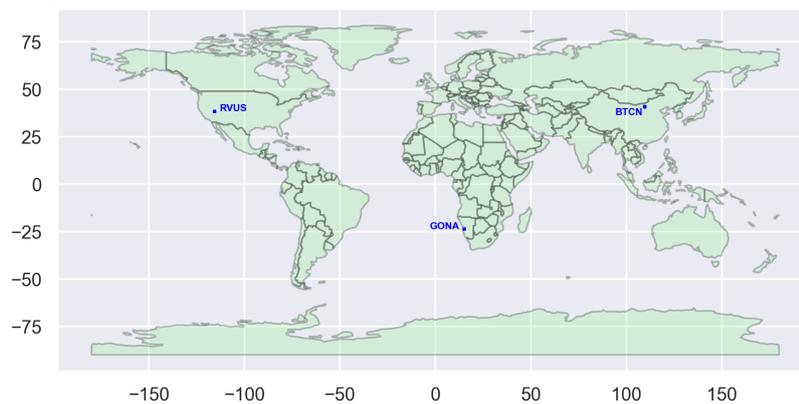


Figura 5.3: Distribución geográfica de imágenes sobre sitios de $RadCalNet$

La Tabla 5.2 muestra un resumen de todos los datos que cumplían con los requisitos básicos. Sin embargo, dado que cada técnica tiene sus propios requerimientos, se procedió a determinar criterios de elegibilidad y definir las muestras que finalmente se procesaron en cada procedimiento.

Tabla 5.2: Imágenes de *PS1* adquiridas sobre sitios de calibración al 31/10/2022

Tipo de <i>RadCal</i>	Sitio o Área	Cantidad	Rango de Fechas
<i>RelCal</i> / <i>DSNU</i>	Océanos	1665	20-09-2016 – 28-10-2022
<i>RelCal</i> / <i>PRNU</i> *	Antartida_1	14	21-09-2016 – 14-10-2019
	Arabia_1	70	26-09-2016 – 15-10-2022
	Arabia_2	62	14-12-2017 – 24-10-2022
	Argelia_1	52	14-01-2018 – 22-10-2022
	Argelia_3	88	30-09-2016 – 19-10-2022
	Argelia_5	93	10-10-2016 – 29-10-2022
	DOMEC	7	22-09-2016 – 09-12-2017
	Groenlandia_1	12	06-03-2018 – 23-08-2018
	Groenlandia_2	24	29-03-2018 – 25-08-2018
	Groenlandia_3	11	01-06-2018 – 23-08-2018
	Libia_1	98	13-12-2017 – 23-10-2022
	Libia_1a **	3	30-10-2016 – 25-11-2016
	Libia_2	95	24-09-2016 – 20-10-2022
	Libia_4	20	08-10-2016 – 15-08-2018
	Libia_4a **	55	20-02-2019 – 15-10-2022
	Mali_1	96	22-11-2016 – 27-10-2022
	Mauritania_1	85	20-11-2016 – 18-10-2022
	Mauritania_2	44	25-10-2016 – 18-10-2022
	Nigeria_2	93	06-12-2017 – 28-10-2022
	SalarUyuni_1	53	18-10-2016 – 18-10-2022
	Sudan_1	86	21-12-2017 – 31-10-2022
<i>AbsCal</i> * / <i>RadCalNet</i> *	Baotou_BTCN y BSCN	62	19-10-2016 – 19-10-2022
	Gobabeb_GONA	84	26-12-2017 – 29-10-2022
	RailRoadValley_RRV	88	05-10-2016 – 31-10-2022

* Incluye todas las imágenes sin evaluar la cobertura nubosa

** Sufijo “a” indica sitios cercanos

Obs. Los datos de *PRNU* también se usan en *AbsCal*, en nivel *L3*

5.2. Selección de las muestras

En esta sección, se aborda la selección final de las muestras utilizadas en la investigación, la cual partió de la premisa de utilizar datos ya disponibles. Sin embargo, fue importante analizar los requisitos de cada técnica para evitar considerar datos que afectarían los resultados. Estos análisis permitieron determinar criterios de elegibilidad adecuados con los que se obtuvieron los listados finales.

5.2.1. Determinación de criterios de elegibilidad para *RelCal*

A modo general, los cálculos de los coeficientes de *RelCal* se deben realizar simulando condiciones similares a las de laboratorio *i.e.* sin ningún ingreso de *EEM* al sensor para *DSNU* e ingreso uniforme de *EEM* para *PRNU*. Sin embargo, ambos coeficientes están relacionados entre sí y comparten aspectos comunes, que deben ser considerados como los primeros criterios a tener en cuenta en la selección de las muestras.

En primer lugar, se determinaron las fechas de los períodos en los cuales se debe realizar la calibración relativa (*RelCal*). Como criterio base, se consideró necesario que haya una variación mínima de al menos 1 *DN* en el valor de *DSNU* y/o un 0.5 % en el valor de *PRNU*. Para ello, se analizaron los valores de la primera *RelCal* realizada el 15 de septiembre de 2016 y la última *RelCal* realizada el 1 de abril de 2020 en el *CNOIS*.

El análisis reveló que entre la primera y la última *RelCal* existían diferencias de *DSNU* que oscilaban entre 2.6 *DN* - 7.3 *DN*, así como diferencias de *PRNU* que variaban entre 0.8 % - 3.5 %, dependiendo de las retinas y bandas. Con base en esos resultados, se determinó que los coeficientes de *RelCal* debían actualizarse cada 6.3 - 6.5 meses, estableciéndose una frecuencia semestral para la aplicación de los procedimientos de la investigación. Esta frecuencia se inició a partir del último semestre del año 2016 y se procuró mantenerla en los años siguientes. El criterio implicaba realizar los cálculos de calibración para los meses de junio y diciembre de cada año, y los datos fuera de esos meses no debían ser considerados en la investigación.

Además, con el fin de evitar la influencia de datos muy alejados temporalmente, se estableció como criterio adicional la selección de imágenes próximas con un rango de un mes de separación entre ellas. Sin embargo, es importante mencionar que este enfoque inicial varió ligeramente en función de la disponibilidad de imágenes.

El segundo criterio común fue determinar el tamaño necesario de las muestras, es decir, cuántos píxeles se deben utilizar para que la muestra sea representativa. Para ello, se consideró a la población como infinita o desconocida, lo que equivale a todos los píxeles adquiridos por el sistema en un período determinado. A continuación, se utilizó la Ecuación 5.1 con los siguientes parámetros: (1) precisión esperada del 0.5 %, (2) probabilidad de éxito o fracaso del 50 %, y (3) seguridad del 99.5 %, lo cual corresponde a un valor *Z* de 2.807 [69, 70].

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2} \quad (5.1)$$

Tamaño de muestra cuando se desconoce la población
Torres M. (2022) [70]

Donde :

Z_{α}^2	:	Nivel de confianza
p	:	Probabilidad de éxito, o proporción esperada
q	:	Probabilidad de fracaso
d	:	Precisión

El resultado fue de $\sim 78,793$ píxeles lo cual, según la media de las longitudes de las imágenes disponibles, equivale a ~ 6 imágenes de ~ 37 km de largo considerando la condición más restrictiva que es la cantidad de píxeles en las bandas *MS*. De acuerdo con estos resultados, para el cálculo de la *RelCal* se requería un mínimo de 6 imágenes en cada período de calibración.

La decisión de las fechas de los períodos y las cantidades de datos que debían existir brindó un marco más ordenado para la selección de muestras. Sin embargo, para el cálculo de la *RelCal*, era necesario que las condiciones en ambos conjuntos de datos se cumplieran simultáneamente. Esto significaba que si una condición no se cumplía en el conjunto de *DSNU*, no era posible realizar la *RelCal*, incluso si se cumplían en el conjunto de *PRNU* y viceversa. Por tanto se tuvo que analizar también el cumplimiento de condiciones particulares a cada uno de ellos.

En el caso de *PRNU*, el criterio de selección consistía en descartar imágenes con elementos que alteraran la uniformidad espacial requerida. Se realizó una evaluación visual para descartar imágenes que contenían nubes u otros elementos en Tierra que difirieran significativamente del conjunto. En los casos en los que estos elementos aparecían en los bordes de la imagen, se realizaron recortes para eliminarlos, asegurándose de mantener el tamaño muestral mínimo definido.

En el caso de *DSNU*, el proceso fue más complejo ya que se debió verificar que no hubo iluminación solar sobre el sitio durante la adquisición. También se analizó el impacto de la iluminación lunar y de elementos emisores de *EEM* en las escenas captadas por el sensor.

Para determinar el criterio de elegibilidad de muestras *DSNU* que no hayan sido afectadas por iluminación solar, se realizó un análisis gráfico de la órbita ascendente del satélite para identificar los segmentos de latitud válidos. Para ello se tuvo en cuenta la inclinación y la umbra de la Tierra [71], la velocidad angular del satélite y el tiempo de preparación antes de las adquisiciones. En la Figura 5.4 se presentan gráficamente las latitudes en las que las adquisiciones *DSNU* no pueden ser afectadas por ingreso de *EEM* en cualquier época del año ($< -25.61^{\circ} - 42.91^{\circ} >$).

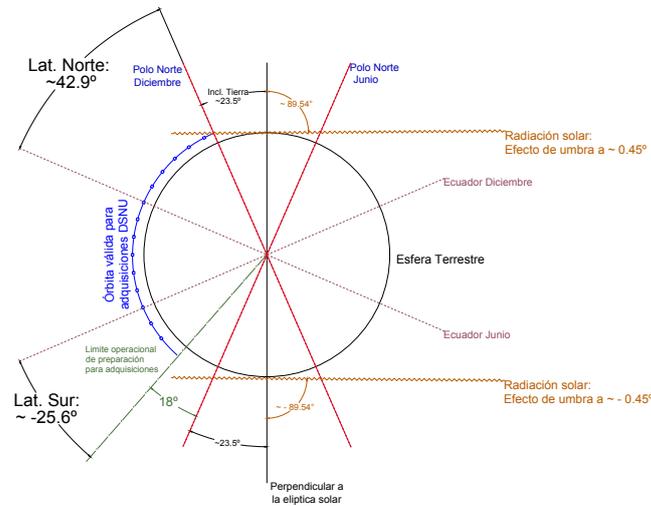


Figura 5.4: Gráfico representativo de condiciones orbitales para DSNU

Luego, antes de determinar como criterio excluyente las condiciones de iluminación lunar se realizó un análisis de su posible influencia. Aunque teóricamente la respuesta de los detectores a bajas radiancias y a la altura del satélite es insignificante, se observó que en general los valores de señal con iluminación lunar son mayores que sin iluminación. Sin embargo, esta diferencia no fue igual en todas las bandas, encontrándose una observación inversa en la retina A para la banda azul, lo que indica la necesidad de investigaciones más detalladas en el futuro. En el caso de la banda pancromática, la diferencia fue generalizada para todas las retinas (Figuras 5.5 y 5.6). Por lo que se determinó como criterio excluyente las condiciones de iluminación lunar para las muestras de *DSNU*. Para ello se clasificaron todas las imágenes según su fecha y el calendario lunar durante todo el período de estudio.

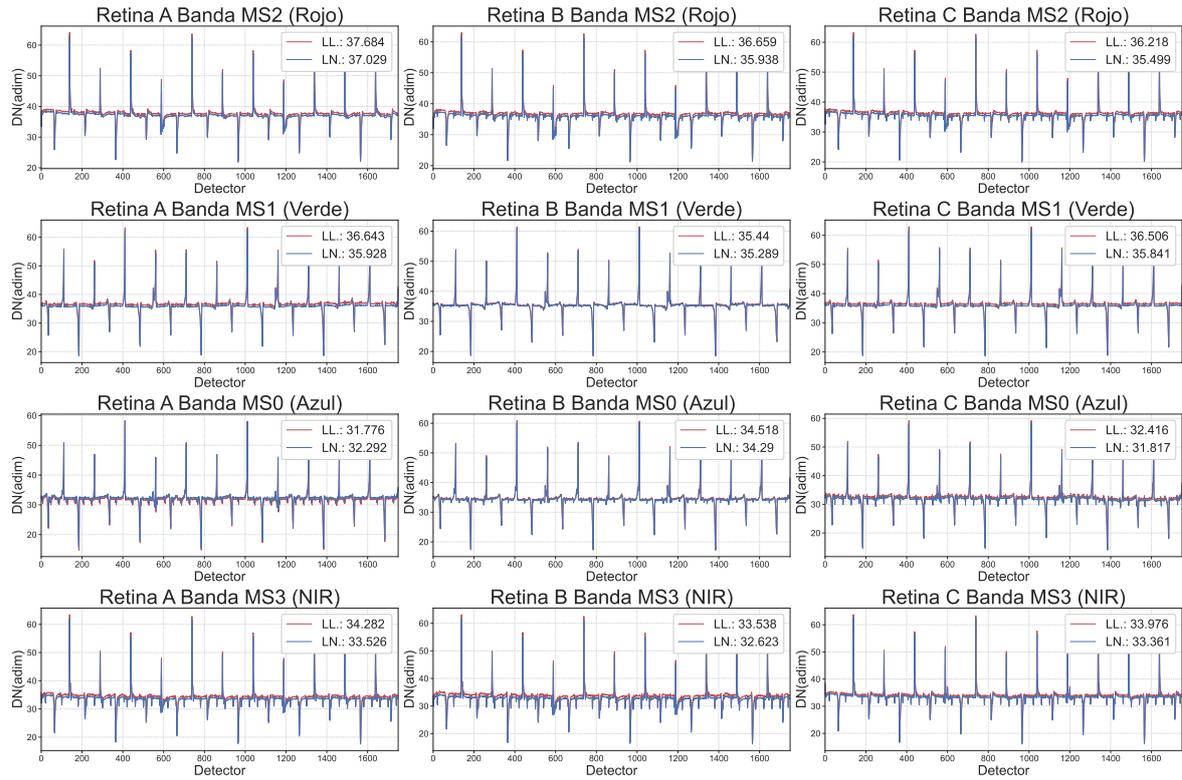


Figura 5.5: Comparación DSNU en Luna llena y nueva para las bandas MS
 Nota: LL. (Luna llena), LN. (Luna nueva)

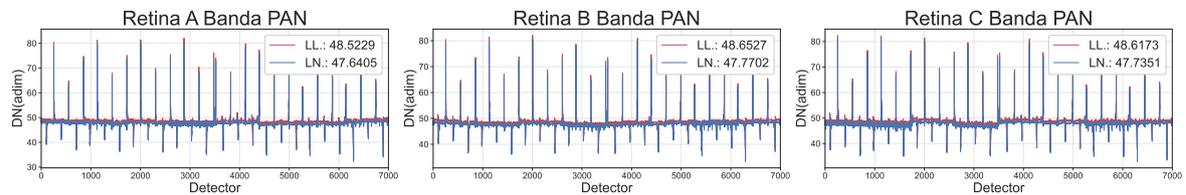


Figura 5.6: Comparación DSNU en Luna llena y nueva para la banda PAN

Los criterios de elegibilidad de muestras para *DSNU* se definieron de la siguiente forma:

Criterios de elegibilidad para el cálculo de *DSNU*

- 1) Deben ser imágenes “en oscuridad” sobre áreas sin elementos iluminados.
- 2) Deben ser suficientemente grandes para obtener promedios consistentes.
- 3) Deben ser de fechas cercanas entre ellas, evitando usar datos con mucha diferencia de tiempo que puedan influir en el cálculo.
- 4) Deben corresponder a fechas sin iluminación lunar.
- 5) Se debe garantizar que no haya habido ingreso de REM proveniente del Sol.

Para la aplicación de estos criterios se realizó lo siguiente:

- 1) En base al tipo de adquisición y las coordenadas del punto central de la imagen, se seleccionaron imágenes en oscuridad sobre océanos, y dentro del rango de $-25,61^\circ$ y $42,91^\circ$ de latitud.
- 2) En base al área adquirida y considerando el ángulo de incidencia, se calculó el largo de las imágenes, seleccionándose aquellas con más de 37 km.
- 3) En base a la fecha de adquisición, se seleccionaron imágenes en oscuridad de acuerdo con los períodos definidos.
- 4) Según el calendario lunar de septiembre de 2016 a octubre de 2022, se clasificaron las fechas de adquisición como “iluminación” (3 días antes y después del plenilunio), “no iluminación” (3 días antes y después de la luna nueva), e “iluminación media” (fechas fuera de los anteriores rangos), seleccionándose sólo las de “no iluminación”.

Los criterios de elegibilidad de muestras para *PRNU* se definieron de la siguiente forma:

Criterios de elegibilidad para el cálculo de *PRNU*

- 1) Deben ser imágenes “de calibración”, sobre *AOI*'s de alta uniformidad espacial.
- 2) Deben ser suficientemente grandes para obtener promedios consistentes.
- 3) Deben ser de fechas cercanas entre ellas, evitando usar datos con mucha diferencia de tiempo que puedan influir en el cálculo.
- 4) Deben ser libres de nubes y/o elementos que alteren la uniformidad espacial requerida.
- 5) Deben tener ángulos de incidencia muy bajos para evitar el efecto del *BRDF* y de las sombras.

Para la aplicación de los criterios de selección de datos *PRNU* se realizó lo siguiente:

- 1) En base al tipo de adquisición y las coordenadas del punto central de la imagen, se seleccionaron imágenes adquiridas sobre *PICS*.
- 2) En base al área adquirida y considerando el ángulo de incidencia, se calculó el largo de las imágenes, seleccionándose aquellas con más de 37 km de largo, de necesitar recortarse las imágenes recortadas no debían tener un largo menor.
- 3) En base a la fecha de adquisición, se seleccionaron imágenes de calibración de acuerdo con los períodos definidos.
- 4) Se revisaron las vistas previas para descartar aquellas imágenes que contenían nubes.
- 5) En base al ángulo de incidencia, se clasificaron las imágenes seleccionándose solo aquellas al “Nadir” o “Cerca al Nadir”.

La selección final de los conjuntos de muestras para *DSNU* y *PRNU*, se determinó analizando la disponibilidad mensual de datos desde el 2016 hasta el 2022 según los criterios de elegibilidad respectivos. Los resultados se presentan en la Figuras 5.7 y 5.8, en ellas se observa que las cantidades iniciales de la Tabla 5.1 se redujeron considerablemente sobre todo en las imágenes en oscuridad, y que además variaban mes a mes, existiendo algunos meses en los que no se contaba con el mínimo de 6.

Inicialmente los períodos se habían definido semestralmente, es decir para los meses de julio y diciembre, sin embargo esto no era posible en su totalidad por carencia de datos. Ante ello, se re-definieron ciertos periodos de la siguiente manera: (1) para el I y II semestre del 2018 los cálculos se harían para mayo y agosto, (2) para el II semestre del 2019, los cálculos se harían para noviembre; (3) el I semestre del 2017 se tuvo que descartar. Para los demás semestres se contó con las muestras necesarias.

Por otro lado, hubo casos en los cuales, a fin de garantizar el tamaño mínimo muestral, fue necesario flexibilizar los criterios de elegibilidad tomando datos de los meses próximos anteriores o posteriores (señalados en las figuras con líneas discontinuas de color rojo: II semestre del 2019 y II del 2021).

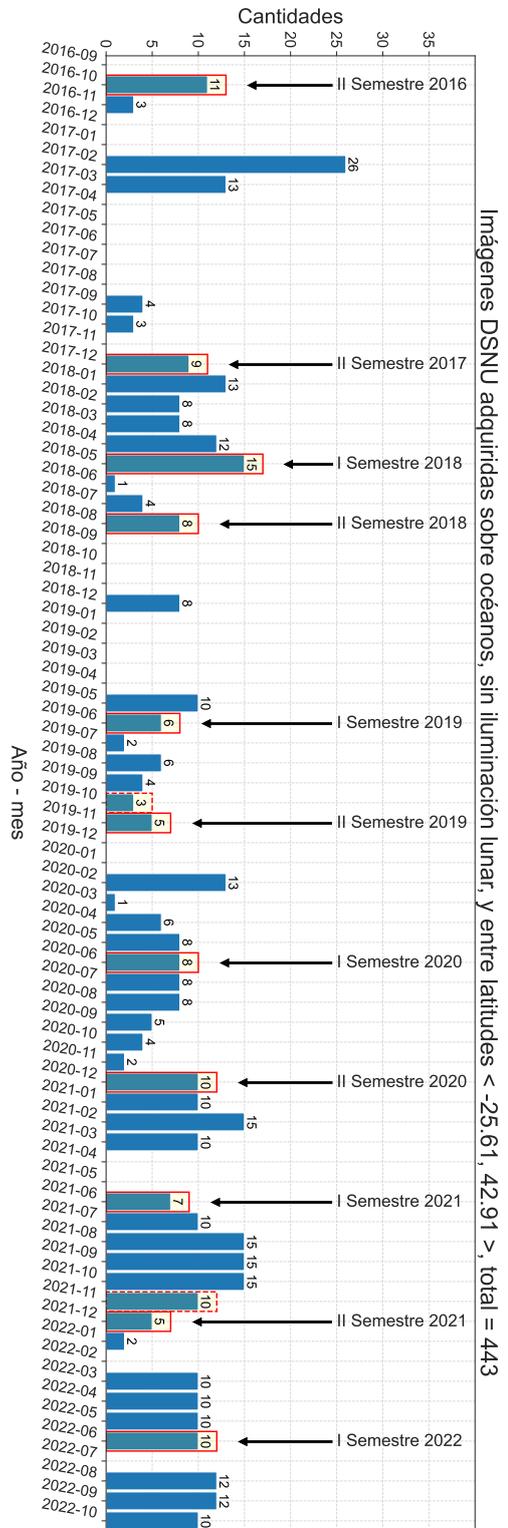


Figura 5.7: Cantidades de imágenes DSNU utilizadas en el cálculo de *RelCal*

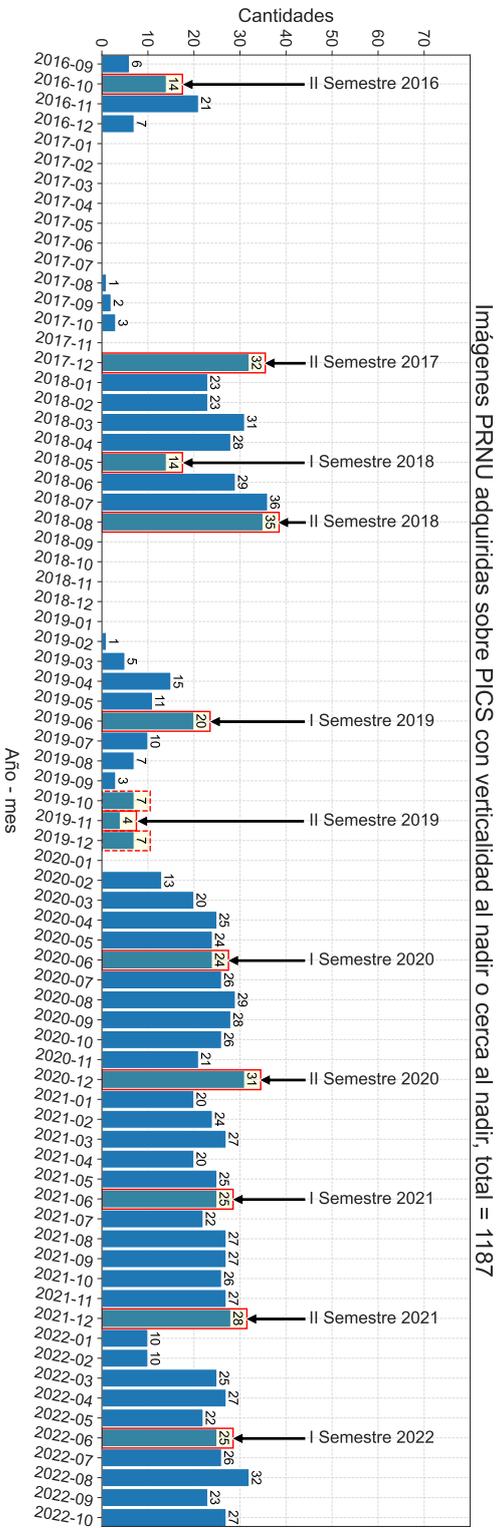


Figura 5.8: Cantidades de imágenes PRNU utilizadas en el cálculo de *RelCal*

Nota: Se resalta en amarillo y encerrado en rojo las cantidades disponibles por periodos de calibración

En cuanto al criterio de evitar que existan elementos en las escenas que pudieran emitir *EMR* en el espectro *VIS-NIR* afectando los resultados, y teniendo en cuenta que el proceso de cálculo de *DSNU* se haría por lotes, resultaba poco práctico verificar la presencia de valores atípicos en cada imagen de forma individual. En lugar de eso, se empleó un enfoque basado en la aplicación de umbrales para seleccionar píxeles oscuros puros, los cuales se agregaron a los procedimientos de cálculo.

Para determinar los umbrales, se analizaron los *DN* de imágenes en oscuridad adquiridas sobre océanos y sobre continentes, procurando que estos últimos contengan elementos iluminadores. Se seleccionaron muestras al azar para cada retina y banda, y se generaron diagramas de caja para cada una de ellas (Figura 5.9). A continuación, se compararon los valores de los bigotes extremos de las cajas con respecto a la media (\bar{x}) y la desviación estándar (σ) de la columna. Basándose en esta comparación, que se repitió varias veces y arrojó resultados consistentes, se estableció el umbral como $\bar{x} \pm 4\sigma$.

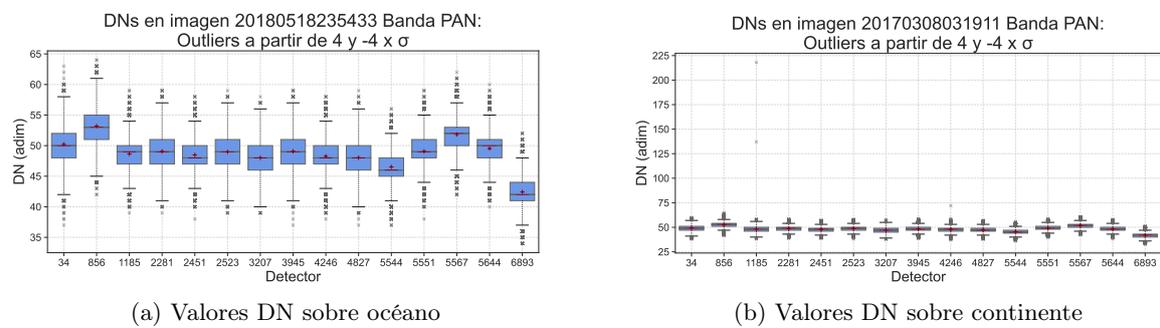


Figura 5.9: Distribución de *DN*'s en oscuridad para la banda PAN

Para el caso del cálculo de *PRNU* se siguió un enfoque similar basado en que, si bien se seleccionaron imágenes libres de nubes, podrían aún existir diferencias de uniformidad debido a factores ambientales (aerosoles, nubes tenues, etc.) o a diferencias entre frecuencias espaciales. Para ello, antes de calcular la media general de *PRNU* se debían descartar los datos cuyos promedios por columnas se encontraban alejados de la tendencia general del conjunto. En la Figura 5.10 se muestra un ejemplo del proceso de descarte. En esta figura, se resalta en verde la serie 5 del conjunto, el cual corresponde al sitio Argelia_3 en este caso, y que notoriamente se aleja de la tendencia de todas las demás series por lo que debe descartarse. Una vez realizados todos los descartes, se calcula el *PRNU* final con las series restantes.

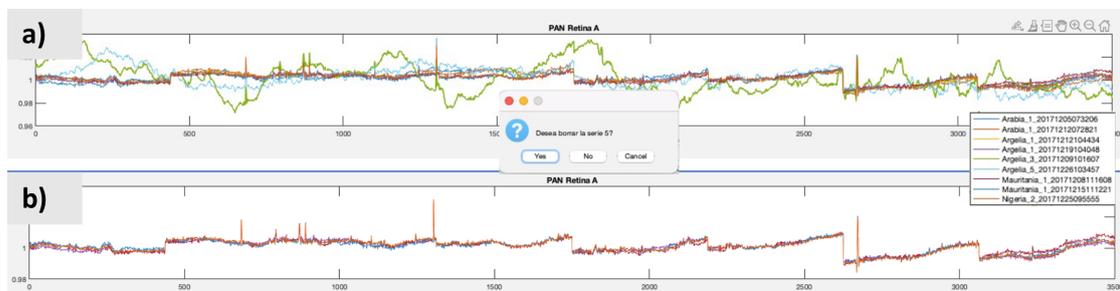


Figura 5.10: Eliminación de *PRNU* alejados de la tendencia general
Nota: a) Selección de línea a descartar, b) Resultado final.

5.2.2. Determinación de criterios de elegibilidad para *AbsCal*

5.2.2.1. Para análisis de tendencias sobre *PICS*

Esta técnica se basa en comparar la evolución de ρ sobre un mismo *PICS*. Se determinaron como sitios ideales los desiertos de África y Arabia que además de cumplir las condiciones de pseudo-invariabilidad, poseen alto brillo, uniformidad espacial, radiométrica y atmosférica, así como bajo *BRDF*. El uso de desiertos permite también evitar la saturación del sensor puesto que, a pesar de tener un alto brillo, es poco probable que se llegue al margen correspondiente a cada banda. Asimismo, no debían haber nubes sobre las *AOI*'s.

Por otro lado, los sitios seleccionados debían contar con una referencia inicial desde el inicio de la etapa operacional del satélite. Además, la geometría de adquisición es otro aspecto que se debía tener en cuenta, ya que si bien los *PICS* tienen bajo *BRDF* el cálculo aún podía ser afectado.

En base a las premisas, los criterios de elegibilidad para análisis de tendencias se definieron como sigue:

Criterios de elegibilidad para análisis de tendencias

- 1) Deben haber sido adquiridas sobre *PICS* de desiertos.
- 2) Deben encontrarse libres de nubes en su parte central.
- 3) Deben haberse adquirido “al Nadir” o “Cerca al nadir”.
- 4) El conjunto debe contar con un solape suficiente para seleccionar un *AOI* común, para el correregistro.
- 5) El conjunto debe contar con al menos una imagen del 2016, como referencia inicial.
- 6) Para los sitios con referencia inicial, deben existir adquisiciones hasta el año 2022.
- 7) Las geometrías de adquisición deben ser similares a la referencia inicial o dentro de un límite aceptable.

Los criterios 1, 3, 5 y 6 se aplicaron en base a las coordenadas del punto central, ángulos de incidencia y fechas de adquisición. El segundo mediante revisión visual. El cuarto revisando los archivos KMZ contenidos en los productos. Y el séptimo mediante la aplicación de la Ecuación 2.3. Los resultados globales se muestran en la Tabla 5.3 y su distribución temporal en la Figura 5.11

Tabla 5.3: Imágenes de *PS1* sobre *PICS* de desiertos

Sitio	Cantidad	Rango de Fechas
Arabia_1	70	26/09/2016 - 15/10/2022
Arabia_2	65	05/10/2016 - 24/10/2022
Argelia_3	88	30/09/2016 - 19/10/2022
Argelia_5	93	3/10/2016 - 29/10/2022
Libia_2	95	24/09/2016 - 20/10/2022
Mali_1	96	8/11/2016 - 27/10/2022
Mauritania_1	85	4/10/2016 - 18/10/2022

* Incluye todas las imágenes sin evaluar cobertura nubosa

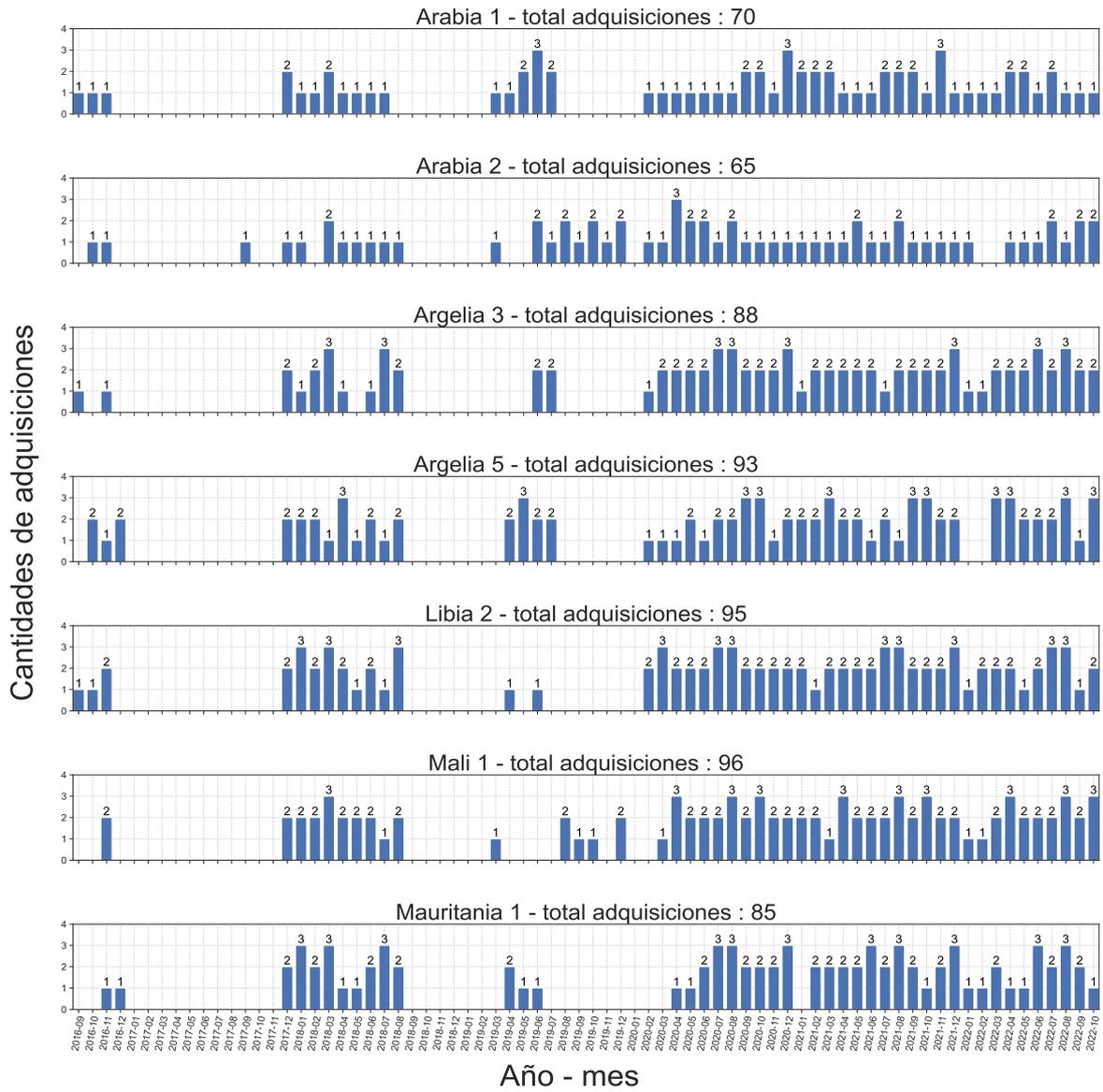


Figura 5.11: Distribución mensual de adquisiciones para análisis de tendencia

5.2.2.2. Criterios de elegibilidad para calibración cruzada

La calibración cruzada o *CrossCal* consiste en comparar las mediciones de dos o más sensores sobre una misma superficie, en esta técnica un sensor actúa como referencia (*Ref*) y existe otro por calibrar (*Cal*). La técnica puede tener varios enfoques como el uso de la L o ρ como unidades de comparación, y puede ser realizada de manera simultánea o no. En *CrossCal*, es necesario realizar un ajuste espectral de las bandas, lo cual implica contar con datos adicionales además de las imágenes a procesar [60].

Considerando los criterios de la investigación se determinó que para *PerúSAT-1* la mejor opción era adoptar el enfoque simultáneo usando la *ReflTOA* como unidad de comparación. La simultaneidad permitiría evitar que las condiciones atmosféricas y diferencias en la irradiancia solar exo-atmosférica (*ESUN*) afecten la comparación.

Los aspectos críticos a resolver para implementar este enfoque fueron:

Criterios de elegibilidad para *CrossCal*

- 1) Que *Ref* sea un sensor de características similares a *PerúSAT-1*.
- 2) Que existan coincidencia espacio - temporales de adquisiciones.
- 3) Que las imágenes de *Ref* se encuentren disponibles.
- 4) Que las imágenes a comparar no tengan grandes diferencias en sus geometrías de adquisición.
- 5) Que exista solapamiento de los anchos de banda espectral entre los dos sensores.
- 6) Que el *SRF* de *Ref* se encuentren disponible.
- 7) Que exista disponibilidad del perfil de reflectividad del sitio a evaluar, o de datos que permitan calcularlo.
- 8) Que no exista mucha diferencia en los *GSD*'s de ambos sensores.

Después de explorar el estado del arte, disponibilidad de datos y características de varios satélites, se determinó como mejor opción para que actúe como *Ref* al sensor *MSI* de Sentinel 2A & 2B, en adelante se usará el termino "Sentinel 2" que incluye a ambos satélites.

Las razones de elegir Sentinel 2 para este estudio son varias. En primer lugar, ambos satélites han sido fabricados por Airbus Defence & Space y son del tipo pushbroom, por tanto comparten herencia tecnológica con *PerúSAT-1*.

Otra ventaja es que Sentinel 2 adquiere imágenes de manera continua, lo que aumenta las posibilidades de encontrar coincidencias tanto en el presente como en el futuro. Además, sus imágenes son gratuitas.

En términos de productos, Sentinel 2 proporciona datos de *ReflTOA* (nivel L1C), lo que evita procesos adicionales, y facilita el análisis y la comparación de los datos. También, los productos de Sentinel 2 vienen acompañados de metadatos necesarios para analizar la geometría de adquisición.

Las *SRF* de Sentinel 2 se encuentran disponibles en sus páginas web oficiales y el sensor *MSI* es considerado de alto nivel de calibración radiométrica, lo que garantiza la precisión de los datos.

Ambos sensores cubren el rango *VIS-NIR*, y existen pares de bandas análogas, lo que facilita la comparación (Tabla 5.4). Además, el tamaño de píxel de Sentinel 2 en dicho rango es de 10 m, lo cual es relativamente cercano al tamaño de píxel de PS1, que es de 2.8 m.

Tabla 5.4: Bandas análogas entre S2A & S2B y PS1

Nº banda	λ central		Ancho de banda		Tamaño píxel (m)	Análoga <i>PS1</i>
	S2A	S2B	S2A	S2B		
2	492.7	492.3	65	65	10	MS0 ($\lambda_{central}$: 485, ancho: 70)
3	559.8	558.9	35	35	10	MS1 ($\lambda_{central}$: 560, ancho: 60)
4	664.6	664.9	30	31	10	MS2 ($\lambda_{central}$: 665, ancho: 70)
8	832.8	832.9	105	104	10	MS3 ($\lambda_{central}$: 818.5, ancho: 133)

Observación 1: No existe banda análoga en S2 para la banda PAN - PS1

Observación 2: Valores de λ y de ancho de banda en nm

Para buscar coincidencias temporales, se utilizó una API (Application Program Interfaces) disponible en [72] con la cual se obtuvieron listados de imágenes de Sentinel 2 por cada sitio, usándose las fechas de adquisición para encontrar pares de imágenes simultáneas con *PerúSAT-1*. El perfil de reflectividad del sitio se puede calcular usando datos hiperespectrales. En esta investigación, para las coincidencias entre Sentinel 2 y *PerúSAT-1* sobre *PICS* de desiertos se decidió usar imágenes de Hyperion. Otra fuente de datos hiperespectrales accesible es *RadCalNet* por lo que la búsqueda de coincidencias se realizó también sobre estos sitios. El uso de *PICS* de desiertos y de sitios de *RadCalNet* permitió también evitar que existan imágenes saturadas que no permitan su comparación debido a diferentes márgenes de saturación en las bandas de cada sensor.

Hyperion es un sensor que estuvo a bordo de la misión EO-1 (Earth Observing-1) actualmente de baja. Dichas imágenes continúan disponibles en las páginas web del Servicio Geológico de U.S.A. (USGS) [73, 74], constan de 224 bandas en el rango de λ de 0.4 μm - 2.5 μm , a resolución espacial de ~ 30 m y un ancho de barrido de ~ 7.75 km [75, 76, 77].

Los criterios de elegibilidad de las muestras de *PerúSAT-1* para *CrossCal* con Sentinel 2 fueron los siguientes:

Criterios de elegibilidad para *CrossCal*

- 1) Deben coincidir espacial y temporalmente con imágenes de Sentinel 2.
- 2) Para los sitios coincidentes debe haber datos de Hyperion o *RadCalNet*
- 3) Las imágenes deben haberse adquirido al Nadir o Cerca al nadir.
- 4) Debe haber un solape que permita seleccionar un *AOI* común.
- 5) La geometría de adquisición entre cada par de imágenes debe ser muy parecida o dentro de un límite aceptable

Los criterios 1, y 2, se trataron mediante filtrado en base a las coordenadas del punto central de la imagen y las fechas de adquisición. Para el tercer criterio, en base a las coincidencias se revisó la disponibilidad de datos hiperespectrales de Hyperion para *PICS* o de *RadCalNet* cuando correspondía. El cuarto criterio se trató mediante la revisión visual de las imágenes y el último con la aplicación de la Ecuación 2.3.

La muestra seleccionada para *CrossCal* de *PerúSAT-1* con Sentinel 2, aplicando los criterios de elegibilidad fue:

Tabla 5.5: Muestras de imágenes de *PerúSAT-1* para *CrossCal* con Sentinel 2

Sitio	Cantidad	Fechas
Argelia_3	6	23-02-2020, 25-09-2020, 09-11-2020, 02-02-2021, 20-10-2021, 04-12-2021
Argelia_5	8	01-12-2016, 26-12-2017, 09-02-2018, 15-04-2019, 31-10-2020, 10-03-2021, 25-11-2021, 04-04-2022
Baotou_BSCN	3	19-10-2016, 29-08-2021, 23-09-2022
Baotou_BTCN	3	19-10-2016, 29-08-2021, 23-09-2022
Mauritania_1	7	15-12-2017, 29-01-2018, 24-04-2018, 08-06-2018, 13-04-2021, 29-12-2021, 15-09-2022
Mauritania_2	1	07-07-2021
RailRoadValley_RVUS	4	06-09-2019, 30-09-2020, 24-12-2020, 05-10-2022

Observación 1: Cantidades antes de la verificación de nubes sobre *AOI*'s

Observación 2: Las cantidades son por productos pero el análisis fue por bandas

Observación 3: Para cada fecha existieron datos hiperespectrales de los sitios

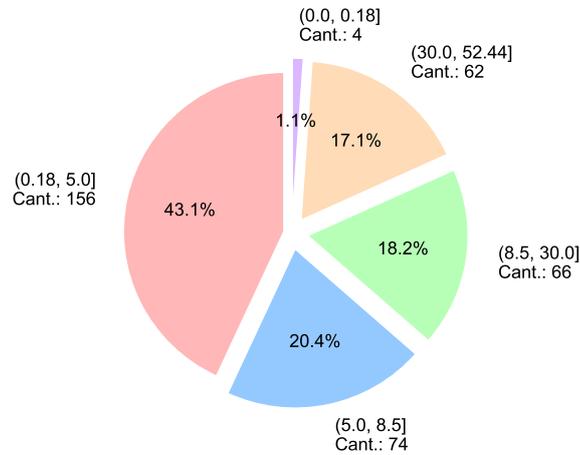
Observación 4: Las diferencias temporales entre ambos satélites fue menor a 12 minutos

5.2.2.3. Criterios de elegibilidad para calibración usando *RadCalNet*

En el Capítulo 2.5, se describe el uso de datos de *RadCalNet* bajo 2 enfoques: de reflectancia superficial y *ReflTOA*, por adaptabilidad y practicabilidad se decidió usar el segundo enfoque. Al respecto, no siempre hubo disponibilidad de datos de la red para las fechas y horas en las que *PerúSAT-1* sobrevoló los sitios. Además, *PerúSAT-1* no adquiere imágenes sobre *LCFR* por razones contractuales, y las imágenes adquiridas en los otros 4 sitios no tuvieron una frecuencia constante y se adquirieron con diversos ángulos de incidencia.

Para seleccionar los datos adecuados, inicialmente, se consideró la coincidencia temporal de las adquisiciones al Nadir de *PerúSAT-1* con los datos disponibles de *RadCalNet*. Sin embargo, se verificó que sólo 4 imágenes cumplían esta condición (Figura 5.12). Requiriéndose ampliar el tamaño de la muestra, después de consultar a expertos y revisar algunos trabajos realizados, se estableció un umbral de 5 grados de incidencia, dada la uniformidad de los sitios cuasi-lambertianos y que el satélite los sobrevuela a la misma hora local.

Ángulos de Incidencia por rangos, total imagenes : 362

Figura 5.12: Verticalidad del total de imágenes sobre sitios de *RadCalNet*

Los criterios de elegibilidad para calibración absoluta basada en *RadCalNet* fueron los siguientes:

Criterios de elegibilidad para *RadCalNet*

- 1) Deben ser imágenes de fechas con disponibilidad de datos de *RadCalNet*.
- 2) Las imágenes deben haberse adquirido con un ángulo de incidencia $< 5^\circ$.
- 4) Debe haber un solape que permita seleccionar un *AOI* común.
- 5) Deben estar libres de nubes sobre los *ROI*

El total de imágenes de la muestra para la técnica se detalla en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Muestras para *RadCalNet*

Sitio	Cantidad
Baotou_BSCN	3
Baotou_BTCN	2
Gobabeb_GONA	33
RailRoadValley_RVUS	21

Observación: Sin verificación de nubes

En el próximo capítulo...

El capítulo siguiente es denominado PROCEDIMIENTOS, y en él se explican aspectos relacionados con el proceso de las muestras y cómo se obtuvieron los resultados de la investigación.

Capítulo 6

Procedimientos

6.1. Modelo radiométrico general

Antes de describir los procedimientos realizados es necesario tener un contexto general del proceso interno de medición del sensor con el objetivo de explicar detalladamente las variables que se utilizarán. El modelo radiométrico general de *PerúSAT-1* es común al de muchos sensores pushbroom y se presenta en la Figura 6.1. Se observa que la radiancia (L) es recibida a través del instrumento óptico que tiene un nivel de transmisividad determinado (T). Luego, $L \cdot T$ estimula los detectores internos que tienen una sensibilidad individual (PR) generándose una corriente eléctrica en función de la eficiencia de conversión de dichos detectores (ξ). A la corriente generada se le suman electrones provenientes de la señal de fondo o de oscuridad (DS). Finalmente, la totalidad de corriente se cuantifica en valores enteros que se registran como DN , a una determinada frecuencia de muestreo.

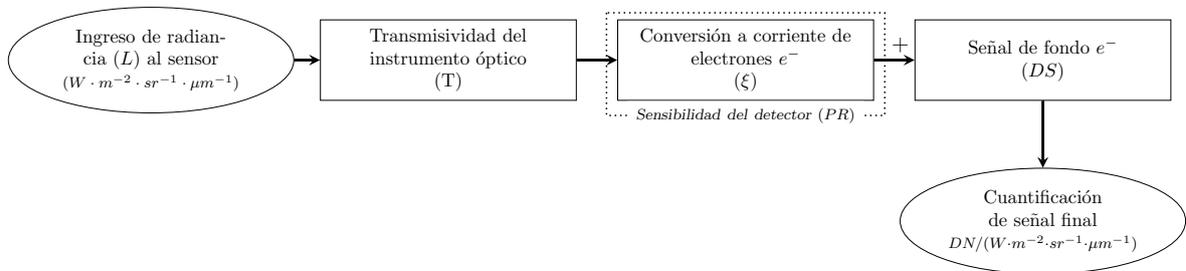


Figura 6.1: Modelo radiométrico general para sistemas pushbroom

Considerando el modelo radiométrico general se deriva preliminarmente la Ecuación 6.1 en la que se observan variables que corresponden al instrumento óptico (T), a los detectores ($PR_{(x)}$, $DS_{(x)}$) y a la fuente de iluminación (L). Mientras que L es una variable independiente, las otras 3 son sistémicas y no pueden ser variadas a menos que se cambien los instrumentos. Representa un modelo básico para sensores de detectores alineados y se aplica a cada vector unidimensional de columna “ x ” generado por un solo detector, repitiéndose tantas veces como detectores, bandas, y arreglos conformen el sistema.

$$DN_{(x,y)} = \text{int}(T \cdot PR(x) \cdot L(x, y) + DS(x)) \quad (6.1)$$

Ecuación del modelo radiométrico a nivel de píxel

Donde :

- x : Número de columna de la imagen
- y : Número de fila de la imagen
- $DN_{(x,y)}$: Valor en DN registrado por el píxel (x, y)
- int : Redondeo a valores enteros (para $PS1$ en 12 bits)
- T : Transmisividad del instrumento óptico
- $PR(x)$: Respuesta individual de píxel “ x ”
- $L_{(x,y)}$: Radiancia que ingresa al instrumento óptico registrada por el píxel (x, y)
- $DS(x)$: Señal de fondo del detector de la columna “ x ”

A partir de bandas, es necesario analizar el modelo bajo un enfoque matricial (x, y) . En ese sentido, por ejemplo, mientras que a nivel del píxel “ x ”, la variable DS se considera individual; a nivel de bandas, cada detector tiene su propia señal de fondo que difiere de las demás en su arreglo. Por ello, para denominar esta variable a partir de bandas, se le agrega el sufijo “ NU ”, quedando como “ $DSNU$ ”. De manera similar, la respuesta individual de cada detector en el conjunto pasa a denominarse “ $PRNU$ ”. *PerúSAT-1* posee 5 bandas (4 MS y 1 PAN) y 3 retinas (A, B, C) por lo que cada adquisición genera 15 matrices de datos, a cada una de ellas le corresponden sus propios vectores de coeficientes de $DSNU$ y $PRNU$ (ver Tabla 3.3).

El modelo radiométrico también muestra la variable ξ que es el factor de eficiencia de conversión electrónica, y representa la relación entre la corriente eléctrica generada por el detector “ x ” y la EEM incidente sobre su material sensible. De esta relación se deriva el coeficiente de $AbsCal$ correspondiente a cada banda (b), el cual es único para todo el espacio (x, y, b) , independientemente que cada detector “ x ” tenga una sensibilidad distinta con respecto a los demás de su arreglo. El coeficiente de $AbsCal$ es denominado $GAIN$, al agregarlo a la ecuación anterior se obtiene la Ecuación 6.2.

$$DN_{(x,y,b)} = \text{int}(GAIN_{(x,y,b)} \cdot PRNU_{(x,b)} \cdot L_{(x,y,b)} + DSNU_{(x,b)}) \quad (6.2)$$

Ecuación del modelo radiométrico a nivel de bandas

Donde:

- b : Banda espectral del sensor
- $DN_{(x,y,b)}$: DN registrado para el píxel (x, y, b)
- int : Redondeo a valores enteros (para $PS1$ en 12 bits)
- $GAIN_{(x,y,b)}$: Coeficiente de calibración absoluta para el píxel (x, y, b)
- $PRNU_{(x,b)}$: Coeficiente de calibración relativa para el detector “ x ” de la banda “ b ”
- $L_{(x,y,b)}$: Radiancia que ingresa al sensor separada por bandas (b), para el píxel (x, y)
- $DSNU_{(x,b)}$: Señal de fondo para el píxel de la columna (x), banda “ b ”

Observación : En la ecuación se considera al $OFFSET = 0$

Finalmente, para obtener los valores de L en función de DN , $PRNU$, $DSNU$, y $GAIN$, se utiliza la Ecuación 6.3

$$L_{(x,y,b)} = \frac{DN_{(x,y,b)} - DSNU_{(x,b)}}{GAIN_{(b)} \cdot PRNU_{(x,b)}} \quad (6.3)$$

Ecuación de cálculo de radiancias para las imágenes de *PS1*

Todos los procedimientos realizados, que se detallan en adelante, se basaron en el modelo y las ecuaciones descritas. Sin embargo, al igual que en el capítulo anterior existieron algunas consideraciones generales y particulares. Para el caso de *RelCal* se tuvo que analizar el enfoque de procesamiento por retinas. Para el caso de *AbsCal*, dado que se realizó por lotes, se tuvo que corregir las imágenes bajo un método común, lo cual implicó la redefinición de algunos conceptos con significado similar.

6.2. Procedimientos realizados para *RelCal*

La *RelCal* de *PerúSAT-1* tiene como objetivo corregir los efectos de la diferencia de sensibilidad de sus detectores al formar un arreglo único. Este proceso se lleva a cabo mediante el cálculo de la ratio entre la media de valores de cada columna con la media general de la retina a la que pertenecen. Los coeficientes finales son *PRNU*, pero para calcularlos se debe sustraer la señal en oscuridad como parte del proceso. La calibración relativa se realiza para cada banda en su respectiva retina.

6.2.1. Análisis del enfoque *RelCal* por retinas

La aplicación de los coeficientes de *RelCal* para producir imágenes a partir del nivel *L2* se realiza por retinas, luego se unen las sub-imágenes en una sola. Por ello, se evaluó el enfoque utilizado por el *CNOIS* en los cálculos de *RelCal* previos, que fue a nivel de retinas. La evaluación se consideró necesaria ya que existía la posibilidad de que la sensibilidad global en cada una de ellas variara con respecto a las demás, lo cual afectaría a la imagen final cuando se unen las matrices.

El análisis se llevó a cabo utilizando imágenes en nivel *L1* con el fin de evaluar si existían discrepancias en bordes de retinas continuas después de la aplicación de los coeficientes de *RelCal*. Los resultados se presentan en las Figuras 6.2 y 6.3, donde se observa que estas diferencias son insignificantes, y posiblemente se deban a las ligeras variaciones entre ángulos de visión de cada retina, lo que genera variaciones en posiciones de las sombras. Por lo tanto, se concluyó que el enfoque utilizado seguía siendo válido.

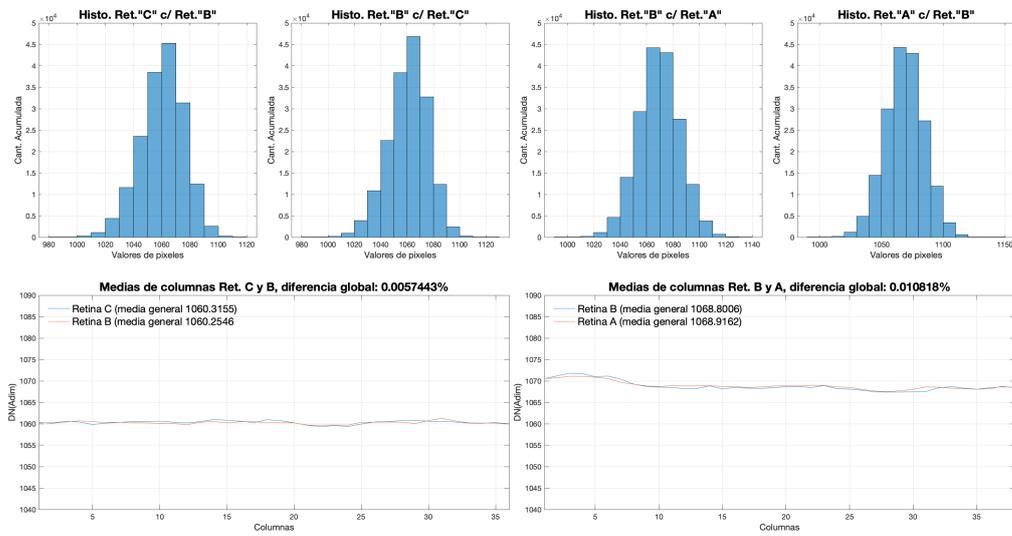


Figura 6.2: Análisis de bordes de retinas para la banda MS2

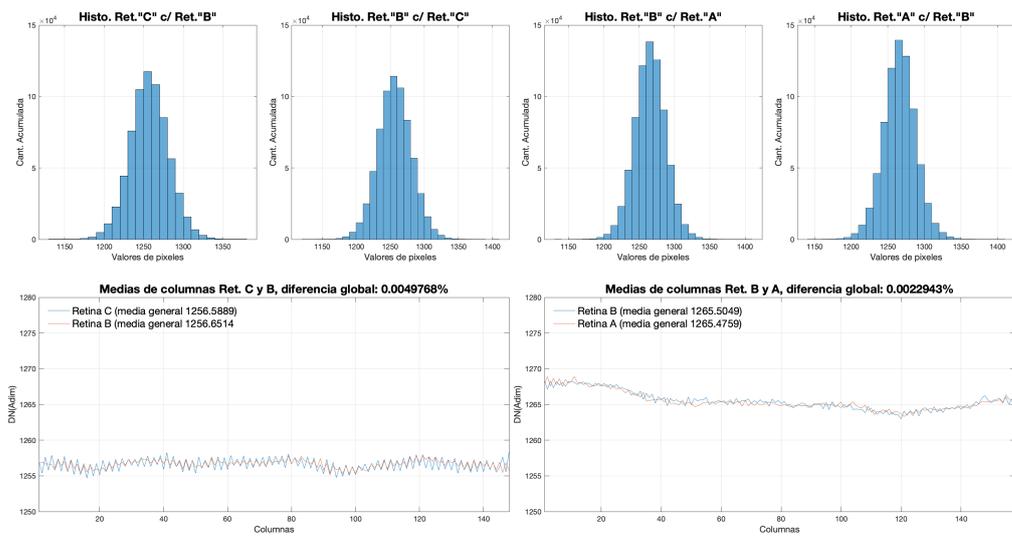


Figura 6.3: Análisis de bordes de retinas para la banda PAN

6.2.2. Cálculo de *DSNU* y *PRNU*

El procedimiento general para el cálculo de señal oscura se describe en la Ecuación 6.4. La cual tuvo que ser modificada para agregar el umbral que permite seleccionar píxeles oscuros puros (ver Capítulo 5.2.1), quedando como la Ecuación 6.5.

$$DSNU_{(x,r,b)} = \frac{1}{y} \sum_{y=1}^y DN_{(x,y,r,b)} \quad (6.4)$$

Ecuación general para el cálculo de *DSNU*

Donde:

- $DSNU_{(x,r,b)}$: Valor *DSNU* para el píxel (x) de la banda “b” de la retina “r”
 $DN_{(x,y,r,b)}$: Valor digital del píxel (x, y) de la banda “b” de la retina “r”

$$\widetilde{DSNU}(x, r, b) = \frac{1}{y} \sum_{y=1}^y |DN_{(x,y,r,b)}| \frac{\overline{DN}_{(x,r,b)} + 4\sigma}{\overline{DN}_{(x,r,b)} - 4\sigma} \quad (6.5)$$

Cálculo de *DSNU* considerando el umbral $\overline{DN} \pm 4\sigma$

Donde:

- $\widetilde{DSNU}_{(x,r,b)}$: *DSNU* (x), banda “b”, retina “r” dentro del umbral
 $\overline{DN}_{(x,r,b)} + 4\sigma$: Umbral superior para la selección de *DN*
 $\overline{DN}_{(x,r,b)} - 4\sigma$: Umbral inferior para la selección de *DN*

Una vez calculado el *DSNU*, se calculó el *PRNU* siguiendo la Ecuación 6.6.

$$PRNU(x, r, b) = \frac{1}{y} \sum_{y=1}^y (DN_{(x,y,r,b)} - DSNU_{(x,r,b)}) \quad (6.6)$$

Ecuación general para el cálculo de *PRNU*

Donde:

- $PRNU_{(x,r,b)}$: Valor *PRNU* para el píxel “(x)” de la banda “b” de la retina “r”
 $DN_{(x,y,r,b)}$: Valor digital del píxel (x, y) de la banda “b”, retina “r”
 $DSNU_{(x,r,b)}$: Valor de *DSNU* para el píxel “(x)” de la banda “b” de la retina “r”

La Figura 6.4 muestra el flujograma de procedimientos realizados para el cálculo de los coeficientes de *RelCal*.

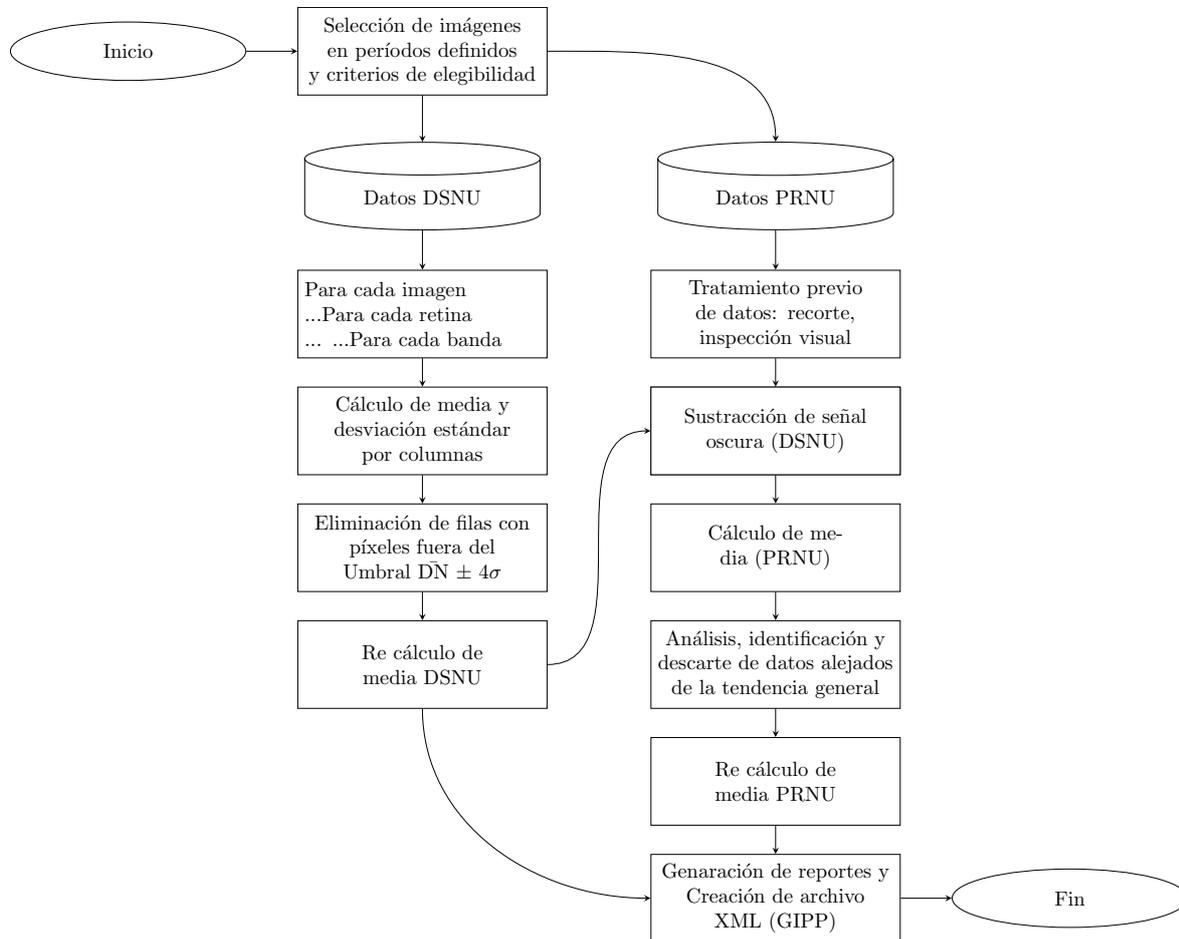


Figura 6.4: Flujograma de cálculo de coeficientes de *RelCal*

Nota: para el descarte de datos fuera de la tendencia general ver Fig. 5.10

6.3. Procedimientos realizados para *AbsCal*

A modo de resumen, la *AbsCal* consiste en obtener los valores de coeficientes de ganancia *GAIN* de cada banda (Ecuación 6.3), los cuales son necesarios para calcular valores de L en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$. En el caso de *PerúSAT-1* la ecuación de transformación está definida como: $L = DN/GAIN + OFFSET$, donde DN representa el número digital de la imagen. Al respecto, para *PerúSAT-1* el valor de $OFFSET = 0$ debido a que la señal en oscuridad se sustrae durante el proceso de producción de las imágenes. El objetivo de la *AbsCal* fue actualizar los coeficientes *GAIN* de cada banda, que actualmente se encuentran en los *GIPP*.

En el Capítulo 2.3 se detallan los métodos y técnicas más utilizadas en *RadCal*. Cada método y técnica posee características y ventajas propias en comparación con las demás, por lo que se decidió combinarlos con el fin de obtener resultados compatibles y aprovechar sus ventajas relativas. De esta manera, se buscó estimar el comportamiento global del sensor en el período de estudio, considerando la comparación de sus respuestas frente a referencias obtenidas tanto de sus propios datos, como de satélites calibrados bajo similares condiciones de adquisición y mediciones de campo en la superficie terrestre.

Las técnicas de *AbsCal* aplicadas, junto con sus enfoques, ventajas, desventajas, uso combinado y las razones de su elección, se describen a continuación:

- a) Análisis multitemporal de tendencias en *ReflTOA* sobre *PICS*:
Una de las principales ventajas de este enfoque fue la disponibilidad de una gran cantidad de datos (ver Tabla 5.3), lo que proporcionó una mayor robustez en el cálculo de la tendencia global del sensor. Otra ventaja fue que se utilizaban imágenes propias de *PerúSAT-1* sin la influencia de datos externos y sus incertidumbres. Sin embargo, una desventaja importante fue la necesidad de utilizar los coeficientes actuales de prelanzamiento para el cálculo de la *ReflTOA*, lo cual introducía incertidumbre debido a posibles variaciones de estos al inicio de la vida operativa del satélite (*bol*). Por lo tanto, sus resultados parciales se usaron únicamente para analizar la tendencia global, y no se usaron en la definición de la ordenada del ajuste lineal final. Permitió analizar la tendencia en las bandas *MS* y *PAN*.
- b) Calibración cruzada con el enfoque de sobrevuelo simultáneo:
Esta técnica aprovecha las observaciones simultáneas de dos satélites, lo que garantiza condiciones atmosféricas idénticas. Bajo una geometría adecuada, los resultados obtenidos deberían ser consistentes. Una ventaja significativa es que no depende únicamente de los datos de *PerúSAT-1*, ya que utiliza una referencia externa considerada real y altamente calibrada. Sin embargo, las desventajas incluyen la presencia de variables externas que pueden acumular incertidumbre. Dado que se considera una referencia real de la *ReflTOA* sobre el sitio, los coeficientes obtenidos pueden considerarse válidos. Por lo tanto, sus resultados parciales se utilizaron tanto para analizar la tendencia global como para definir la ordenada del ajuste lineal final. Al no existir una banda análoga para la banda *PAN* de *PerúSAT-1* sus resultados se utilizaron solo para las bandas *MS*.
- c) Calibración absoluta basada en *RadCalNet*. Por razones de practicidad, se decidió utilizar el enfoque de *ReflTOA* en lugar de ρ de superficie. Esta técnica también utiliza datos externos considerados como reales, pero su enfoque difiere del anterior, ya que las mediciones se realizan en tierra y se simulan al tope de la atmósfera. Entre sus ventajas se encuentran la utilización de datos confiables garantizados por instituciones especializadas y una cantidad importante de datos disponibles. Sin embargo, durante la

obtención de los valores de referencia se procesan muchas variables (debido a los instrumentos, el *RTM* utilizado, etc.), lo que puede afectar la incertidumbre final. Además, se requieren condiciones angulares más exigentes. Dado que también se considera una referencia real de la *ReflTOA* sobre el sitio, este enfoque se utilizó tanto para analizar la tendencia global como para determinar la ordenada del ajuste lineal final. Permitió analizar la tendencia y definir la ordenada para las bandas *MS* y *PAN*.

Estas tres técnicas se combinaron para calcular la tendencia global del comportamiento del sensor. Al igual que en los casos anteriores existieron procedimientos comunes y particulares.

El primer procedimiento común fue que, para el cálculo de *AbsCal* se usaron imágenes en nivel *L3* las cuales son producidas con corrección de *RelCal* (ver Tabla 3.7). Sin embargo, en dicha corrección, se usaron coeficientes de los *GIPP* actualmente alojados en el sistema, los que habían sido obtenidos usando una metodología distinta a la propuesta. Por lo tanto, se determinó que era necesario corregir los valores de *DN* antes de convertirlos a *ReflTOA*.

Para determinar los factores de corrección se siguió la lógica de “coeficientes aplicados” y “coeficientes que debieron aplicarse (corregidos)” teniendo en cuenta la Ecuación 6.2 con lo que se obtuvo la Ecuación 6.7.

$$\widetilde{\widetilde{DN}}_{(x,y,b)} = (\widetilde{DN}_{(x,y,b)} \cdot \Delta PRNU_{(x,b)}) + \frac{\Delta DSNU_{(x,b)}}{PRNU^c_{(x,b)}} \quad (6.7)$$

Corrección de *RelCal* aplicado en el proceso de producción

Donde:

- $\widetilde{\widetilde{DN}}_{(x,y,b)}$: *DN* en imágenes *L3* de PS1 para los nuevos coeficientes *DSNU* y *PRNU*
- $\widetilde{DN}_{(x,y,b)}$: *DN* en imágenes *L2* y *L3* de las muestras (*RelCal* aplicado en *IGS*)
- $\Delta PRNU_{(x,b)}$: Corrección de coeficiente *PRNU*
- $\Delta DSNU_{(x,b)}$: Corrección de coeficiente *DSNU*
- $PRNU^c_{(x,b)}$: *PRNU* “Corregido”

En segundo lugar, para todas las técnicas se usó el enfoque basado en *ReflTOA*, requiriéndose contar con los valores de la irradiancia solar exo-atmosférica (*ESUN*) que integra cada banda. Al respecto, tanto los coeficientes actuales como los valores de *ESUN* para *PerúSAT-1* se detallan en la Tabla 6.1. Asimismo, para calcular la *ReflTOA* se usó la Ecuación 6.8 dentro de la cual se encuentra la variable *d* que es el factor de escala que compensa la variación de la distancia Tierra-Sol para la fecha de adquisición. Este factor de escala se calculó con la Ecuación 6.9.

Tabla 6.1: Valores actuales de coeficientes *AbsCal* y *ESUN*

Banda	<i>GAIN</i>	<i>OFFSET</i>	<i>ESUN</i>
MS0 (Azul)	5.975202615	0.0	1982.671954
MS1 (Verde)	5.741597026	0.0	1826.087443
MS2 (Rojo)	7.85915805	0.0	1540.494123
MS3 (NIR)	10.27482194	0.0	1094.747446
PAN	10.40868299	0.0	1706.514896

Fuente: metadatos de las imágenes de *PerúSAT-1*

$$\text{ReflTOA}_{(x,y,b)} = \frac{\pi \cdot \widetilde{\text{DN}}_{(x,y,b)}}{\text{GAIN}_b \cdot \text{ESUN}_b \times d \times \cos(\theta_s)} \quad (6.8)$$

Cálculo de *ReflTOA* para *PerúSAT-1*

Donde:

- $\text{ReflTOA}_{(x,y,b)}$: Valor de reflectancia al TOA para el píxel (x, y) de la banda b
 $\widetilde{\text{DN}}_{(x,y,b)}$: Valor en cuentas digitales ajustado a los nuevos coeficientes de RelCal
 GAIN_b : Coeficiente de conversión a radiancia para la banda b (Tabla 15)
 ESUN_b : Irradiancia solar integrada para la banda b (Tabla 15)
 d : Factor de escala que compensa la variación de distancia Tierra-Sol
 θ_s : Ángulo cenital solar

$$d = \frac{1}{(1 - 0,01673 \cdot \cos(0,9856 \cdot (jd - 4)))^2} \quad (6.9)$$

Ajuste de la constante solar

Fuente: adaptado de Mather & Tso (2009) [80]

Donde:

- jd : Fecha juliana correspondiente al día de la adquisición

En tercer lugar, todos los procedimientos se realizaron por lotes, y era crucial garantizar la coincidencia espacial, especialmente debido al rendimiento en geolocalización de *PerúSAT-1*. Por ello, en el contexto de esta tesis se definieron 2 términos similares que debían diferenciarse: *AOI* y *ROI*. El primero corresponde a un área grande alrededor de las coordenadas centrales de los sitios de interés, que se utilizó para corregistrar las imágenes de cada conjunto. El segundo corresponde a la superficie en sí sobre la cual se realizaron los cálculos.

En cuanto a la definición de las *AOI*'s, cada imagen tiene pequeñas diferencias en ángulos de visión y los metadatos de nivel *L3* solo detallan los valores angulares para el centro de la imagen como referencia. Por ello, debían seleccionarse sobre los centros geométricos de las imágenes: *Retina B*. Luego, se eligieron *ROI*'s procurando que fueran lo más uniformes posible, y evitando zonas de sombras que pueden variar en posición y/o extensión.

Para cada sitio se seleccionaron *AOI*s suficientemente grandes (3,500 m x 3,500 m = 1,250 x 1,250 píxeles *MS* / 5,000 x 5,000 píxeles *PAN*) para corregistrarlas con base en sus valores de DN y coordenadas relativas usando una referencia. Para la técnica de *CrossCal* se utilizó como referencia a Sentinel 2, y para las otras 2 técnicas se usó la imagen *PerúSAT-1* del conjunto con la mejor geometría de adquisición (ángulo de incidencia mas bajo).

El corregistro era necesario porque la precisión de geolocalización de *PerúSAT-1* es 25 m CE90 sin un patrón estándar de desplazamiento en (x, y) , por lo que la posición de píxeles en cada imagen variaba indistintamente. El corregistro se realizó mediante corrección de fases por correlación cruzada en el dominio frecuencial, obteniéndose valores de desplazamiento en x, y . Luego, se alinearon las componentes frecuenciales y se convirtieron nuevamente al dominio espacial mediante transformada inversa de Fourier [81]. Después de corregistrar las *AOI*s, se seleccionó un *ROI* dentro de cada una de ellas de tamaño mínimo de 70 m x 70 m,

equivalente a 25×25 píxeles MS / 100×100 píxeles PAN , y que varió según se disponía de áreas uniformes más grandes.

En las Figura 6.5 y 6.6 se muestra un ejemplo del proceso de selección de $AOIs$ y del registro respectivamente



Figura 6.5: Ejemplo de AOI y ROI

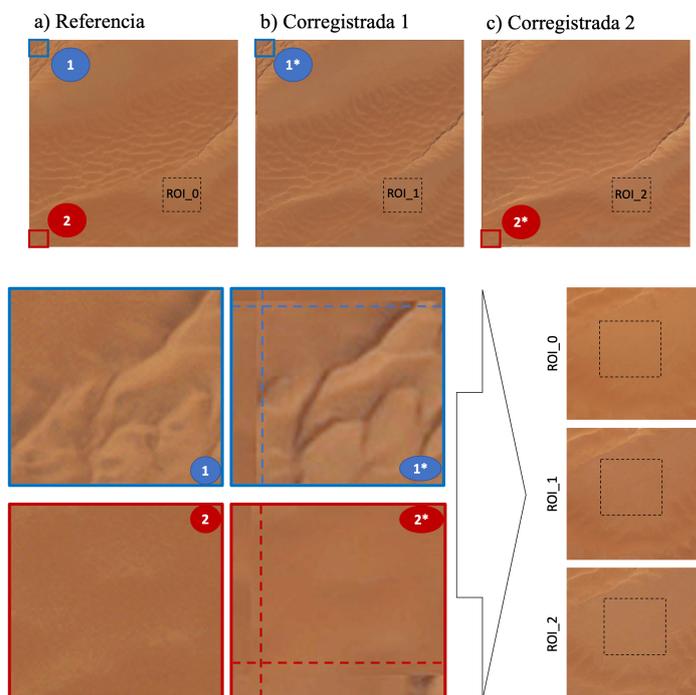


Figura 6.6: Proceso de registro de AOI y selección de ROI
 Nota: En líneas discontinuas el desplazamiento en x , y del registro

Otro proceso común fue “proyectar” las imágenes en *ReflTOA* al nadir para escalarlas al mismo recorrido atmosférico. Este proceso se realizó utilizando el coseno del ángulo de visión cenital φ_v (*VZA*), a las *ReflTOA* de los satélites: $ReflTOA_{proyectada} = ReflTOA \cdot \cos(\varphi_v)$. Es importante indicar que, para *PerúSAT-1*, φ_v es un valor único en imágenes de nivel *L3*. Sin embargo, cada “tile” correspondiente a una imagen de Sentinel 2 cuenta con varios *VZA* los que corresponden a distintos “detectores” según se describe en sus metadatos, por lo que se tuvo que usar como φ_v el *VZA* correspondiente a la localización exacta del AOI.

Finalmente, en todas las técnicas se calcularon valores de incertidumbre, basados en la Ecuación 6.10, tanto en el cálculo de la media de *ReflTOA* de *PerúSAT-1*, Sentinel 2 y los datos de *RadCalNet*. Se consideró como incertidumbre de los satélites la σ de los *ROIs* y para *RadCalNet* los datos de incertidumbre en sus reportes. Asimismo, en los ajustes lineales se realizó limpieza de valores atípicos (outliers) aplicando el método de Tukey (regla de 1.5 rangos intercuartiles) sobre los residuos de cada ajuste lineal.

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (6.10)$$

Ecuación general de propagación de errores

Donde:

σ_f	:	Incertidumbre en el resultado final
$\frac{\partial f}{\partial x_i}$:	Derivada parcial de la función respecto a la variable x_i
σ_{x_i}	:	Incertidumbre asociada a la variable x_i

Los procedimientos particulares que se realizaron se detallan en las siguientes secciones.

6.3.1. Análisis de tendencias en la reflectancia sobre *PICS*

Esta técnica se basó en la premisa de que los *PICS* eran pseudo-invariantes espacial y atmosféricamente. Por lo tanto, al evaluar las variaciones de reflectancia en imágenes adquiridas sobre un *ROI* común, se pudo determinar una tendencia directamente asociada con la degradación del sensor. El enfoque de *ReflTOA* permitía normalizar el efecto de los cambios estacionales en la *ESUN*. Sin embargo, también se realizó una evaluación de la estacionalidad de las series, por cada sitio, empleando el método de Dickey-Fuller. De acuerdo con los resultados, se aplicó la corrección del efecto de estacionalidad a las series que correspondían.

La Figura 6.7 muestra el flujograma de procedimientos realizados.

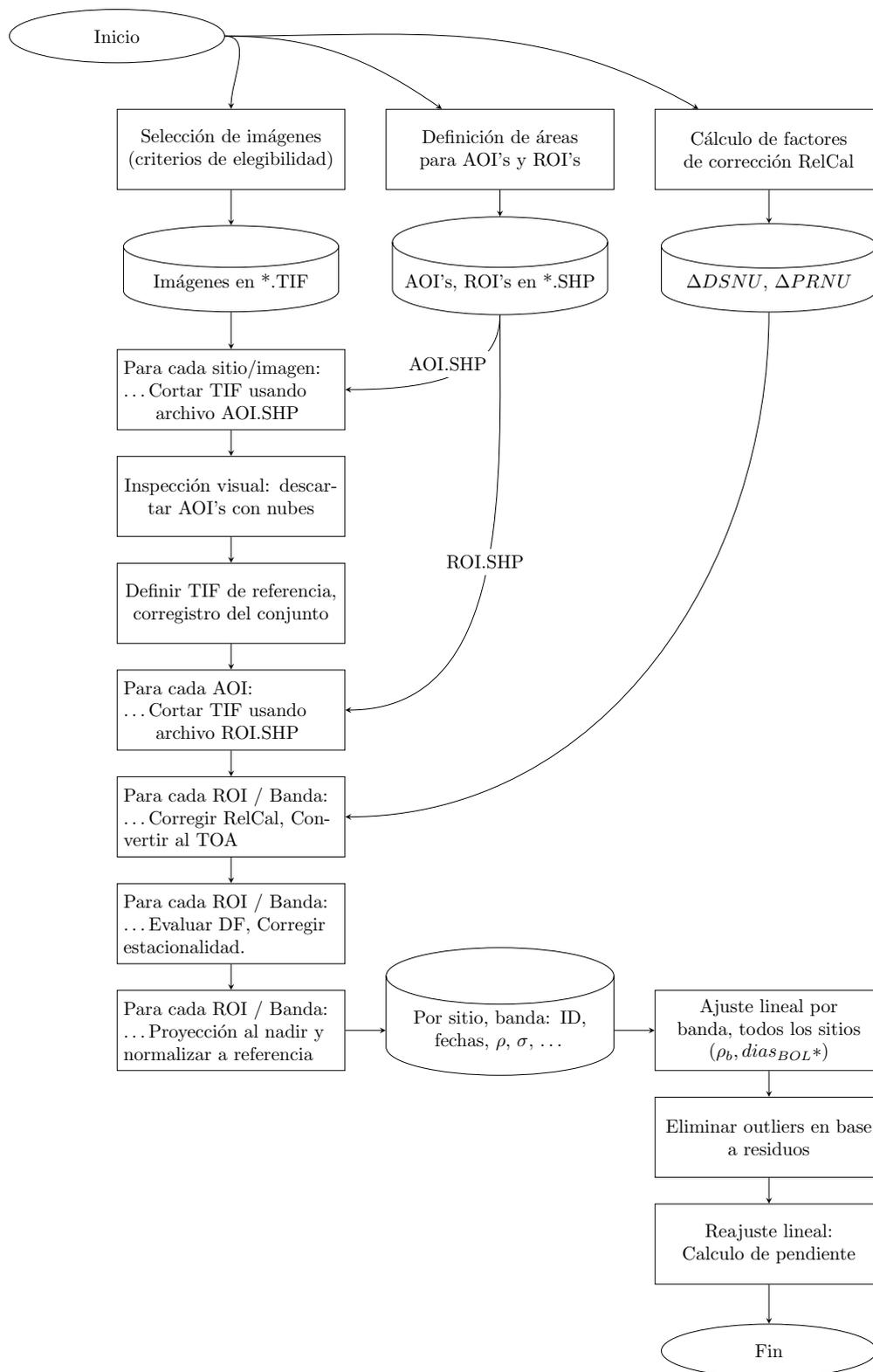


Figura 6.7: Flujoograma de cálculo de tendencia de reflectancia

Nota: * $días_{BOL}$ son los días transcurridos desde el lanzamiento del satélite

6.3.2. Calibración cruzada con el enfoque de sobrevuelo simultaneo

En el proceso de calibración cruzada *PerúSAT-1* con Sentinel 2, se encontraron 3 desafíos importantes: (1) La diferencia en el tamaño de píxel, (2) La precisión de geolocalización entre los dos sensores y (3) La necesidad de datos para determinar el perfil de reflectividad del sitio necesario para el *SBAF*. Para solucionar esto, primero se remuestrearon las bandas de *PerúSAT-1* a 10 m antes de ser corregistradas con sus análogas en Sentinel 2. En cuanto al perfil de reflectividad se usaron dos fuentes de datos según el sitio.

Para la *CrossCal* sobre *PICS* se usaron datos de Hyperion los cuales no eran coincidentes temporalmente dado que el sensor está de baja. Su uso fue determinar el comportamiento reflectivo de los *AOIs* por lo que la coincidencia espacial si era necesaria (Figura 6.8) necesitándose que estén georeferenciados. Los datos de Hyperion se encuentran disponibles a distintos niveles de proceso, de todos ellos se seleccionó el nivel *L1Gst* el cual cuenta con referencia espacial y además resultó ser el más abundante en la búsqueda.

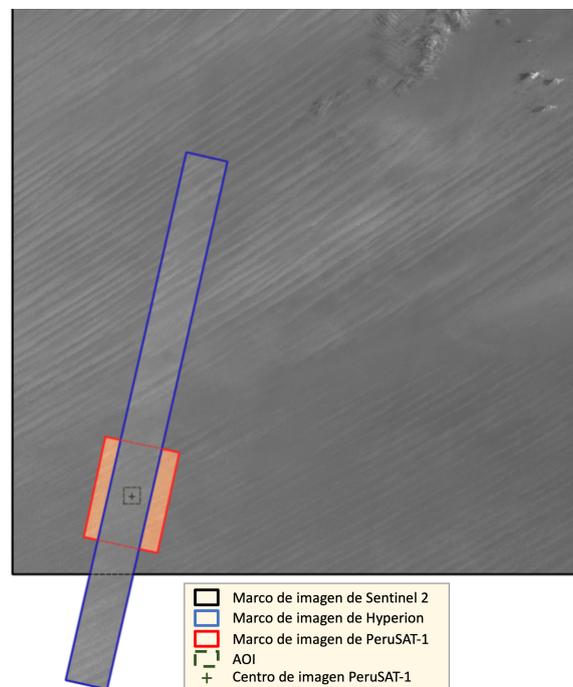


Figura 6.8: Ejemplo de coincidencia espacial entre Hyperion, *PerúSAT-1* y Sentinel 2

En las imágenes de Hyperion, se detectaron bandas vacías o con errores [82]. Además, se observaron columnas con “artefactos” tipo stripping que variaban en posición en las imágenes. Para abordar este problema, se llevó a cabo un proceso de descarte de bandas afectadas y se aplicó una máscara general por sitio con el objetivo de eliminar los píxeles anómalos que podrían afectar la media de reflectancia (Figura 6.9). Cabe mencionar que la mayoría de los errores se encontraron en las primeras bandas.

Una vez enmascaradas, las imágenes de Hyperion se convirtieron a *RefTOA*. A continuación, se realizó un análisis gráfico de los promedios de reflectancia para descartar aquellas imágenes que diferían de la tendencia general. El perfil de reflectancia se obtuvo tomando el promedio de las imágenes válidas. En la Figura 6.10, se muestra la diferencia entre las medias iniciales, y en la Figura 6.11 se presenta el perfil resultante. Se observó que las diferencias en las medias tenían un componente estacional por lo que se dio preferencia a aquellas imágenes correspondientes al mes de la calibración cruzada.

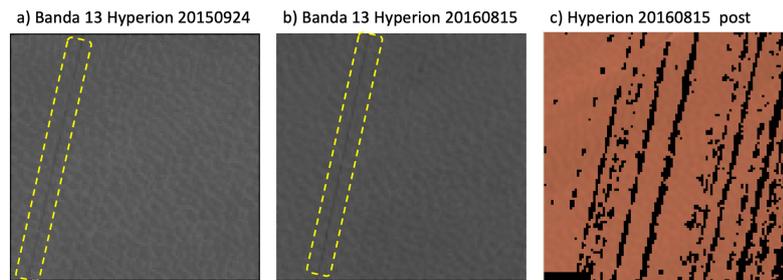


Figura 6.9: Enmascaramiento de imágenes Hyperion

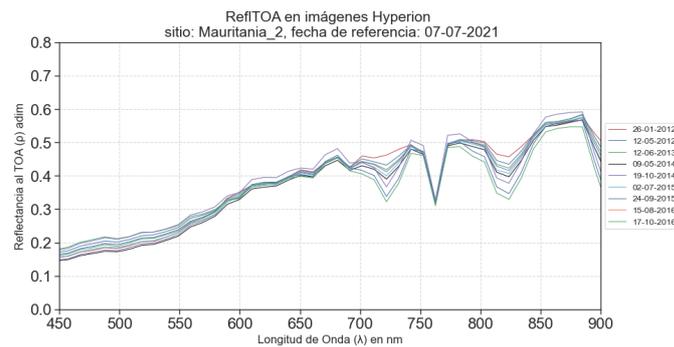


Figura 6.10: Medias de reflectividad Hyperion sobre el sitio Mauritania_2

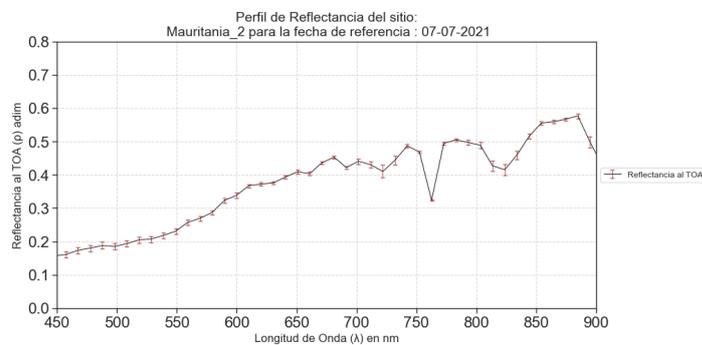


Figura 6.11: Perfil de reflectividad final para el sitio Mauritania_2

La segunda fuente de datos utilizada para obtener el perfil de reflectividad fueron los reportes de *RadCalNet*. Para este caso, se emplearon los datos correspondientes al mes de la calibración cruzada. Los datos de *RadCalNet* se presentan con una frecuencia de cada media hora, por lo que fue necesario realizar una ponderación para ajustarlos a la hora exacta del paso del satélite. Los detalles de este procedimiento se describirán más adelante. Una vez recopilados todos los datos de reflectancia, se realizó un promedio para obtener el perfil de reflectividad del sitio.

Antes de aplicar el *SBAF*, se llevó a cabo la conversión de los valores de *DN* de *PerúSAT-1* a *ReflTOA* y se corrigieron las diferencias con respecto a Sentinel 2 a nivel de píxel. Estas diferencias se debían a las variaciones en los ángulos de visión y resultaban en posiciones distintas de sombras. La premisa adoptada fue que tanto las áreas iluminadas como las áreas en sombra podían utilizarse para la comparación, ya que se basaba en los promedios en *ReflTOA* de ambos sensores en el *AOI* correspondiente. Sin embargo, era crucial asegurarse de que los píxeles coincidieran en una u otra condición.

Con el fin de evitar que los píxeles iluminados o en sombra no coincidentes afectaran el cálculo del promedio, se analizaron las diferencias aritméticas entre bandas análogas. Aquellos píxeles que presentaban una alta diferencia fueron considerados como valores atípicos y se creó una máscara que se aplicó previamente a la comparación. Para identificar dichos valores atípicos, se utilizó el método de Tukey.

La Figura 6.12 muestra el flujograma de los procedimientos realizados para *CrossCal*.

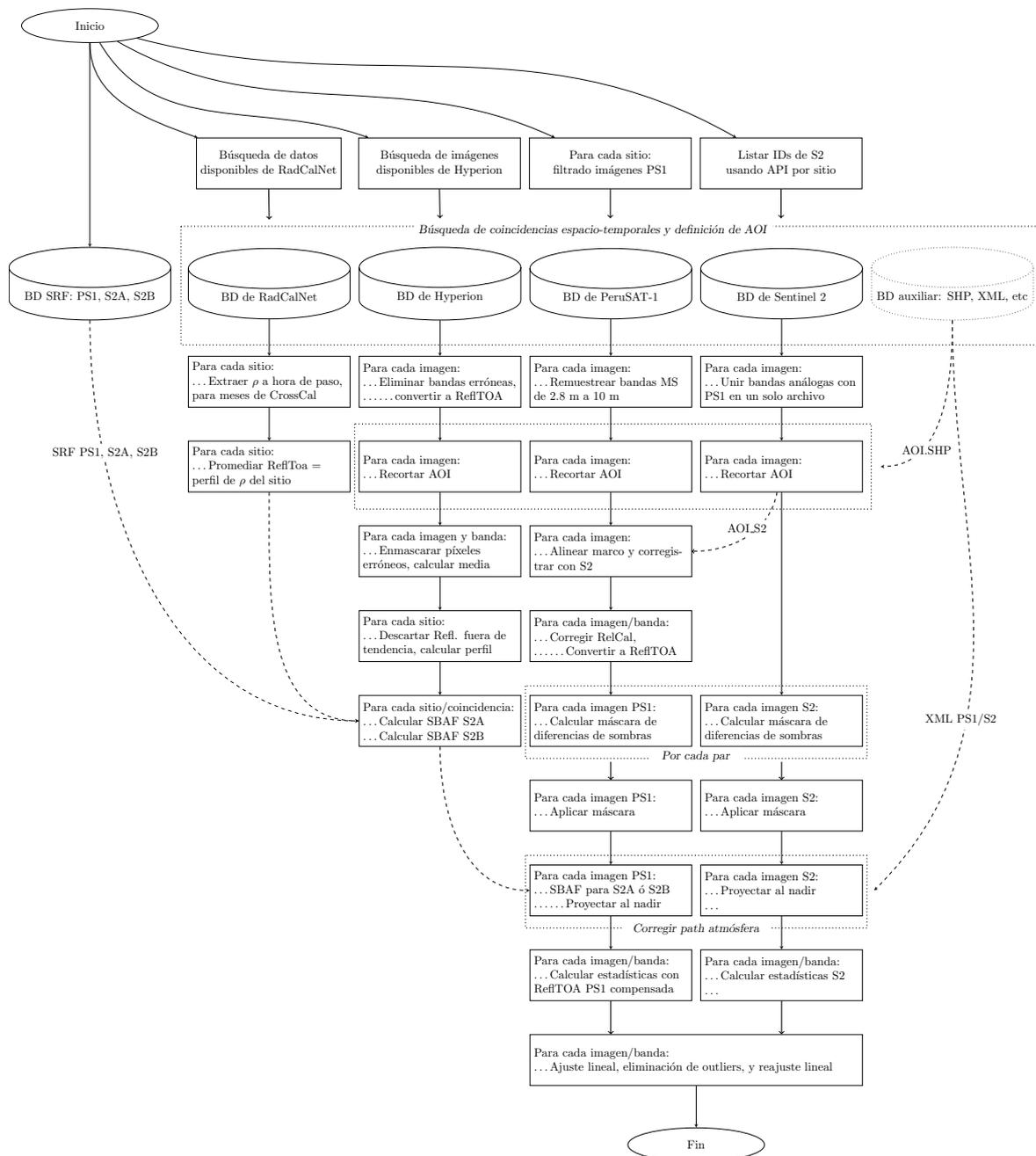


Figura 6.12: Flujograma de cálculo de *CrossCal*

6.3.3. Calibración absoluta basada en *RadCalNet*

Esta técnica se desarrolló por lotes, lo cual requería un corregistro muy preciso, para ello se usó como referencia la imagen de cada sitio con mejor geometría de adquisición (menor ángulo de incidencia). Es importante destacar que cada sitio de *RadCalNet* tiene un área designada para la toma de datos, la cual se utiliza oficialmente para la calibración radiométrica absoluta y suele ser de tamaño reducido.

Otro desafío importante en esta técnica fue estimar la *ReflTOA* en el momento en que el satélite sobrevolaba el sitio. Para abordar este problema, se empleó una interpolación lineal basada en los valores medidos antes y después por *RadCalNet* (Ecuación 6.11). Una vez calculada la reflectancia del sitio para el tiempo de paso del satélite, se convolucionó con la *SRF* de *PerúSAT-1* y se integró en el rango de λ correspondiente a cada banda, obteniéndose los coeficientes mediante la razón entre los valores de *ReflTOA* de *PerúSAT-1* y los de *RadCalNet* convolucionados con la *SRF*. Al igual que en todas las técnicas anteriores, se eliminaron los valores atípicos en base a los residuos del ajuste lineal antes de realizar un reajuste, del que finalmente se obtuvo la pendiente y ordenada.

$$\rho(\lambda, t_{\text{sat}}) = \rho(\lambda, t_a) + (\rho(\lambda, t_p) - \rho(\lambda, t_a)) \cdot \frac{t_{\text{sat}} - t_a}{t_p - t_a} \quad (6.11)$$

Estimación de reflectancia espectral a la hora de paso del satélite

Donde:

- $\rho(\lambda, t_{\text{sat}})$: *ReflTOA* de *RadCalNet* a la hora de paso del satélite
- $\rho(\lambda, t_a)$: *ReflTOA* de *RadCalNet* correspondiente a la columna anterior a la hora de paso
- $\rho(\lambda, t_p)$: *ReflTOA* de *RadCalNet* correspondiente a la columna posterior a la hora de paso
- t_{sat} : Hora de paso del satélite
- t_a : Hora correspondiente a la columna anterior a la hora de paso del satélite
- t_p : Hora correspondiente a la columna posterior a la hora de paso del satélite

La Figura 6.13 muestra el flujograma de los procedimientos realizados en la técnica de calibración absoluta usando datos de *RadCalNet*.

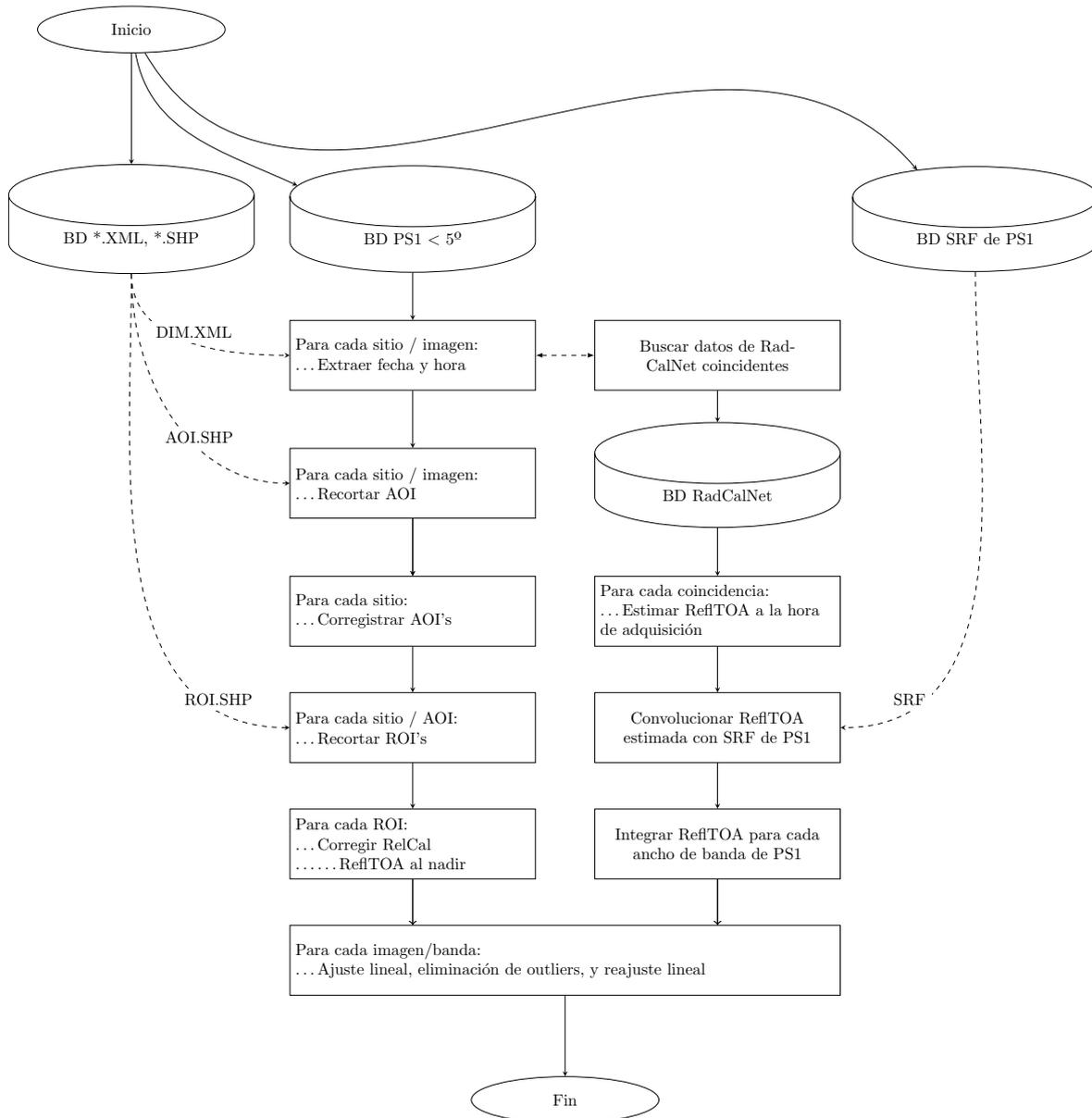


Figura 6.13: Flujograma de cálculo de *AbsCal* usando datos de *RadCalNet*

6.3.4. Integración de resultados de las técnicas aplicadas para *AbsCal*

Una vez obtenidos los resultados de cada técnica, se procedió a integrarlos para obtener un resultado único, ponderándolos de la siguiente manera:

- a) Ponderación de las pendientes obtenidas en cada técnica:

La ponderación de las pendientes se realizó considerando tanto la cantidad de datos como el Error Cuadrático Medio (*RMSE*) correspondiente. Esta aproximación permitió asignar un mayor peso a aquella técnica que presentó un menor error y una mayor cantidad de datos. Para llevar a cabo esta ponderación, se dividió la cantidad de datos normalizada entre el error normalizado correspondiente. Los pesos resultantes se multiplicaron por las pendientes obtenidas en cada técnica y se sumaron.

La ecuación que representa este proceso de ponderación de las pendientes es la siguiente:

$$\beta_{\text{pond}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{\text{norm}_i}}{E_{\text{norm}_i}} \cdot \beta_i \right) \quad (6.12)$$

Ponderación de pendientes de la técnicas aplicadas

Donde:

- n : Número total de técnicas utilizadas.
- D_{norm_i} : Cantidad de datos normalizada de la técnica i .
- E_{norm_i} : *RMSE* normalizado de la técnica i .
- β_i : Pendiente obtenida en la técnica i .

- b) Ponderación de las ordenadas obtenidas en cada técnica:

La ponderación de las ordenadas se realizó utilizando el mismo enfoque y la misma ecuación mencionada anteriormente, pero aplicada a las ordenadas. Sin embargo, se hizo una excepción para la ordenada obtenida mediante la técnica de análisis de tendencia debido a las razones explicadas previamente. Es importante destacar que en el caso de la banda *PAN*, solo se disponía de la ordenada obtenida mediante la técnica de *RadCalNet*. Por lo tanto, se decidió utilizar esta ordenada, ya que desde una perspectiva radiométrica, la importancia de las imágenes de *PerúSAT-1* se centra en las bandas *MS*.

Una vez obtenida la función de ajuste lineal con las ordenadas y pendientes ponderadas, se realizó una nueva evaluación para determinar la incertidumbre final basada en el *RMSE* del conjunto de datos con dicha función lineal, a la que se agregó la incertidumbre asociada al sensor que se encuentra en los archivos de metadatos.

Finalmente, se realizó la estimación de los coeficientes de calibración absoluta y se determinaron sus valores de incertidumbre para cada uno de los períodos definidos en la investigación.

Capítulo 7

Resultados y discusión

7.1. Calibración relativa

7.1.1. Señal en Oscuridad *DSNU*

El objetivo de investigación en esta parte, fue calcular los valores de los coeficientes de *DSNU* de *PerúSAT-1* en el período de estudio. Para ello se estableció una frecuencia semestral de cálculo, se establecieron criterios de elegibilidad para las muestras y se detallaron los procedimientos. Si bien el cálculo del *DSNU* se realiza para cada detector, el considerable número de detectores dificulta examinarlos individualmente. En su lugar, se presenta un análisis general que permite observar las tendencias y patrones en el comportamiento global de los detectores, brindando una visión más amplia y representativa de su evolución.

Los resultados del cálculo de *DSNU* por bandas se presentan en las Figuras 7.1 - 7.5. Cada figura consta de dos filas: la primera muestra los valores de señal en oscuridad para cada detector dentro de un arreglo, mientras que la segunda fila representa la evolución media de la señal en oscuridad durante el período de estudio. Por razones de espacio disponible en los gráficos, los valores de la banda *PAN* se dibujan cada 4 detectores.

Durante el análisis, se pudo observar un cambio constante en las señales en oscuridad de todos los detectores, tal como se aprecia en las primeras filas de todas las figuras. En la mayoría de los casos, estas señales divergieron de las registradas antes del lanzamiento, mostradas en líneas rojas. Esto era previsible, dado que el comportamiento del sensor en Tierra no es igual que en el Espacio.

Se observan picos notorios de incremento o disminución en el *DSNU* en algunos detectores, pero estos se repiten en todas las líneas y en las mismas magnitudes, incluyendo las mediciones pre-lanzamiento. Por lo tanto, se considera que son normales y posiblemente generados por la cadena electrónica interna. No se detectaron casos de señales anómalas significativamente superiores o inferiores al patrón general, incluyendo los picos mencionados. Esto indica que todos los detectores en todas las bandas y arreglos funcionan correctamente.

En las segundas filas de las figuras, se presenta la evolución temporal de $DSNU$ de manera global, tomando como base la media de cada período analizado. Como se puede observar, el $DSNU$ se incrementó de forma lineal, aunque con pendientes diferentes entre bandas y retinas. La desviación estándar se mantuvo constante en todos los períodos, lo que indica una alta estabilidad en el desempeño global de los arreglos. Además, a estos gráficos se agregan las medias de $DSNU$ calculadas previamente, las cuales forman parte de los $GIPP$ que actualmente se usan en el procesamiento de las imágenes de *PerúSAT-1*.

En general, se observa que los cálculos realizados anteriormente están ligeramente alejados de la línea de tendencia obtenida para cada retina en esta investigación, aunque en algunos casos coinciden, lo que indica que el proceso anterior no difiere significativamente del propuesto. Las variaciones pueden atribuirse principalmente al proceso de selección de las muestras.

Cada arreglo de detectores mostró un comportamiento diferente en comparación con sus análogos en otras bandas espectrales, lo cual refuerza la necesidad de continuar realizando la calibración relativa por retinas. La Banda $MS0$ (azul) en la retina A (Figura 7.1) presentó la mayor dispersión y comportamientos inusuales, lo que amerita una investigación más profunda. Cabe destacar que esta banda también mostró comportamientos anómalos durante la evaluación del impacto de la iluminación lunar en el cálculo de $DSNU$. Por otro lado, la Banda PAN mostró una señal de oscuridad muy estable y siguió patrones constantes de incremento.

La Tabla 7.1 presenta los resultados del ajuste lineal realizado a las medias de $DSNU$ en cada banda y retina, con el objetivo de evaluar su evolución. En general, la mayoría de los valores de R^2 son superiores a 0.95, lo cual indica que aproximadamente el 95% de la variabilidad de la señal en oscuridad puede explicarse por el tiempo transcurrido. Esto sugiere que el modelo de regresión lineal utilizado es capaz de capturar y predecir adecuadamente el comportamiento de la señal en oscuridad en función del tiempo.

Sin embargo, también se observaron tres casos en los que el valor de R^2 fue ligeramente más bajo, con valores de 0.849, 0.882 y 0.885 para la banda $MS0$ (azul) en la Retina A, la banda $MS1$ (verde) en la Retina A y la banda $MS0$ (azul) en la Retina C, respectivamente. Aunque estos valores no son tan altos como los demás, aún indican una correlación lineal positiva entre el incremento de la señal en oscuridad y el tiempo.

Tabla 7.1: R^2 de ajustes lineales de la evolución de $DSNU$

	Retina A	Retina B	Retina C
Banda $MS0$ (azul)	0.849	0.969	0.885
Banda $MS1$ (verde)	0.882	0.977	0.941
Banda $MS2$ (rojo)	0.984	0.969	0.956
Banda $MS3$ (NIR)	0.981	0.977	0.973
Banda PAN	0.993	0.994	0.992

Nota: en negrita los valores mas bajos

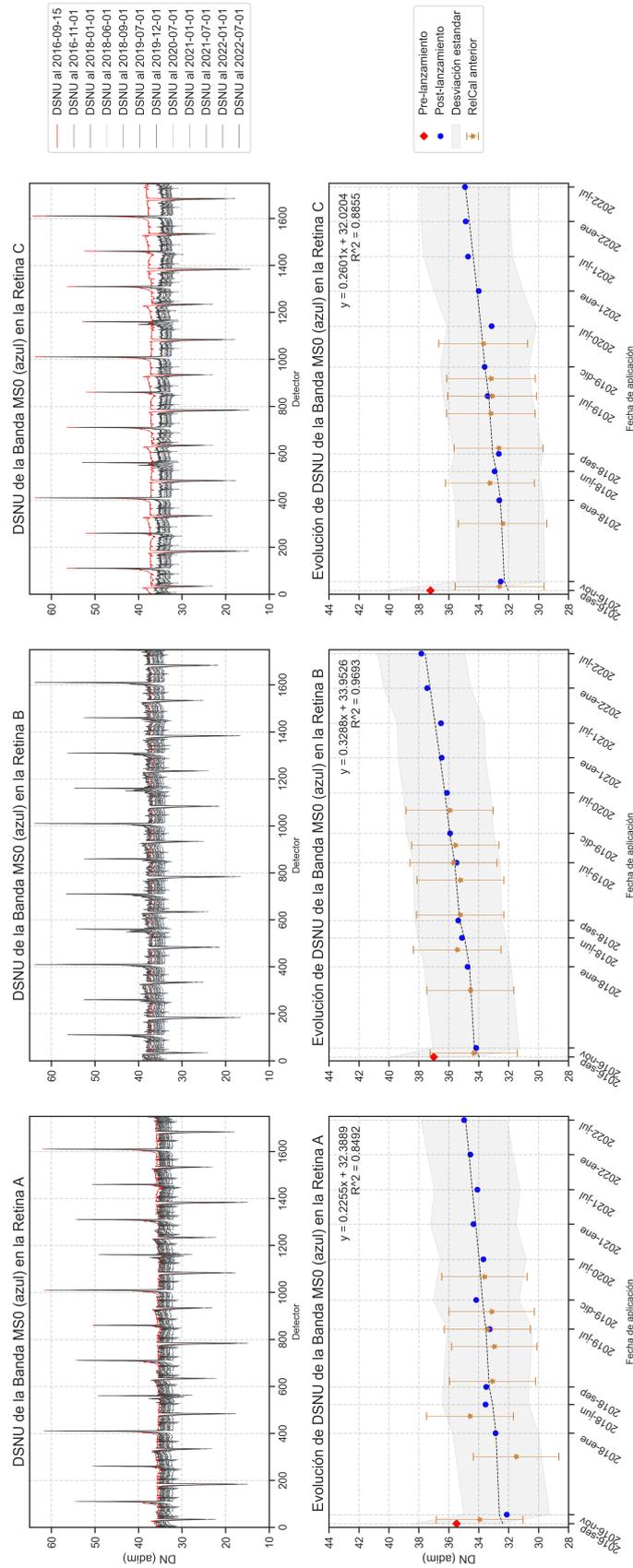


Figura 7.1: Resultados de calibración relativa DSNU para la banda MS0

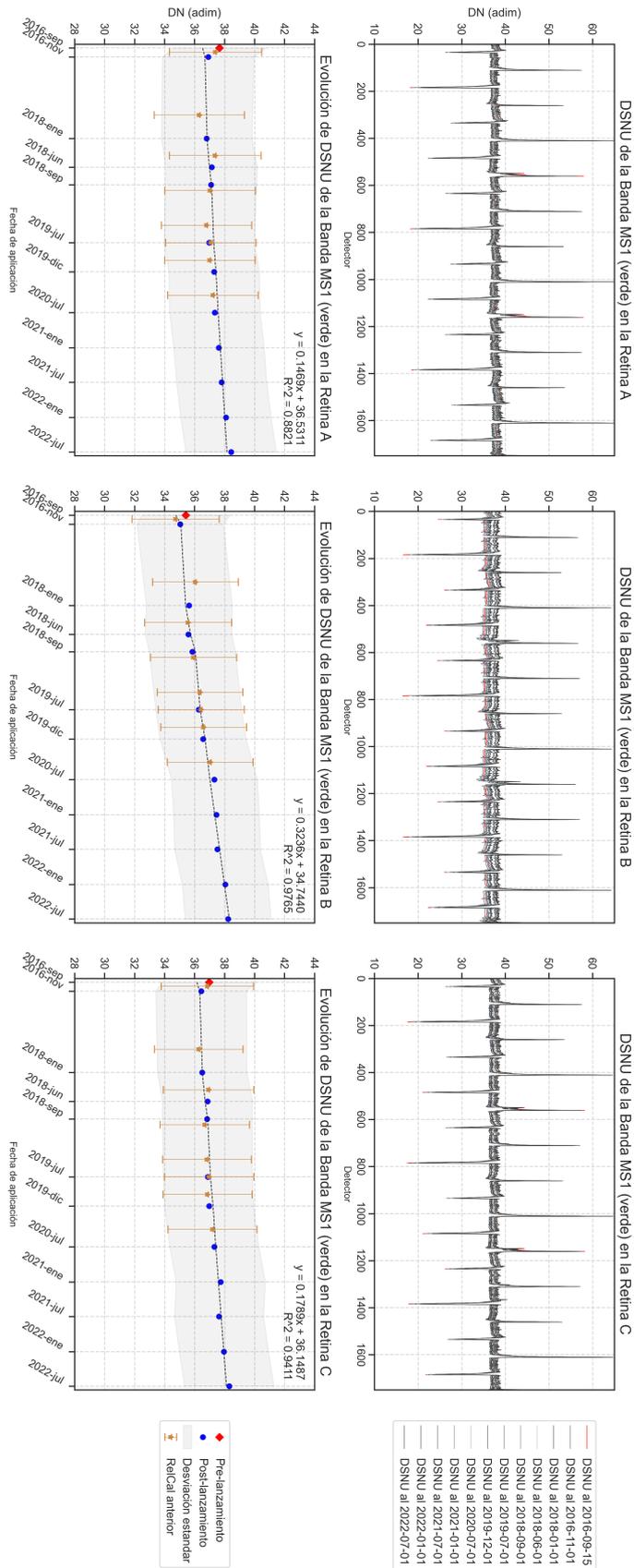


Figura 7.2: Resultados de calibración relativa *DSNU* para la banda *MS1*

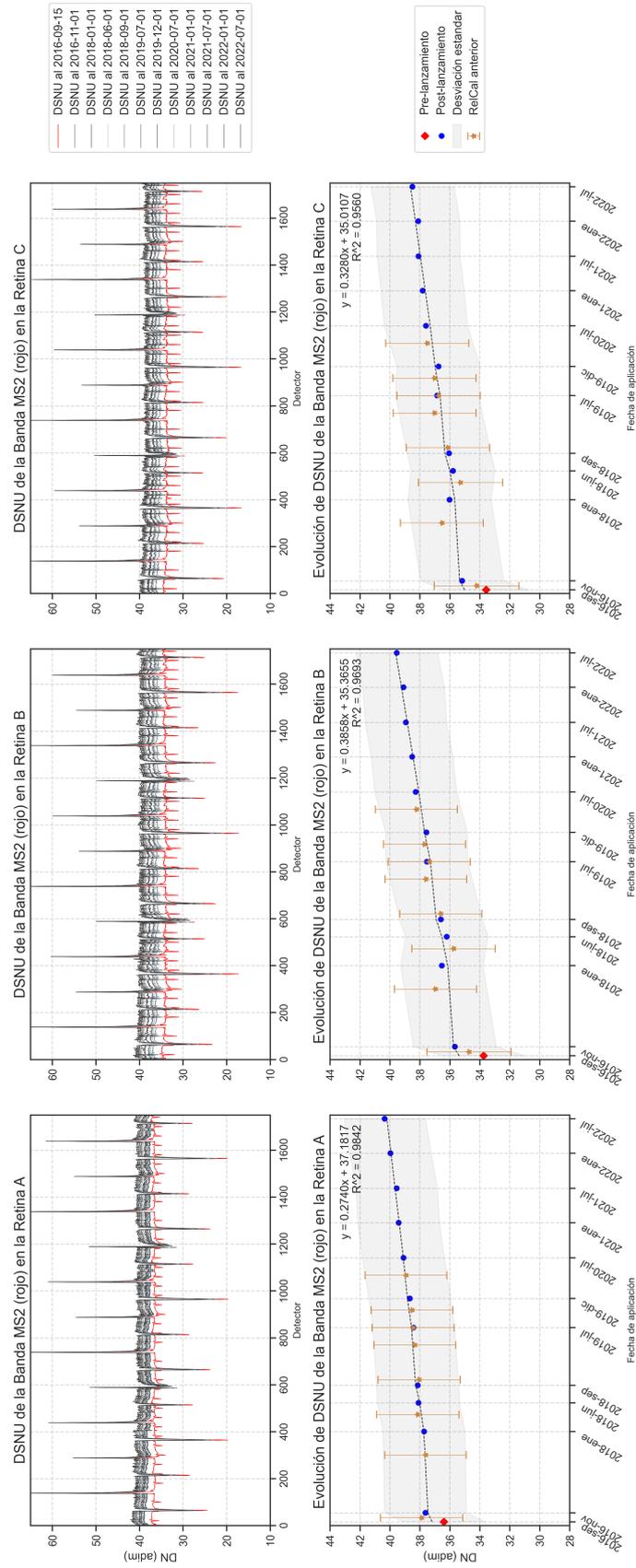


Figura 7.3: Resultados de calibración relativa DSNU para la banda MS2.

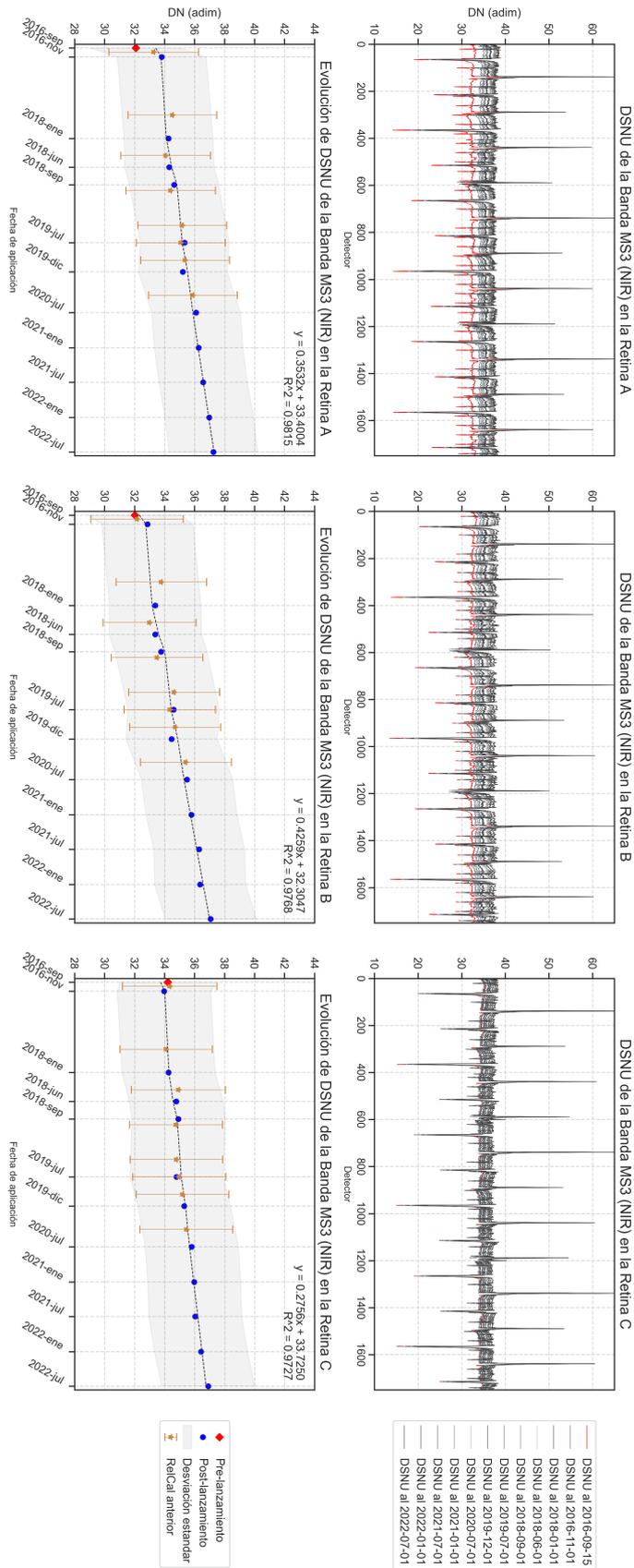


Figura 7.4: Resultados de calibración relativa *DSNU* para la banda *MS3*

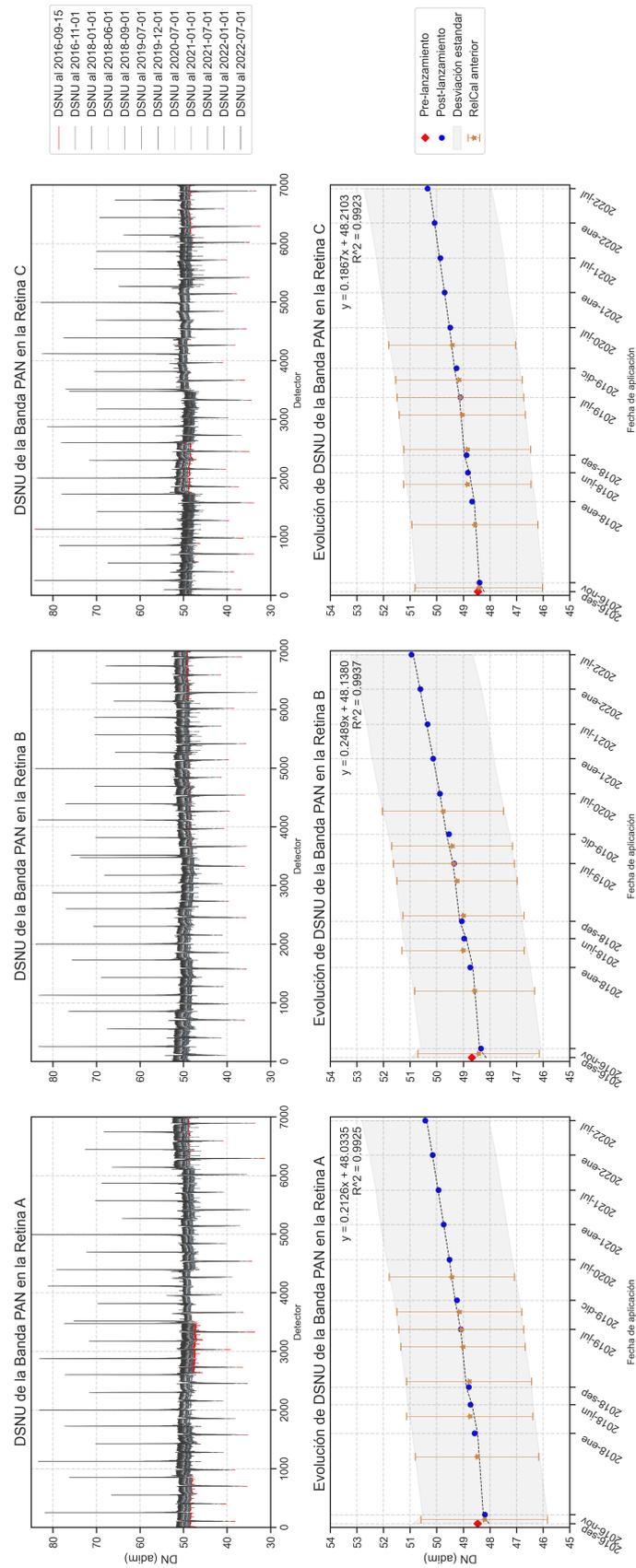


Figura 7.5: Resultados de calibración relativa DSNU para la banda pancromática

7.1.2. Respuesta de píxel *PRNU*

El objetivo de investigación en esta parte fue calcular los valores de los coeficientes de *PRNU* o respuesta relativa de los detectores de *PerúSAT-1* durante el período de estudio. Se estableció la misma frecuencia semestral de cálculo que se definió para *DSNU* debido a la interrelación entre ambos tipos de coeficientes. También se establecieron criterios de elegibilidad específicos para las muestras de *PRNU*, y se detallaron los procedimientos de cálculo. Los resultados se presentan en las Figuras 7.6 - 7.10, siguiendo el mismo formato de las figuras que explican el *DSNU*.

En las sub-figuras de las primeras filas, se puede observar que, en general, los coeficientes de *PRNU* calculados se mantuvieron constantes durante todo el período de estudio. Sin embargo, se observan diferencias significativas en las curvas de *PRNU* en comparación con las curvas pre-lanzamiento. Estas diferencias se reflejan en las variaciones de las frecuencias bajas de las curvas, mientras que las magnitudes sobre dichas frecuencias se mantienen constantes. Al igual que en el caso anterior, esto se debe al cambio del ambiente operacional.

En cuanto a los *PRNU* calculados para el período de estudio, no se observan variaciones de frecuencias bajas que indiquen alteración en la radiometría de algún grupo de columnas dentro de los arreglos, lo que indica uniformidad radiométrica en los productos y confirma que todos los detectores en todas las bandas y arreglos funcionan correctamente.

En las segundas filas de las figuras, se presenta la evolución temporal de *PRNU* de manera global tomando como base la media de cada período analizado. Los resultados muestran nuevamente la estabilidad en la respuesta de los detectores, dado que todas las medias son ~ 1 .

Sin embargo, también se observa que las medias de los coeficientes de *PRNU* presentes en los *GIPP* actuales, a partir de mediados de 2018, se alejan de la tendencia calculada (~ 1). Estas variaciones, que oscilan entre el 1% y el 2% a nivel de retinas, deben corregirse, ya que afectan los valores de radiometría global en las imágenes a partir del nivel L2. Cabe indicar que los coeficientes de *PRNU* son valores normalizados a la media de su retina respectiva, por lo tanto, su promedio debe ser 1 o muy cercano, lo cual no ocurre con los valores de los coeficientes *PRNU* actualmente presentes en *GIPP*.

En cuanto a los resultados del ajuste lineal se observa que en todos los casos los valores de R^2 son inferiores a 0.460. Esto indica que el modelo lineal utilizado no puede explicar de manera efectiva la variabilidad en los datos. El resultado era de esperar, ya que en el tiempo los promedios de *PRNU* no deben variar significativamente de ~ 1 . Por lo tanto, el tiempo no es la variable adecuada para explicar la evolución del *PRNU*.

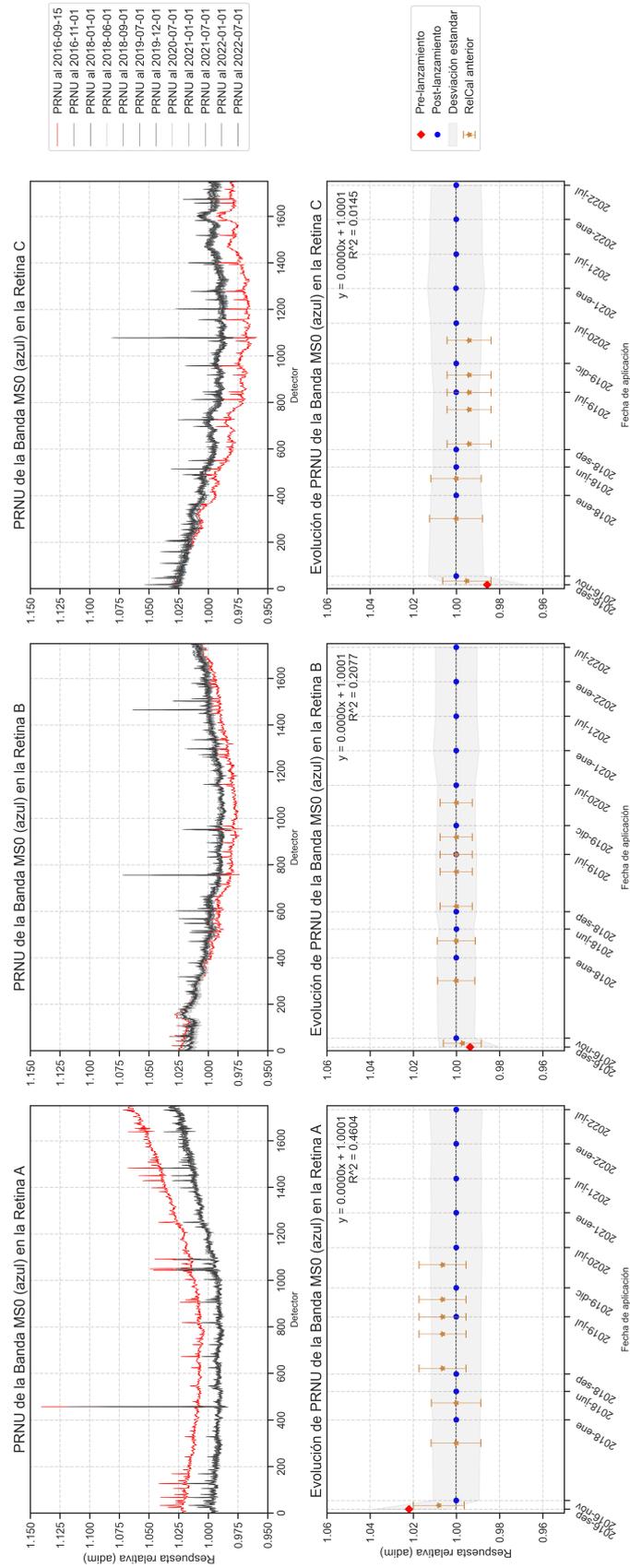


Figura 7.6: Resultados de calibración relativa PRNU para la banda MS0

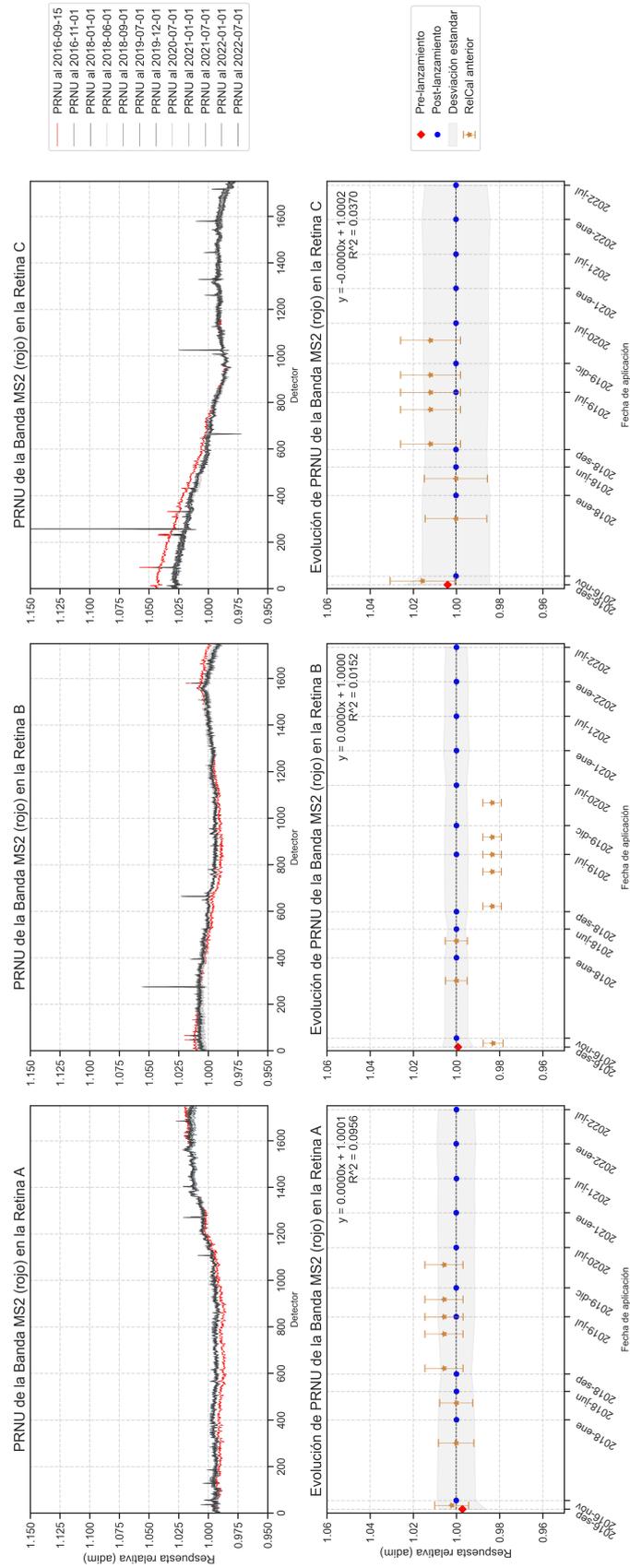


Figura 7.8: Resultados de calibración relativa PRNU para la banda MS2

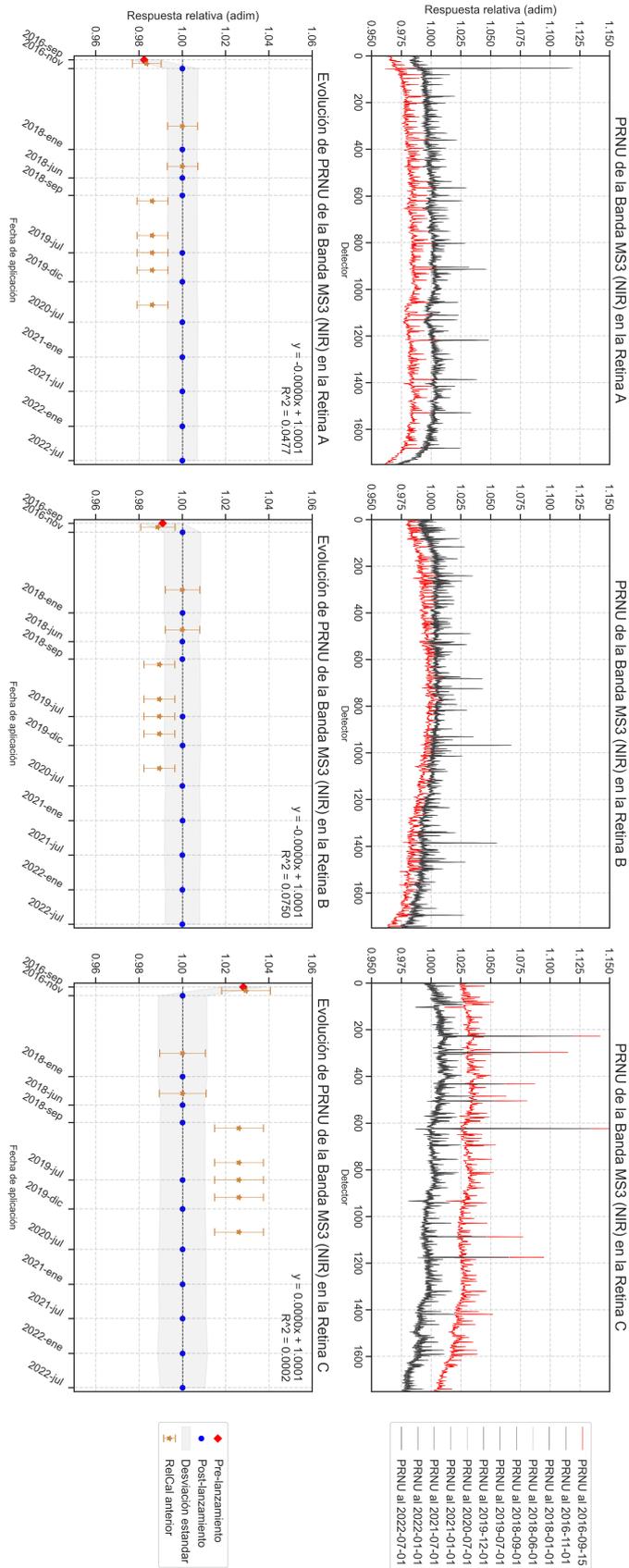


Figura 7.9: Resultados de calibración relativa DSNU para la banda MS3

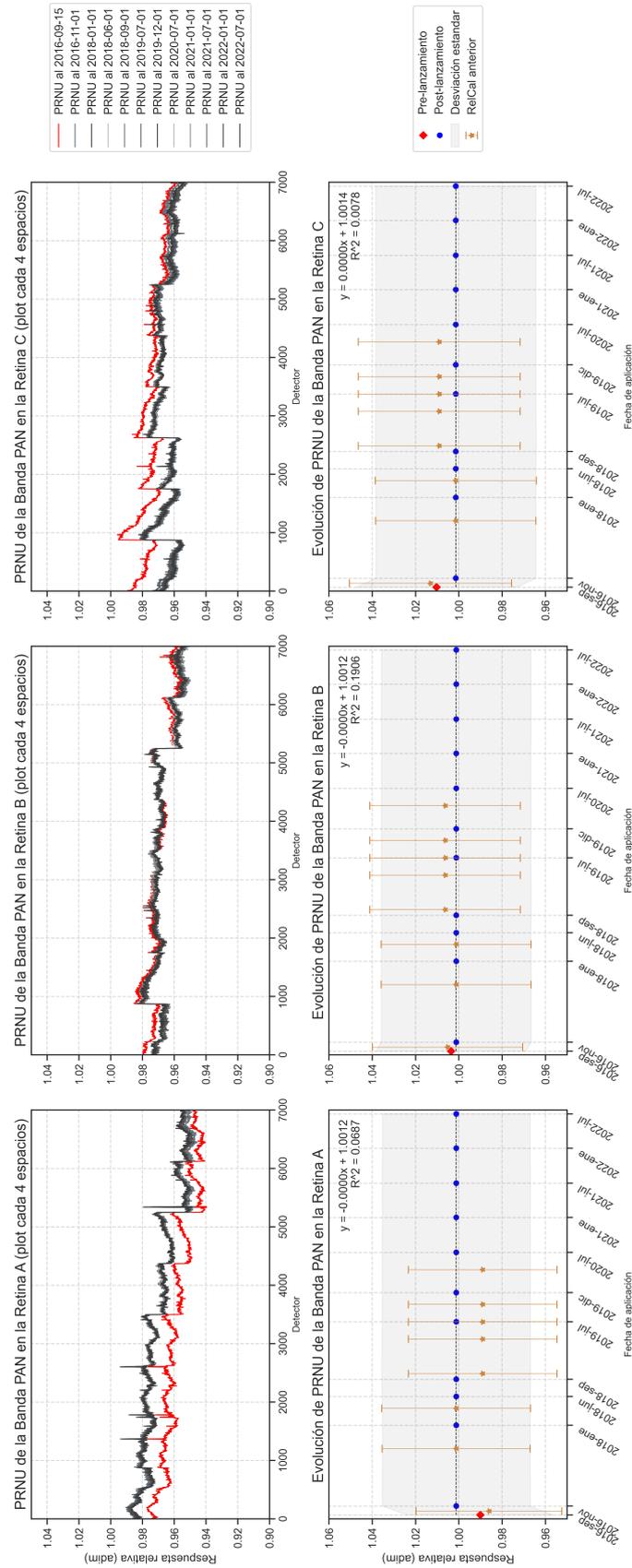


Figura 7.10: Resultados de calibración relativa PRNU para la banda pancromática

7.2. Calibración absoluta

En esta sección se muestran los resultados de los cálculos de calibración absoluta siguiendo la metodología propuesta. Cabe indicar que estos cálculos se realizaron sobre la base de la nueva calibración relativa realizada, para lo cual se aplicó un ajuste de coeficientes, cuyo detalle se explicó en los procedimientos.

El objetivo de esta investigación en cuanto a *AbsCal* fue el de calcular los valores del coeficiente *GAIN* en todas las bandas para los períodos de calibración definidos. Sin embargo, en lugar de utilizar directamente los resultados parciales de los valores de *GAIN* obtenidos por cada técnica, se optó por emplear los coeficientes de ajuste lineal en cada una de ellas para derivar una tendencia global única del sensor. A partir de esta tendencia global, se realizaron análisis de regresión lineal para calcular los coeficientes *GAIN* correspondientes a cada período de calibración establecido, junto con sus respectivas incertidumbres.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el enfoque de utilizar un único ajuste lineal presentó tanto ventajas como desventajas. Una desventaja destacada fue la disparidad en la cantidad de datos disponibles para cada técnica, lo que resultó en un mayor peso de una técnica sobre la otra. Para abordar esta situación, se consideró el valor del *RMSE* (Error Cuadrático Medio) como un factor para ponderar los pesos, otorgando menor importancia a los ajustes lineales con mayor incertidumbre.

7.2.1. Análisis de Tendencia Sobre *PICS*

Los resultados del análisis de tendencia realizado para la *ReflTOA* de *PerúSAT-1* sobre *PICS* se presentan en la Figura 7.11. En general, se observa una disminución gradual en la *ReflTOA* de todas las bandas desde el lanzamiento del satélite. Esto indica una tendencia de reducción en la capacidad de medición radiométrica del sensor a lo largo del tiempo, tal como se evidencia en las pendientes negativas de los ajustes lineales realizados.

En la Tabla 7.2, se muestran los resultados de los ajustes lineales y la evaluación de los modelos. Es importante destacar que los valores de R^2 obtenidos en cada ajuste son bajos, oscilando entre 0.026 y 0.074. Esto sugiere que los modelos ajustados entre la *ReflTOA* y el tiempo no logran explicar de manera adecuada la variabilidad de los datos, lo que indica una dispersión no explicada. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la falta de explicación de la variabilidad no implica necesariamente la inadecuación de los modelos, ya que pueden influir otros factores adicionales.

En el proceso de teledetección, existen numerosas variables que influyen en el cálculo de la *ReflTOA*, tales como las condiciones operacionales y las propiedades de la superficie y la atmósfera en el momento de la adquisición. Estos factores adicionales pueden contribuir a la variabilidad observada y limitar la capacidad del modelo para explicar completamente los datos. Sin embargo, ello no afecta el objetivo establecido en la metodología, que es evaluar la tendencia global.

Por otro lado, los valores de *RMSE* se encuentran en el rango de 0.178 a 0.348, lo cual indica una baja incertidumbre promedio en la predicción y sugiere que el modelo ajustado es aceptable en términos de su capacidad predictiva. Además, las desviaciones típicas de los errores de predicción para todas las bandas son muy reducidas, lo que evidencia una alta precisión en los coeficientes de regresión estimados.

En conclusión, las pendientes obtenidas en los ajustes lineales de los resultados de esta técnica son aceptables para predecir los coeficientes de ganancia (*GAIN*) de *PerúSAT-1* en el rango de fechas observadas. Sin embargo, es importante destacar que todos los cálculos de *ReflTOA* se hicieron utilizando los coeficientes *GAIN* pre-lanzamiento. Por lo tanto, no se recomienda utilizar las ordenadas de los ajustes lineales para determinar los coeficientes *GAIN* al inicio de la vida operacional del satélite.

Tabla 7.2: Resultado del ajuste lineal de análisis de tendencia sobre *PICS*

Banda	Cant. datos	Pendiente	Ordenada	RMSE	Std. err	R^2
MS0	451	-1.07145E-04	6.120637606	0.238964854	1.98163E-05	0.061130696
MS1	453	-8.87219E-05	5.858196139	0.178533694	1.47783E-05	0.074002627
MS2	443	-8.98182E-05	7.929579851	0.206522445	1.73166E-05	0.057497519
MS3	444	-1.07736E-04	10.35395149	0.348101832	2.88676E-05	0.030549261
PAN	444	-8.05238E-05	10.48179131	0.277923512	2.32713E-05	0.026373942

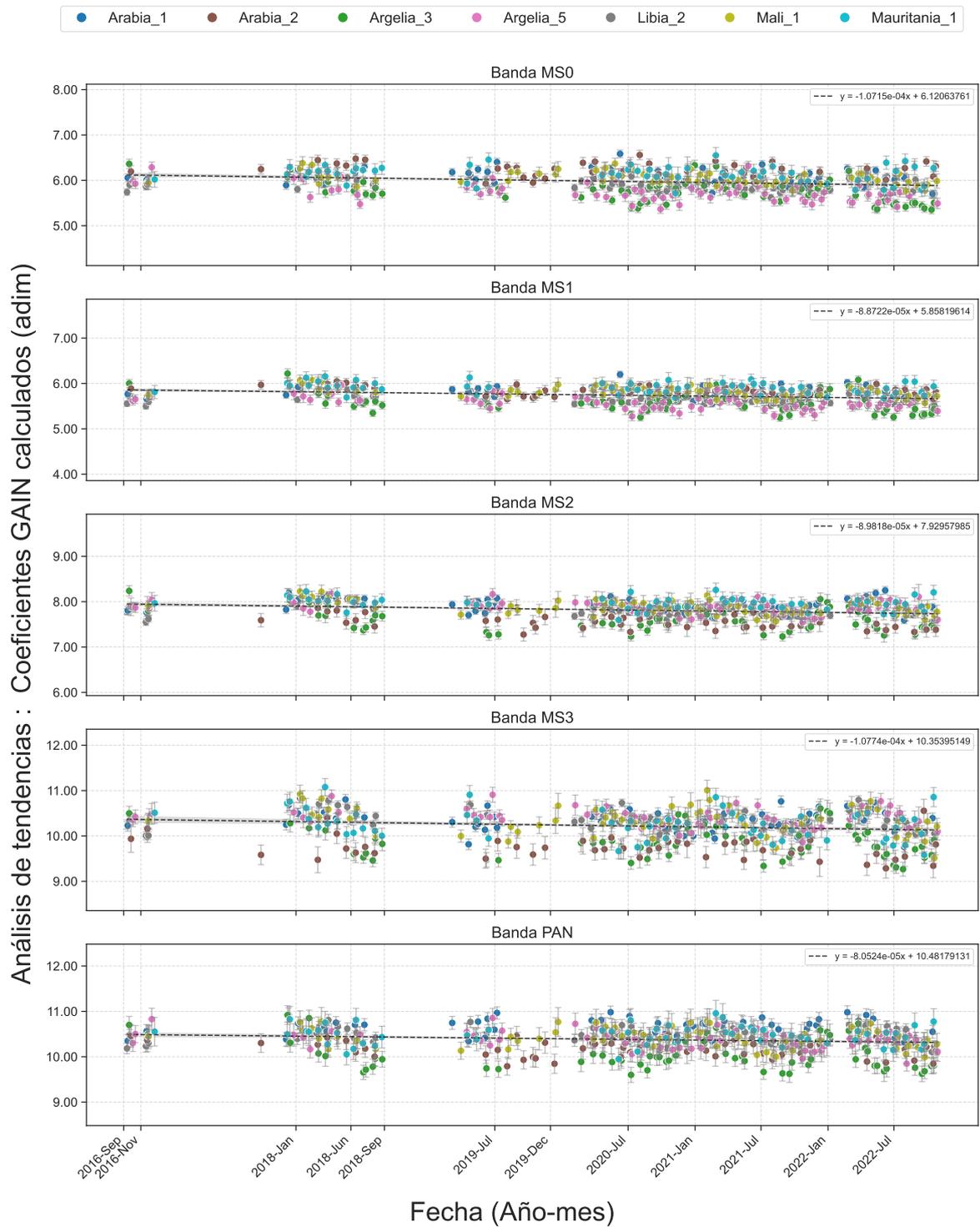


Figura 7.11: Resultados de análisis de tendencia sobre *PICS*

7.2.2. Calibración cruzada con Sentinel 2(A&B)

Los resultados del análisis de calibración cruzada entre *PerúSAT-1* y Sentinel 2, utilizando los enfoques de *ReflTOA* y simultaneidad, se presentan en la Figura 7.12. De manera general, se observa que la *ReflTOA* para todas las bandas de *PerúSAT-1* ha disminuido en comparación con las mediciones realizadas por Sentinel 2 en los mismos sitios. Esto se evidencia en las pendientes negativas de los ajustes lineales realizados.

Es importante destacar que algunas bandas tienen valores calculados solo para ciertas fechas, mientras que para otras fechas no se obtuvieron valores debido al proceso de limpieza de valores atípicos durante el procesamiento. Dado que las bandas presentan comportamientos diferentes, es posible que se detecten valores atípicos en algunas bandas y no en otras.

En la Tabla 7.3 se muestran los resultados de los ajustes lineales y la evaluación de los modelos. Nuevamente, los valores de R^2 obtenidos en cada ajuste son bajos, oscilando entre 0.038 y 0.233. Esto indica que los modelos ajustados no logran explicar completamente la variabilidad de los datos, pero esto no afecta el objetivo de evaluar la tendencia global.

En cuanto a la precisión, los valores de *RMSE* están en el rango de 0.036 a 0.08. Estos valores indican una baja incertidumbre promedio en la predicción y sugieren que el modelo ajustado tiene una capacidad predictiva aceptable. El *RMSE* obtenido en este ajuste lineal es menor que el obtenido en la técnica de análisis de tendencias.

También se observa una desviación estándar relativamente mayor en el error asociado a la precisión de los coeficientes, lo cual es previsible debido a la diferencia en la cantidad de datos utilizados. A pesar de esta desviación estándar relativamente mayor, se considera que la incertidumbre asociada es suficientemente baja para afirmar que existe una alta precisión en los coeficientes de regresión estimados.

En conclusión, los modelos de ajuste lineal obtenidos en esta técnica, para cada banda, son aceptables para ser usados en la definición de la tendencia global del sensor. Además de las pendientes, las ordenadas obtenidas también pueden ser consideradas en la determinación de los coeficientes de ganancia (*GAIN*) al inicio de la vida operacional del satélite, dado que la referencia utilizada es considerada un sensor de alto nivel de calibración.

Tabla 7.3: Resultados de la calibración cruzada con Sentinel 2(A&B)

Banda	Cant. datos	Pendiente	Ordenada	RMSE	Std. err	R^2
MS0	22	-3.47751E-05	5.966551816	0.088900474	3.14674E-05	0.057549963
MS1	22	-6.33132E-05	5.911345775	0.080956001	2.92782E-05	0.189504995
MS2	11	-1.5909E-05	7.682551686	0.036119042	2.66815E-05	0.038001316
MS3	23	-8.50247E-05	10.26400978	0.094151755	3.3581E-05	0.233875259

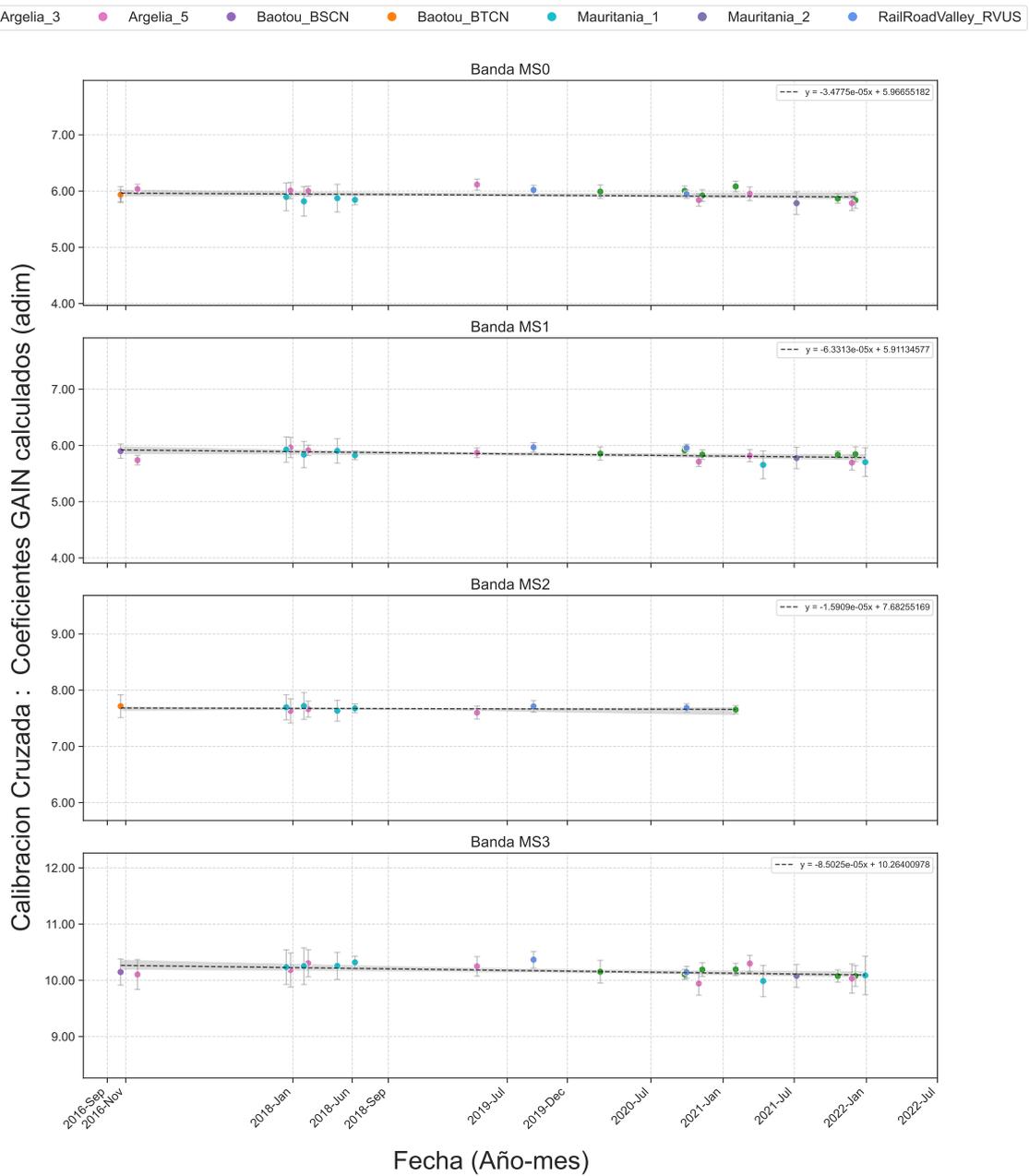


Figura 7.12: Resultados de calibración cruzada entre *PerúSAT-1* y Sentinel 2

7.2.3. Calibración empleando datos de *RadCalNet*

Los resultados de la calibración utilizando los datos de *RadCalNet* y el enfoque de *RefITOA* se muestran en la Figura 7.13. En dicha figura, se puede observar la tendencia de disminución en la capacidad de medición radiométrica de *PerúSAT-1* a lo largo del tiempo. También se observa la falta de datos para algunas bandas en ciertas fechas, debido a la eliminación de valores atípicos, tal como se explicó anteriormente.

En la Tabla 7.4, se presentan los resultados de los ajustes lineales y la evaluación de los modelos, los cuales sirven como indicadores de la calidad y precisión de la calibración realizada. Los valores de R^2 obtenidos son bajos, oscilando entre 0.02 y 0.21. Esto indica que los valores ajustados entre la *RefITOA* y el tiempo no logran explicar completamente la variabilidad, lo cual sugiere la existencia de otras variables que influyen en los resultados.

En cuanto al *RMSE* y la desviación típica del error, se observa que son relativamente bajos, lo cual indica que el modelo tiene una buena capacidad de predicción y que los coeficientes de regresión estimados son precisos. Esto habilita el uso del modelo en el análisis final, en combinación con las demás técnicas. En este caso, tanto la pendiente como la ordenada pueden ser empleadas, ya que los datos provienen de una fuente considerada como confiable.

Tabla 7.4: Resultados de calibración empleando datos de *RadCalNet*

Banda	Cant. datos	Pendiente	Ordenada	RMSE	Std. err	R^2
MS0	44	-0.00010913	6.045870442	0.137741501	3.22178E-05	0.214565736
MS1	42	-3.38714E-05	5.854232553	0.123821199	3.73777E-05	0.020116661
MS2	50	-0.000115248	7.895910313	0.211435016	5.34178E-05	0.088400583
MS3	54	-0.000146322	10.3558885	0.300150965	6.74872E-05	0.082906054
PAN	40	-0.000152435	10.35839837	0.324793869	8.40049E-05	0.079741471

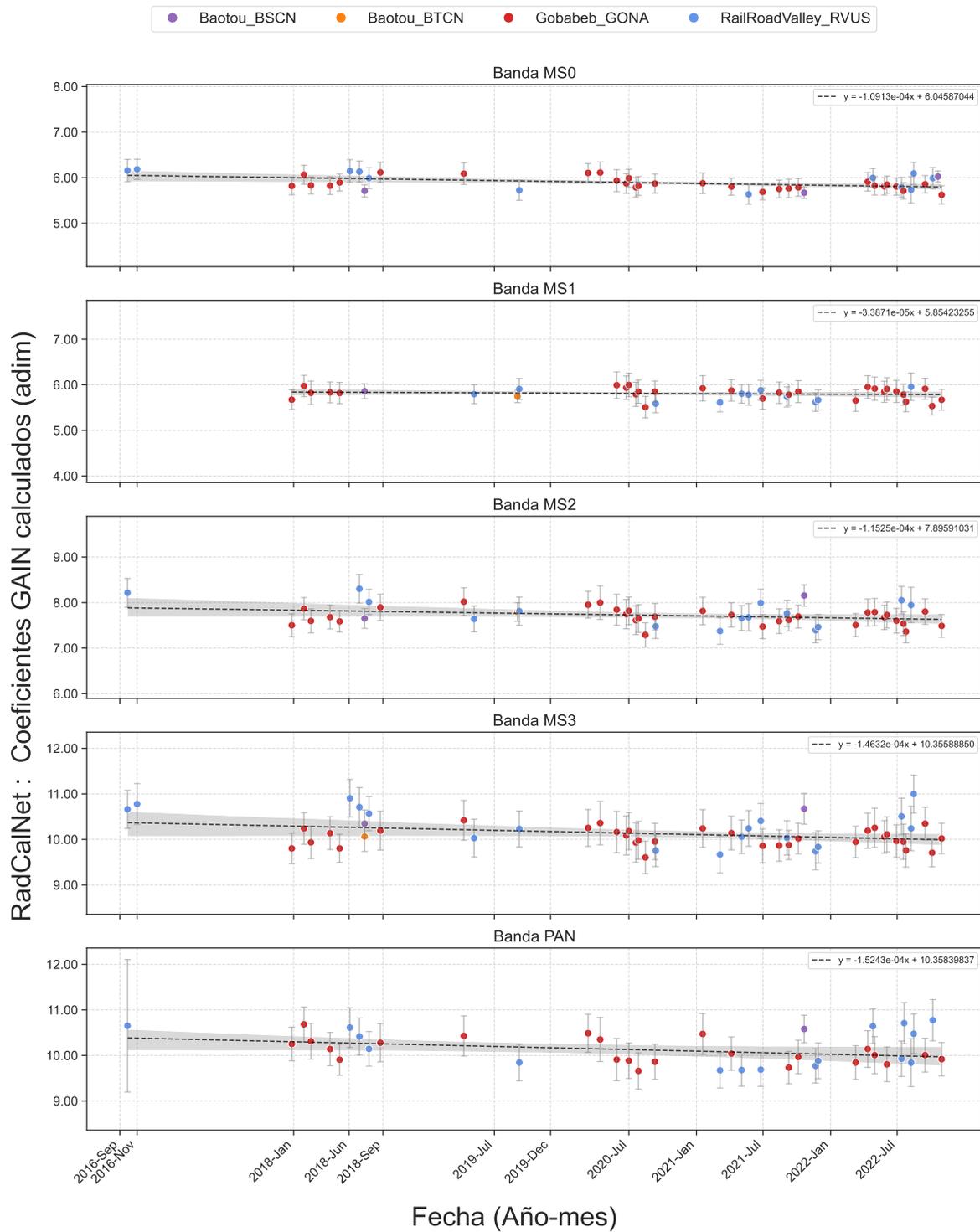


Figura 7.13: Resultados de calibración absoluta usando datos de *RadCalNet*

7.2.4. Resultado final de la calibración absoluta

Como se menciona en el Capítulo 6.3.4, los resultados parciales de las técnicas de calibración absoluta se combinaron para obtener un resultado final que represente la tendencia global del sensor. Esta tendencia global corresponde a un “modelo lineal” que se derivó de las tres tendencias lineales obtenidas en cada técnica de calibración realizada. En este proceso, se consideraron tanto la cantidad de datos disponibles como el parámetro de capacidad predictiva de los modelos, el *RMSE*, utilizando la Ecuación 6.12.

En cada una de las Tablas 7.2, 7.3 y 7.4 se detallan las cantidades de datos utilizados en las técnicas así como sus respectivos valores de *RMSE*. Se observa una gran disparidad en la cantidad de datos utilizados para el análisis de tendencias en comparación con las otras dos técnicas. Esta diferencia generaba un sesgo que necesitaba ser compensado. Además, debido a la naturaleza de la referencia utilizada en cada análisis parcial, se utilizaron los resultados de algunas técnicas para determinar la pendiente y los de otras para la ordenada. Esta última representa los valores iniciales de los coeficientes *GAIN* del sensor al inicio de su vida operacional.

Cada técnica produjo sus propios resultados de *RMSE* y desviación de error, que se presentan gráficamente en la Figura 7.14. El *RMSE* es un parámetro que está asociado a la capacidad de predicción del modelo lineal, mientras que la desviación de error indica la dispersión de los coeficientes de regresión lineal alrededor de los datos utilizados en cada técnica. En la figura se observa que el *RMSE* varía entre bandas en cada técnica aplicada. Esto refuerza la importancia de utilizar múltiples enfoques para obtener un resultado global, ya que permite mejorar los cálculos de incertidumbre al considerar la contribución de todos los posibles errores.

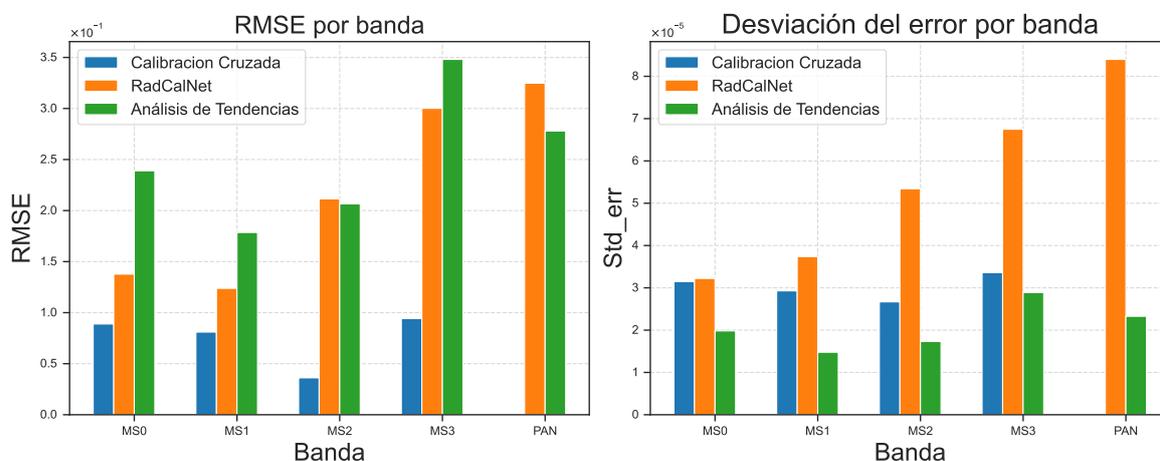


Figura 7.14: RMSE y desviación del error en los ajustes lineales de las técnicas

La técnica de calibración cruzada muestra los valores más bajos de *RMSE*, lo que indica que sus líneas de regresión se ajustan mejor a los datos utilizados en su cálculo, brindando mayor confianza en sus resultados. Por otro lado, la técnica de análisis de tendencias presenta un desempeño inferior en términos de *RMSE*, pero esto no la descarta, sino que se debe a la mayor cantidad de datos utilizados en su cálculo y la consiguiente dispersión.

Es importante destacar que la técnica de *RadCalNet* cuenta con un conjunto de datos relativamente pequeño en comparación con la técnica de análisis de tendencias, pero aún así muestra un valor de *RMSE* casi similar. Esto puede explicarse considerando los siguientes

aspectos: (1) Los datos de *RadCalNet* están establecidos con proyección al nadir, mientras que en esta investigación se utilizaron imágenes con una incidencia de hasta 5° , (2) Mientras que en la calibración cruzada bajo el enfoque de *ReflTOA* y simultaneidad las condiciones atmosféricas no influyen, en *RadCalNet* se emplea una simulación de la *ReflTOA*, lo cual aumenta su incertidumbre, y (3) A diferencia del análisis de tendencia y, en su mayoría, de la calibración cruzada, todas las imágenes utilizadas en la técnica de *RadCalNet* fueron de tipo “Nominal” y no “de calibración” (ver Tabla 3.6). A pesar de estas consideraciones, los resultados obtenidos para *RadCalNet* en cuanto a *RMSE* son aceptables para su uso en el proceso final.

En cuanto al análisis de la desviación típica del error, se observa que la técnica de *RadCalNet* muestra valores mayores en comparación con las otras dos técnicas, seguida de la calibración cruzada y, finalmente, el análisis de tendencias. Estos resultados indican que la técnica de *RadCalNet* presenta una mayor dispersión y variabilidad en los datos, lo que se traduce en una menor precisión en la estimación de los coeficientes de su regresión lineal. Por otro lado, la técnica de análisis de tendencias muestra una menor dispersión en los resultados, lo cual indica una mayor precisión en sus coeficientes de regresión lineal. Aunque la técnica de calibración cruzada se encuentra en un punto intermedio en términos de desviación de error, su desempeño sigue siendo inferior al del análisis de tendencias.

En general los valores de desviación típica del error son bajos para todas las técnicas, con un promedio general de alrededor de $3,33 \times 10^{-5}$. Esto demuestra que existe una precisión aceptable en la estimación de los coeficientes de regresión lineal en todas las técnicas. Por lo tanto, a pesar de las diferencias observadas, ninguno de los resultados se descarta. Cada técnica aportó información valiosa y útil para la calibración absoluta de acuerdo con la metodología utilizada en esta investigación. Sin embargo, es importante tener en cuenta el mayor nivel de incertidumbre asociado a la técnica de *RadCalNet* en términos de precisión de sus coeficientes de regresión lineal y la necesidad de tomar precauciones adicionales al utilizarla en el futuro.

La Ecuación 6.12 permitió calcular los factores de ponderación para la pendiente y la ordenada que se detallan en la Tabla 7.5. En esta tabla, se puede observar que se aplicó una compensación para contrarrestar el sesgo generado por la mayor cantidad de datos en la técnica de análisis de tendencias. Aunque esta sigue teniendo la mayor influencia en el cálculo de la pendiente, gracias a las ponderaciones aplicadas se reduce su impacto. Además, las ponderaciones utilizadas para el cálculo de la ordenada son coherentes con la cantidad de datos y los valores de *RMSE* de las técnicas empleadas en su determinación.

La ponderación permitió obtener un resultado más equilibrado y preciso en la estimación de la pendiente y la ordenada de la tendencia global. Los valores ponderados fueron utilizados para determinar la contribución relativa de cada técnica en el cálculo final de los coeficientes de ganancia absoluta *GAIN* correspondientes a los períodos de calibración establecidos.

Tabla 7.5: Resultados de la ponderación de pesos para los cálculos de la tendencia general

Banda	Método	Peso ponderado		Contribución relativa	
		para la pendiente	para la ordenada	para la pendiente	para la ordenada
MS0	CC	0.100833829	0.436522888	-3.50651E-06	2.604536432
	RCN	0.130159395	0.563477112	-1.42043E-05	3.406709615
	MTAR	0.769006776	No aplica	-8.23955E-05	No aplica
MS1	CC	0.086317578	0.44480229	-5.46505E-06	2.629380135
	RCN	0.107740726	0.55519771	-3.64933E-06	3.25025651
	MTAR	0.805941695	No aplica	-7.15047E-05	No aplica
MS2	CC	0.11338057	0.562907323	-1.80378E-06	4.3245646
	RCN	0.088039034	0.437092677	-1.01463E-05	3.451244579
	MTAR	0.798580397	No aplica	-7.17271E-05	No aplica
MS3	CC	0.143724576	0.575881215	-1.22201E-05	5.910850418
	RCN	0.105848725	0.424118785	-1.5488E-05	4.392126854
	MTAR	0.750426699	No aplica	-8.08478E-05	No aplica
PAN	RCN	0.071571933	1	-1.091E-05	10.35839837
	MTAR	0.928428067	No aplica	-7.47605E-05	No aplica

Nota: “No aplica” se refiere a que el método no contribuye a esa parte

Después de sumar las contribuciones relativas de cada método, se obtuvieron valores de pendiente y ordenada que representan la tendencia global del sensor en términos de mediciones de radiometría durante el período de estudio, obteniéndose los resultados finales de *AbsCal* que se muestran en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6: Modelo lineal final para la tendencia global del sensor

Banda	Pendiente	Ordenada	RMSE*	RMSE (%)**	Std. err
MS0	-1.00106E-04	6.011246046	0.246771841	4.142	0.010842532
MS1	-8.06191E-05	5.879636645	0.175454626	3.056	0.007716486
MS2	-8.36771E-05	7.77580918	0.247395278	3.176	0.011008945
MS3	-1.08556E-04	10.30297727	0.339684051	3.333	0.014881828
PAN	-8.56706E-05	10.35839837	0.31017972	2.998	0.014099078

* Error cuadrático medio.

** Error cuadrático medio en valores porcentuales.

La Figura 7.15 muestra de forma gráfica la línea de tendencia global del sensor, sobre los valores obtenidos en cada técnica utilizada. Se puede observar que esta línea sigue una proyección coherente con los datos, lo que indica que existe concordancia entre las diferentes técnicas empleadas. Además, la figura resalta la contribución relativa de cada técnica al resultado final, evitando que se sobrevalore únicamente aquella con mayor cantidad de datos, en este caso, el análisis de tendencias. Cabe destacar que esta representación gráfica tiene un propósito meramente referencial y no representa un ajuste directo de los datos. Su objetivo principal es ilustrar de manera visual la influencia de cada técnica en el resultado final obtenido.

Finalmente, se realizaron los cálculos de los coeficientes *GAIN* para los períodos de calibración establecidos, lo cual se basó en la pendiente y la ordenada de la tendencia global. A cada valor de *GAIN* obtenido se le calculó su incertidumbre de predicción propia, usando el “RMSE (%)” de la Tabla 7.6). Luego, al valor de incertidumbre propia de cada *GAIN* calculado, se le agregó el porcentaje de incertidumbre del instrumento para cada banda (Tabla 7.7) obteniéndose así su incertidumbre final. El valor de incertidumbre final representa el porcentaje de variación que pueden tener los coeficientes *GAIN* calculados en cada predicción. Para esta combinación de incertidumbres se utilizó la Ecuación 6.10. Los resultados finales de los coeficientes *GAIN* para *PerúSAT-1* correspondientes a los períodos de calibración establecidos se presentan en la Tabla 7.8.

Tabla 7.7: *AbsCal* pre-lanzamiento de PS1

Banda	<i>GAIN</i>	Incertidumbre (%)
MS0	5.975202615	5
MS1	5.741597026	4
MS2	7.85915805	3
MS3	10.27482194	4
PAN	10.40868299	4

Nota: valores calculados en Tierra

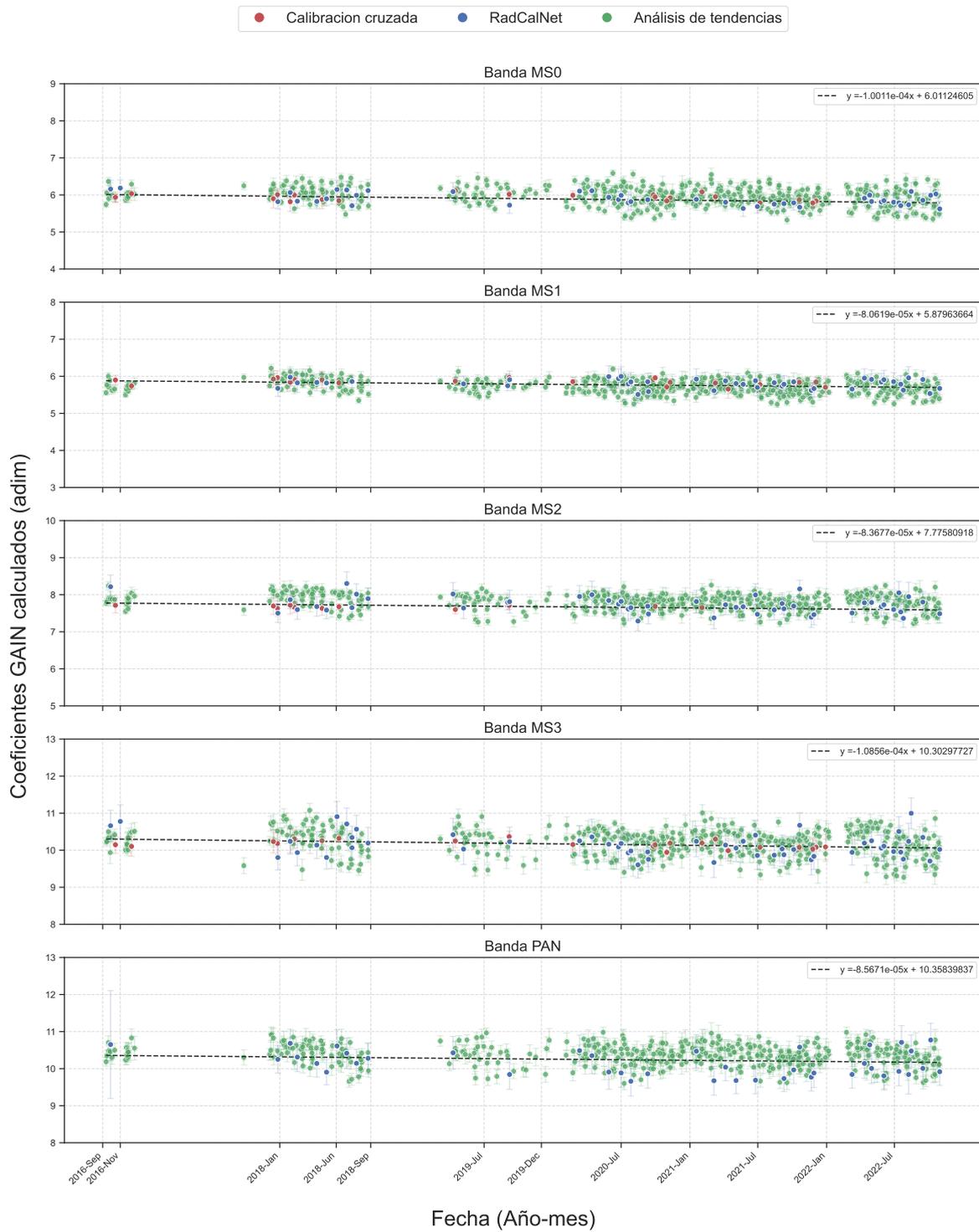


Figura 7.15: Resultados de calibración absoluta final

Tabla 7.8: Coeficientes de calibración absoluta *GAIN* calculados para el período de estudio

Fecha	MS0	MS1	MS2	MS3	PAN
2016-09-15	6.0112460463 ± 6.469 %	5.8796366446 ± 4.990 %	7.7758091795 ± 4.373 %	10.3029772716 ± 5.184 %	10.3583983694 ± 4.997 %
2016-11-01	6.0065410486 ± 6.471 %	5.8758475478 ± 4.992 %	7.771876354 ± 4.374 %	10.297875143 ± 5.185 %	10.3543718527 ± 4.997 %
2018-01-01	5.9638957497 ± 6.490 %	5.8415038192 ± 5.002 %	7.7362298923 ± 4.385 %	10.2516303176 ± 5.194 %	10.3178761907 ± 5.004 %
2018-06-01	5.9487796931 ± 6.497 %	5.8293303379 ± 5.006 %	7.72335946441 ± 4.389 %	10.2352383725 ± 5.198 %	10.304939935 ± 5.006 %
2018-09-01	5.9395699102 ± 6.500 %	5.8219133825 ± 5.008 %	7.7158963472 ± 4.391 %	10.2252512271 ± 5.199 %	10.2970582427 ± 5.007 %
2019-07-01	5.9092376906 ± 6.515 %	5.7974858009 ± 5.016 %	7.6905421738 ± 4.399 %	10.1923357809 ± 5.206 %	10.2711000606 ± 5.012 %
2019-12-01	5.8939214213 ± 6.522 %	5.7851510814 ± 5.020 %	7.6777395713 ± 4.403 %	10.1757497239 ± 5.209 %	10.2579924637 ± 5.014 %
2020-07-01	5.8725987719 ± 6.531 %	5.7679792171 ± 5.025 %	7.6599163405 ± 4.408 %	10.1526273113 ± 5.215 %	10.2397446327 ± 5.017 %
2021-01-01	5.8541792062 ± 6.539 %	5.7531453062 ± 5.029 %	7.6445197467 ± 4.413 %	10.1326530205 ± 5.219 %	10.2239812481 ± 5.020 %
2021-07-01	5.8360599595 ± 6.548 %	5.7385532525 ± 5.035 %	7.6293741843 ± 4.418 %	10.1130043976 ± 5.223 %	10.2084748753 ± 5.023 %
2022-01-01	5.8176403938 ± 6.557 %	5.7237193415 ± 5.039 %	7.6139775905 ± 4.422 %	10.0930301068 ± 5.228 %	10.1927114908 ± 5.026 %
2022-07-01	5.7995211471 ± 6.565 %	5.7091272878 ± 5.044 %	7.5988320282 ± 4.427 %	10.07333814838 ± 5.232 %	10.177205118 ± 5.029 %

Observación 1: Los valores se presentan con el formato coeficiente ± incertidumbre (%) para cada banda.

Observación 2: Valores de *GAIN* establecidos con 10 decimales por convención de estándares para *PerúSAT-1*

7.3. Lecciones aprendidas durante la investigación

En esta parte se describen algunas observaciones y otros aspectos que se consideran importantes para tener en cuenta en futuras investigaciones o procesos de calibración de *PerúSAT-1*. En el caso de la calibración relativa (*RelCal*) para el cálculo del *DSNU*, se identificó la necesidad de optimizar las operaciones de adquisición en eclipse, ya que se encontraron numerosas imágenes “en oscuridad” que no cumplieron con los criterios de elegibilidad. De un total inicial de 1,726 se usaron solamente 107 (Tabla 5.1 y Figura 5.7).

En el caso del cálculo de *PRNU* con imágenes “de calibración” se detectó la presencia de variables no controladas, como la nubosidad, por lo que se requieren operaciones continuas de adquisición sobre los *PICS*. Sin embargo, se observó también que un alto porcentaje de imágenes tuvo que ser descartado debido a ángulos elevados de adquisición. Por lo tanto, es necesario mejorar las condiciones operacionales para adquirir imágenes solo “al Nadir” o “Cerca al nadir”, las que además son también útiles para *AbsCal*.

Continuando con el proceso de cálculo del *PRNU*, se seleccionaron inicialmente 266 imágenes que cumplieran con los criterios de elegibilidad (Figura 5.8). Sin embargo, tal como se explica en los procedimientos, se requirió un proceso de descarte de datos fuera de la tendencia general (Figura 6.4). Si bien este descarte puede deberse a condiciones ambientales particulares en las escenas (neblina, aerosoles, etc.), se observó que algunos sitios resultaron ser más “estables” (Tabla 7.9). Esta consideración se basa en el porcentaje final de imágenes usadas y sus respectivas cantidad iniciales.

Es importante resaltar que debido al tamaño del *GSD* en las imágenes de *PerúSAT-1*, las variaciones de frecuencia espacial entre columnas son más susceptibles de ser notadas en comparación con sensores de *GSD*'s más grandes. La información sobre los sitios que menos se alejaron de la tendencia general de *PRNU*, resulta relevante para recomendar la preferencia futura de usar estos sitios tanto para la planificación de adquisiciones como para el cálculo de *PRNU*.

Tabla 7.9: Uso de sitios en cálculo de *PRNU*

Sitio	Cantidad Inicial	Cantidad Usada	% de uso
Nigeria_2	25	21	84.00 %
Mauritania_1	20	14	70.00 %
Argelia_3	19	14	73.68 %
Sudan_1	16	13	81.25 %
Arabia_2	17	12	70.59 %
Arabia_1	14	11	78.57 %
Libia_1	20	10	50.00 %
Argelia_5	17	10	58.82 %
Libia_2	19	8	42.11 %
Mali_1	19	8	42.11 %
Argelia_1	12	8	66.67 %
Otros	76	10	13.16 %

Obs.: en negrita se resaltan los sitios más estables para *PRNU*

Otra importante lección aprendida es que el factor de ajuste espectral de bandas (*SBAF*) es específico para cada sitio y sensor, como se muestra en la Tabla 7.10. En esta investigación, los valores de ajuste variaron cuando se usó S2A o S2B sobre un mismo sitio, e incluso entre sitios con superficies muy similares para un mismo satélite. Esta variación se debió al perfil de reflectividad calculado en cada caso. Es crucial tener en cuenta esta variabilidad en futuras calibraciones cruzadas, asegurándose de contar con datos hiperespectrales de las superficies donde se realizarán adquisiciones de *PerúSAT-1* que coincidan con el sensor utilizado como referencia.

Tabla 7.10: SBAF calculados durante el proceso de *CrossCal*

Sitio	Sentinel 2	SBAF_MS0	SBAF_MS1	SBAF_MS2	SBAF_MS3
Argelia_3	S2A	0.99996	0.95626	1.01720	1.01681
Argelia_3	S2B	0.99927	0.95092	1.01760	1.01855
Argelia_5	S2A	0.99897	0.93910	1.01549	1.02430
Argelia_5	S2B	0.99810	0.93281	1.01587	1.02577
BSCN	S2A	0.99881	0.98658	1.02308	1.02088
BSCN	S2B	0.99847	0.98499	1.02420	1.02163
BTCN	S2A	1.00038	1.00304	1.02307	1.00209
BTCN	S2B	1.00027	1.00300	1.02378	1.00291
RVUS	S2A	1.00030	0.99871	1.01838	1.01336
RVUS	S2B	0.99998	0.99784	1.01927	1.01413
Mauritania_1	S2A	0.99912	0.95141	1.01463	1.02195
Mauritania_1	S2B	0.99900	0.94569	1.01492	1.02368
Mauritania_2	S2A	0.99858	0.94534	1.01357	1.02801
Mauritania_2	S2B	0.99851	0.93937	1.01376	1.02942

Obs.: Para ver los pares de bandas análogas de las cabeceras ver Tabla 5.4

Durante la evaluación de Dickey Fuller en los cálculos de *ReftTOA* para el análisis de tendencias, se encontró que la *ReftTOA* en ciertos *PICS* mostró un comportamiento estacional difícil de caracterizar debido a la falta de datos. Solo se logró corregir aproximadamente un 2% de su efecto. La Figura 7.16 muestra dos casos: uno con una clara disminución de valores a mitad de año (fechas julianas en los ejes), mientras que en el otro caso no se observa claramente. Estas características de algunos sitios en relación con la radiometría de *PerúSAT-1* requieren una investigación más exhaustiva y una mayor cantidad de datos para obtener mejores resultados en el análisis de tendencias.

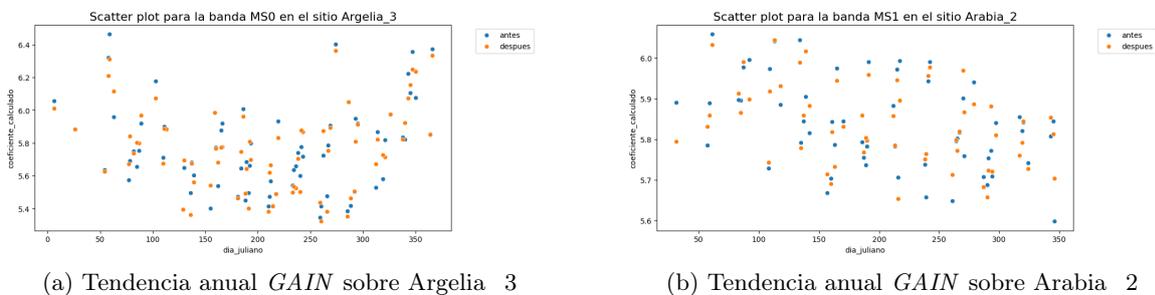


Figura 7.16: Corrección de efecto estacional durante el análisis de tendencias

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones generales

Esta investigación se centró en dos objetivos principales: calcular los coeficientes de calibración radiométrica actuales para las bandas espectrales del sensor *NAOMI* a bordo de *PerúSAT-1* y analizar la evolución de su capacidad de medición radiométrica. Para lograr esto, se desarrolló una metodología adaptable que pudiera abordar ambos problemas de manera efectiva, considerando la disponibilidad de recursos y asegurando resultados con una incertidumbre aceptable. Esta metodología permite realizar tanto la calibración relativa como la calibración absoluta del sensor, y también calcular retrospectivamente valores de coeficientes *GAIN* para actualizar los *GIPP* del sistema *PerúSAT-1*.

La metodología empleada permitió cumplir los objetivos de investigación de manera coherente con las características técnicas del sensor y las operacionales del satélite. Se establecieron criterios de selección de muestras adecuadas y se lograron niveles de incertidumbre entre 4.4 % y 6.6 % para la calibración absoluta. Estos valores son adecuados para la misión satelital y garantizan la consistencia en el uso de las imágenes de *PerúSAT-1*, tanto de forma independiente como en combinación con imágenes de otros sensores.

El cálculo de los coeficientes de calibración radiométrica de *PerúSAT-1* se dividió en dos partes. En la primera parte, se calcularon los coeficientes de señal en oscuridad (*DSNU*) y de respuesta relativa de píxel (*PRNU*). Estos coeficientes permiten corregir las variaciones sistemáticas en la respuesta del sensor a nivel de detectores, garantizando la calidad gráfica y la uniformidad radiométrica de toda la imagen. La cobertura temporal establecida permitió analizar la evolución de los coeficientes a lo largo del tiempo y obtener valores actualizados para períodos de calibración que se fijaron considerando el comportamiento radiométrico del sensor y de acuerdo con la disponibilidad de datos. Además, se comprobó que el enfoque de calibración relativa a nivel de retinas es el adecuado para el sensor *NAOMI*.

Los resultados del cálculo de señal en oscuridad (*DSNU*) muestran un incremento gradual de la misma a una tasa del 4 % semestral, lo cual se puede corregir manteniendo una frecuencia constante de calibración. No se observaron detectores anómalos que indiquen una señal en oscuridad inusual. Sin embargo, se observaron comportamientos inusuales y una mayor dispersión en la Banda *MS0* de la retina A, lo cual requiere una investigación más profunda. Por otro lado, la Banda *PAN* mostró una señal de oscuridad muy estable. Tal como se esperaba, las señales en oscuridad en la fase operacional difieren de las calculadas en el laboratorio en la etapa de pre-lanzamiento. Además, se encontró que los valores *DSNU* de los cálculos previos

realizados por el *CNOIS* se acercan a los resultados obtenidos en la investigación, siendo la selección de las muestras la fuente de algunas variaciones.

En cuanto a la respuesta de píxel, se observó una alta estabilidad en la respuesta relativa de los detectores en todas las bandas y arreglos, lo que indica un funcionamiento adecuado. No se encontraron alteraciones en la radiometría de ningún grupo de columnas dentro de los arreglos. Al igual que en el cálculo de *DSNU*, los coeficientes de *PRNU* en la etapa operacional difieren de los calculados en el laboratorio. Sin embargo, se observaron discrepancias de aproximadamente un 1 % a 2 % a partir del segundo semestre de 2018 entre los coeficientes de *PRNU* calculados en esta investigación y los anteriormente calculados por el *CNOIS*. Dado que los resultados de esta tesis permitieron obtener coeficientes que garantizan la estabilidad de la respuesta relativa de los detectores, es conveniente corregir los valores actuales de *PRNU* en los GIPP alojados en el sistema.

Con respecto a la calibración absoluta (*AbsCal*), en cuanto a los cálculos de los coeficientes de ganancia (*GAIN*), la metodología empleada permitió la utilización de tres técnicas que son comúnmente utilizadas en calibración radiométrica por la comunidad de teledetección, las cuales fueron adaptadas a las características propias del sensor, y a los objetivos y criterios de investigación, estableciéndose enfoques específicos para solucionar el problema. Además, estas tres técnicas fueron combinadas para obtener resultados más consistentes. En todas ellas, se calcularon sus propios valores de incertidumbre, los cuales se usaron en la definición de la incertidumbre final de los resultados.

Los resultados menos favorables en *AbsCal* se obtuvieron de la técnica de *RadCalNet*. Ello se debe a la influencia de un mayor número de variables en el cálculo de la *RefITOA*, cuyas incertidumbres afectan los resultados. Por lo tanto, en el futuro, se recomienda utilizar estos datos procurando reducir lo mejor posible las fuentes de incertidumbre que se puedan controlar; por ejemplo, programando adquisiciones únicamente en el nadir y utilizando el modo de programación de calibración sin ecualización a bordo. De esta manera, es posible mejorar los resultados obtenidos.

Durante la ejecución de los procedimientos, se aprendieron varias lecciones. En primer lugar, la cantidad de imágenes iniciales para el estudio se redujo considerablemente después de aplicar los criterios de elegibilidad. Sin embargo, estos mismos criterios podrían aplicarse en el proceso de programación de adquisiciones futuras con fines de calibración, lo que optimizaría el uso del sensor.

La segunda lección aprendida es que se identificaron sitios específicos donde *PerúSAT-1* obtuvo mejores resultados para el cálculo de *PRNU* en términos de uniformidad para su nivel de muestreo espacial. Estos sitios podrían considerarse como criterios prioritarios en el proceso de programación de adquisiciones.

La tercera lección aprendida es que cada calibración cruzada es particular y no se debe generalizar el uso de un único perfil de reflectividad para el ajuste espectral de las bandas. Por lo tanto, sería conveniente contar con una base de datos de perfiles para los sitios donde se aplicará esta técnica en el futuro, y programar adquisiciones para *CrossCal* sólo donde se cuente con dicha información.

Durante el proceso de investigación, se encontraron limitaciones de carácter administrativo y técnico. En primer lugar, no se contó con antecedentes de calibración del satélite y no se tuvo acceso a datos técnicos debido a consideraciones de confidencialidad. Esta falta de información previa limitó el análisis comparativo y la obtención de datos de referencia.

La investigación desarrollada en esta tesis tuvo un enfoque aplicado y se orientó a resolver

un problema específico de forma práctica, consistente y con incertidumbres aceptables. Se basó en la estructura actual de los *GIPP* que deben actualizarse y las necesidades específicas de resultados para dicha actualización. Para lograr este objetivo, se utilizaron datos disponibles que son consistentes y apropiados a nivel global para los objetivos planteados.

Este enfoque de investigación limitó la profundidad en temas relacionados con la calibración radiométrica a un nivel más detallado. Por ejemplo, los *GIPP* determinan un único valor de *GAIN* por banda espectral. Sin embargo, es posible que existan diferencias radiométricas a nivel de retinas independientemente de la respuesta de píxel. Además, a nivel de detectores, es necesario considerar su ruido intrínseco en relación con el nivel de radiancia que reciben. En otras palabras, la relación señal-ruido también es una fuente de incertidumbre en los valores de *DN*. Por lo tanto, esta variable podría agregarse a los procesos de investigación con el objetivo de desarrollar técnicas de calibración radiométrica más precisas.

8.2. Recomendaciones

Como recomendaciones para futuras investigaciones, se sugiere llevar a cabo un estudio más detallado sobre el comportamiento inusual observado en la Banda MS0 de la retina A. Es importante comprender las causas de estas variaciones y evaluar posibles soluciones para mejorar la calidad de las mediciones en esa banda específica.

Otra recomendación para futuras investigaciones es analizar las diferencias radiométricas absolutas a nivel de retinas para determinar si el enfoque de un único valor de *GAIN* por banda es adecuado.

En cuanto a la influencia del ruido intrínseco del detector en la calibración absoluta, se recomienda analizar su relación señal-ruido, temperatura y otras características que permitan examinar más detalladamente su comportamiento radiométrico.

En términos de recomendaciones técnicas, se sugiere considerar los valores calculados en esta investigación o reevaluar los valores actuales de *PRNU* a partir de mediados de 2018.

Además, se recomienda continuar realizando la calibración relativa por retinas, ya que cada arreglo de detectores presenta un comportamiento diferente en cada banda. Este enfoque permite tener en cuenta las características específicas de cada conjunto de detectores.

Por último, en cuanto a recomendaciones operativas, considerando las lecciones aprendidas y los resultados de las técnicas de calibración desarrolladas, se sugiere elaborar un plan de adquisiciones de imágenes con fines de calibración que optimice y priorice los sitios, ángulos, frecuencias temporales y otras consideraciones, a fin de contar con bases de datos adecuadas en el futuro.

Bibliografía

- [1] Carlos Pérez Gutiérrez and Ángel Luis Muñoz Nieto. *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Universidad de Salamanca, 2006. ISBN 9788461116133.
- [2] John Schott. *Remote Sensing: The image Chain Approach*. Oxford University Press, New York, USA, 2007.
- [3] National Research Council - USA. *Earth observations from space, The first 50 years of scientific achievements*. The National Academies Press, Washington, Washington DC, USA, 2008.
- [4] J. R. Jensen. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson Education, 2nd edition, 2009.
- [5] B. J. Campbell and R. H. Wynne. *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Publications, 5th edition, 2011.
- [6] T. Rashed and C. Jürgens. *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [7] Daniel Nisperuza Toledo. *Propiedades Ópticas de los Aerosoles Atmosféricos en la Región Andina Colombiana Mediante Análisis de Mediciones Remotas: LIDAR, Fotométricas y Satelitales*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [8] NASA. The electromagnetic spectrum, November 14 2014. URL <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>.
- [9] NASA. Landsat science satellites landsat science, August 2020. URL <https://landsat.gsfc.nasa.gov>.
- [10] Francis Canisius, Shusen Wang, Holly Croft, Sylvain Leblanc, Hazen Russell, Jing Chen, and Rong Wang. A uav-based sensor system for measuring land surface albedo: Tested over a boreal peatland ecosystem. 3:27, 03 2019. doi: 10.3390/drones3010027.
- [11] ESA. Copernicus data quality control - technical note - harmonisation of terms relevant to angles. reference: Cds-tpz-03-000077-tr, January 8 2019. Reference: CDS-TPZ-03-000077-TR.
- [12] Universidad de Granada. Isotropía / anisotropía. Obtenido de MINERALOGIA OPTICA, 2015. Retrieved from <http://edafologia.ugr.es/optmine/intro/isoanis.htm>.

- [13] UFPR. Aulas terça-feira e sexta-feira (pi-07/ct-12). Obtenido de Programa Sensoriamento Remoto, 2012. URL https://docs.ufpr.br/~danielsantos/Aula2_EspectroEletromagnetico.pdf.
- [14] L. Markelin. *Radiometric calibration, validation and correction of multispectral photogrammetric imagery*. PhD thesis, Espoo (Finlandia), 2013.
- [15] Surface Optics Corporation. Bidirectional reflectance (brdf), 2019. URL https://surfaceoptics.com/measurements/bidirectional-reflectance-brdf-or-scatter-measurements-from-the-uv-to-lwir/?gclid=Cj0KcQjwuZDtBRDvARIsAPXfx3BoYAJ5u3dJrzWdBpCyMNVV_8iEtYRmRs7M9ebaFpz30matW6gr_YYaAna5EALw_wcB.
- [16] S. R. Schill, J. R. Jensen, G. T. Raber, and D. E. Porter. Temporal modeling of bidirectional reflection distribution function (brdf) in coastal vegetation. *GIScience and Remote Sensing*, 41(2):116–135, 2004.
- [17] M. Nischal, A. David, and C. Taeyoung. Applications of spectral band adjustment factors (sbaF) for cross-calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 5(3):1267–1281, March 2013.
- [18] N. Baghdadi and M. Zribi. *Optical Remote Sensing of Land Surfaces*. Elsevier Ltd., London, 2016.
- [19] E. Gómez González. *Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría*, volume 1.0. ESI - Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2006.
- [20] K. P. Scott. *Radiometric Calibration of On-Orbit Satellite Sensors Using an Improved Cross-Calibration Method*. PhD thesis, University of Arizona, Committee on Optical Sciences, 1998.
- [21] H. Vuppula. *Normalization of Pseudo-invariant Calibration Sites for Increasing the Temporal Resolution and Long-Term Trending*. PhD thesis, South Dakota State University, 2017.
- [22] T. Lillesand, R. W. Kiefer, and J. Chipman. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, 7th edition, 2015.
- [23] Roger M. McCoy. *Field Methods in Remote Sensing*. Guilford Press, 2005.
- [24] Shunlin Liang. Missions and sensors. In *Comprehensive Remote Sensing*, volume I. Elsevier, College Park, MD, USA, 2017.
- [25] Carolina Barrientos, Cristian Mattar, Theodoros Nakos, and Waldo Perez. Radiometric cross-calibration of the Chilean satellite Fasat-C using Rapideye and EO-1 Hyperion data and a simultaneous nadir overpass approach. *Remote Sensing*, 8(612), 2016.
- [26] R. Kacker and H. Yoon. Guidelines for radiometric calibration of electro-optical instruments for remote sensing. Technical report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 2015.

- [27] Julia A. Barsi, John R. Schott, Simon J. Hook, Nina G. Raqueno, Brian L. Markham, and Robert G. Radocinski. Landsat-8 thermal infrared sensor (tirs) vicarious radiometric calibration. *Remote Sensing*, 6(11):11607–11626, 2014. ISSN 2072-4292. doi: 10.3390/rs61111607.
- [28] Gyanesh Chander. Preprocessing: Need for sensor calibration. In Giri and C. P., editors, *Remote Sensing of Land Use and Land Cover Principles and Applications*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1 edition, 2012.
- [29] V.A. Zenin, V.V. Eremeev, and A.E. Kuznetsov. Algorithms for relative radiometric correction in earth observing systems resource-p and canopus-v. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B6:189–191, 06 2016.
- [30] M. Wang, C. Chen, J. Pan, Y. Zhu, and X. Chang. A relative radiometric calibration method based on the histogram of side-slit data for high-resolution optical satellite imagery. *Remote sensing*, 10(381):1–21, 2018.
- [31] Huw Jones and Robert Vaughan. *Remote sensing of vegetation. Principles, techniques and applications*. Oxford University Press, Oxford, UK, 2010.
- [32] Wonseok Kang, Soohwan Yu, Doochun Seo, Jaeheon Jeong, and Joonki Paik. Push-broom-type very high-resolution satellite sensor data correction using combined wavelet-fourier and multiscale non-local means filtering. *Sensors*, 15(9):22826–22853, 2015. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s150922826.
- [33] Chander, Mishra, Helder, Aaron, Angal, Choi, Xiong, and Doelling. Applications of spectral band adjustment factors (sba) for cross-calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3):1267–1281, March 2013. ISSN 0196-2892. doi: 10.1109/TGRS.2012.2228007.
- [34] J.-C. Padró, X. Pons, D. Aragonés, R. Díaz-Delgado, D. García, J. Bustamante, and M. Lange. Radiometric correction of simultaneously acquired landsat-7/landsat-8 and sentinel-2a imagery using pseudoinvariant areas (pia): Contributing to the landsat time series legacy. *Remote Sensing*, 9(1319), 2017.
- [35] S. Lacherade, B. Fougne, P. Henry, and P. Gamet. Cross calibration over desert sites: Description, methodology, and operational implementation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3):1098–1113, March 2013. ISSN 0196-2892. doi: 10.1109/TGRS.2012.2227061.
- [36] S. Lacherade, S. Fourest, and L. Lebègue. Pleiades absolute calibration inflight: inflight calibration sites and methodology. *Commission I, WG I/4*, Noviembre 2012.
- [37] S. K. Chittimalli. *Reflectance-based Calibration and Validation of the Landsat Satellite Archive*. PhD thesis, South Dakota State University, 2016.
- [38] CEOS. Landnet sites. Recuperado el 10 de Octubre de 2019, de Cal/Val Portal. Committee on Earth Observation Satellites, 2018. URL <http://calvalportal.ceos.org/ceos-landnet-sites>.

- [39] USGS. Calibration/validation test sites, 2022. URL <https://www.usgs.gov/centers/eros/calibrationvalidation-test-sites>.
- [40] Charles L. Wyatt. *Radiometric Calibration: Theory and Methods*. Academic Press, A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, New York, San Francisco, London, USA, 1978.
- [41] P. Teillet, B. Markham, and R. R. Irish. Landsat cross-calibration based on near simultaneous imaging of common ground targets. *Remote Sensing of Environment*, 102:264–270, 2006.
- [42] H. Ebrahimi. *On-orbit Inter-satellite Radiometric Calibration of Cross-track Scanning Microwave Radiometers*. PhD thesis, University of Central Florida, 2016.
- [43] M. Farhad. *Cross Calibration and Validation of Landsat 8 OLI and Sentinel 2A MSI*. PhD thesis, South Dakota State University, 2018.
- [44] Shuang Wang, Yunhai Geng, and Rongyu Jin. A novel error model of optical systems and an on-orbit calibration method for star sensors. *Sensors*, 15(12):31428–31441, 2015. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s151229863.
- [45] Nischal Mishra, Dennis Helder, Amit Angal, Jason Choi, and Jack Xiong. Absolute calibration of optical satellite sensors using libya 4 pseudo invariant calibration site. *Remote Sensing*, (6):1327–1346, February 2014.
- [46] Dennis Helder, Kurtis J. Thome, Nischal Mishra, Gyanesh Chander, Member, IEEE, Xiaoxiong Xiong, Member, IEEE, Amit Angal, , and Taeyoung Choi. Absolute radiometric calibration of landsat using a pseudo invariant calibration site. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 51(3), March 2013.
- [47] Gyanesh Chander, Xiaoxiong Xiong, Taeyoung Choi, and Amit Angal. Monitoring on-orbit calibration stability of the terra modis and landsat 7 etm+ sensors using pseudo-invariant test sites. *Remote Sensing of Environment*, 114(4):925–939, 2010.
- [48] H. Mizuochi, S. Tsuchida, K. Obata, H. Yamamoto, and S. Yamamoto. Combination of cross- and inter-band radiometric calibrations for a hyperspectral sensor using model-based spectral band adjustment. *Remote Sensing*, 12(23), 2020.
- [49] C. T. Pinto, F. J. Ponzonia, R. M. Castrob, L. Leighd, M. Kaewmaneed, D. Aarond, and D. Helder. Evaluation of the uncertainty in the spectral band adjustment factor (sba) for cross-calibration using monte carlo simulation. *Remote Sensing Letters*, 7(9): 837–846, 2016.
- [50] P. Teillet, G. Fedosejevs, K. Thome, and J. l. Barker. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain. *Remote Sensing of Environment*, 17, 2007.
- [51] Q. Guo and X. Feng. In-orbit spectral response function correction and its impact on operational calibration for the long-wave split-window infrared band of fy-2g satellite. *Remote Sensing*, 9(553), 2017.

- [52] J. Li, L. Feng, X. Pang, W. Gong, and X. Zhao. Radiometric cross calibration of gaofen-1 wfv cameras using landsat-8 oli images: A simple image-based method. *Remote Sensing*, 8(411):19, 2016.
- [53] M. Rabal Almanzor. *Gonio-espectrofotómetro para medidas de BRDF de patrones de reflectancia y objetos gonio-aparentes*. PhD thesis, Universidad de Zaragoza, 2014.
- [54] D. Wierzbicki, M. Kedzierski, A. Fryskowska, and J. Jasinski. Quality assessment of the bidirectional reflectance distribution function for nir imagery sequences from uav. *Remote Sensing*, 10(9), 2018.
- [55] J. Roujean, M. Leroy, and P. Deschamps. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 97(D18):455–468, 1992.
- [56] CEOS. Radcalnet, 10 de noviembre de 2022. URL <https://www.radcalnet.org/#!/>.
- [57] M. Bouvet, K. Thome, B. Berthelot, A. Bialek, J. Czapla-Myers, N. Fox, and E. Williams. Radcalnet: A radiometric calibration network for earth observing imagers operating in the visible to shortwave infrared spectral range. *Remote Sensing*, 11(2401):24, 2019.
- [58] J. Czapla-Myers and N. Anderson. The university of arizona's radiometric calibration test site (radcats): Lessons learned after 10 years in operation at railroad valley, nevada. In *Proc. SPIE 12232, Earth Observing Systems XXVII*, San Diego, California, USA, 2022. SPIE.
- [59] J. Czapla-Myers, C. Coburn, K. Thome, B. J. Wenny, and J. Anderson. Directional reflectance studies in support of the radiometric calibration test site (radcats) at railroad valley. In *Proc. SPIE 10764, Earth Observing Systems XXIII*, San Diego, California, 2018. SPIE.
- [60] Z. Szantoi. Copernicus sentinel-2 calibration and validation. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1):253–255, 2019.
- [61] Ferran Gascon, Olivier Thépaut, Mathieu Jung, Benjamín Francesconi, Jerome Louis, Vincent Lonjou, Bruno Lafrance, Stephane Massera, Angélique Gaudel-Vacaresse, Florie Languille, Bahjat Alhammoud, Françoise Viallefont, Bringfried Pflug, Jakub Bieniarz, Sébastien Clerc, Laëtitia Pessiot, Thierry Trémas, Enrico Cadau, Roberto de Bonis, Claudia Isola, Phillipe Martimort, and Valérie Fernandez. Copernicus sentinel-2 calibration and products validation status. *Preprints*, 2016.
- [62] A. Ariza. 1st sentinel-2 validation teen meeting, 2016. URL <https://www.unoosa.org/documents/pdf/calibration/ICCP-13-3.pdf>.
- [63] Usgs science for a changing world - landsat missions, 2022. URL <https://www.usgs.gov/landsat-missions/calibration-validation>.
- [64] USGS. Landsat 8 oli and tirs calibration notices. LANDSAT MISSIONS, December 2019. URL <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-oli-and-tirs-calibration-notice>. Retrieved December 15, 2019.

- [65] Stanley A. Morain and Amelia M. Budge. *Post-Launch Calibration of Satellite Sensors: Proceedings of the International Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, December 2003, Mississippi, USA. (ISPRS Book Series)*. CRC Press, 2004. ISBN 9781482259926.
- [66] ESA - eoPortal Directory. Satellite missions catalogue, 12 de octubre de 2016. URL <https://www.eoportal.org/satellite-missions/perusat-1#naomi-new-astrosat-optical-modular-instrument>.
- [67] G. Baena Paz. *Metodología de la Investigación*. Grupo Editorial Patria, Ciudad de México, 3a ed. edition, 2017.
- [68] R. Hernández, C. Fernández, and L. Baptista. *Metodología de la Investigación*. McGraw Hill, 5ta ed. edition, 2014.
- [69] L. Mucha-Hospinal, R. Chamorro-Mejía, M. Oseda-Lazo, and R. Alania-Contreras. Evaluación de procedimientos empleados para determinar la población y muestra en trabajos de investigación de posgrado. *Revista Científica de Ciencias Sociales y Humanidades*, pages 2307–6100, 2020.
- [70] M. Torres. Tamaño de una muestra para una investigación de mercado. [En línea]. Disponible en: http://moodlelandivar.url.edu.gt/url/oa/fi/ProbabilidadEstadistica/URL_02_BAS02%20DETERMINACION%20TAMA%7B~N%7D%20MUESTRA.pdf, 14 de diciembre de 2022.
- [71] NASA. Our galactic neighborhood, 3 de diciembre de 2022. URL <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/our-solar-system/overview/>.
- [72] ESA. Copernicus open access hub - batch scripting, 2023. URL https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubUserGuide/BatchScripting#Scripts_Examples?TWIKISID=20e4ac6d5953bf25c6b40ecfb8c08c8d.
- [73] Earthexplorer, 2023. URL <https://earthexplorer.usgs.gov>.
- [74] USGS. Glovis, 2023. URL <https://glovis.usgs.gov/app>.
- [75] P. Barry, C. Segal, and S. Carman. *EO-1/ Hyperion Science Data User's Guide, Level 1_B*. TRW Space, Defense & Information Systems, Redondo Beach, CA 90278, 2001.
- [76] K. Simon, R. McKinney, T. Beckmann, and W. A. Miller. *Hyperion Level 1G (L1GST) Product Output Files Data Format Control Book (DFCB)*. USGS, Sioux Falls, South Dakota, 2006.
- [77] C. Gonzalez Calvo. *Procesamiento a bordo de imágenes hiperespectrales de la superficie terrestre mediante hardware reconfigurable*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Informática, Madrid, 2012.
- [78] Jeffrey Czapla-Myers, Joel McCorkel, Nikolaus Anderson, Kurtis Thome, Stuart Biggar, Dennis Helder, David Aaron, Larry Leigh, and Nischal Mishra. The ground-based absolute radiometric calibration of landsat 8 oli. *Remote Sensing*, 7(1):600–626, 2015. ISSN 2072-4292. doi: 10.3390/rs70100600.

-
- [79] J. Czapla-Myers, N. Leisso, N. Anderson, and S. Biggar. On-orbit radiometric calibration of earth-observing sensors using the radiometric calibration test site (radcats). In *Proc. SPIE 8390, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII*, Baltimore, Maryland, USA, 2012. SPIE.
- [80] P. Mather and B. Tso. *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. CRC Press, Boca Raton, USA, 2nd edition, 2009.
- [81] M. Guizar-Sicairos, S. Thurman, and J. Fienup. Efficient subpixel image registration algorithms. *OPTICS LETTERS*, 33(2):156–158, 2008.
- [82] B. Datt, T. R. McVicar, V. Niel, D. L. Jupp, and J. S. Pearlman. Preprocessing eo-1 hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6):1246–1259, June 2003.