

Implementación de un modelo de vigilancia tecnológica para la selección de las cargas útiles de la misión FACSAT-2*

Sonia Ruth Rincón Urbina^a ■ Lorena Paola Cárdenas Espinosa^b ■ Mateo Castillo Sepúlveda^c ■ Karen Nicole Pirazan Villanueva^d ■ Erick Enrique Gutiérrez Bossa^e ■ Paola Andrea Zárate Luna^f

Resumen: El nanosatélite FACSAT-2 “Chiribiquete”, desarrollado conjuntamente por la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) y la empresa danesa GomSpace, tiene como objetivo proporcionar datos críticos sobre el territorio colombiano para aplicaciones de observación terrestre, en particular, en la cuantificación y evaluación de impactos ambientales. Este estudio detalla el proceso de selección tecnológica para las cargas útiles que se integrarán en el bus del FACSAT-2. El documento presenta los requisitos de la misión, las limitaciones y la evaluación del mercado, siguiendo los diez pasos propuestos por Larson, bajo un modelo de vigilancia tecnológica. Los requisitos técnicos guiaron la identificación de proveedores globales de sensores espaciales, la evaluación del historial espacial de los instrumentos y la evaluación de su éxito en misiones anteriores. Como resultado, se determinó que el bus de seis unidades albergaría la cámara MultiScape cis 100, que ofrece una resolución de

* Artículo de investigación.

- a Magíster en filosofía en manufactura espacial. Jefe Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales - CITAE de la Fuerza Aérea Colombiana, Cali, Colombia.
Correo electrónico: sonia.rincon@fac.mil.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2628-7516>
- b Magíster en Ciencias. Especialista en Investigación del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales - CITAE de la Fuerza Aérea Colombiana, Cali, Colombia.
Correo electrónico: lorena.cardenas@fac.mil.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2473-0932>
- c Geóloga. Coinvestigador del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales - CITAE de la Fuerza Aérea Colombiana, Cali, Colombia.
Correo electrónico: mateocastillo.sepulveda@gmail.com;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0896-0220>
- d Ingeniera Aeronáutica. Coinvestigador del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales - CITAE de la Fuerza Aérea Colombiana, Cali, Colombia.
Correo electrónico: karen.villanueva@epfac.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6382-0773>
- e Magíster en Ciencias. Coinvestigador del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales - CITAE de la Fuerza Aérea Colombiana, Cali, Colombia.
Correo electrónico: erick.gutierrez@fac.mil.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8403-1936>
- f Doctora en ingeniería. Especialista en Coordinación Núcleo Gestión Tecnológica del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales - CITAE de la Fuerza Aérea Colombiana, Cali, Colombia.
paola.zarate@fac.mil.co ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8774-8369>

4,7 metros por píxel y un rango espectral de 450 nm a 900 nm, y el espectrómetro de infrarrojo de onda corta Argus 2000, que cubre un rango de 1000 nm a 1700 nm. Esta combinación proporciona una capacidad significativa para estudios multitemporales en agricultura, uso del suelo e impacto ambiental. Esto posiciona a Colombia como el primer país sudamericano en lanzar y operar una misión de nanosatélite específicamente diseñada para el análisis de gases de efecto invernadero. Esta misión contribuye a las políticas ambientales actuales y a los planes de desarrollo espacial.

Palabras clave: nanosatélites; cargas útiles; MultiScape cis100; Argus 2000; FACSAT-2; resolución media; espectrómetro; gases de efecto invernadero

Recibido: 18/09/2024 **Aceptado:** 27/03/2025 **Disponible en línea:** 22/10/2025

Cómo citar: S. R. Rincón Urbina, L. P. Cárdenas Espinosa, M. Castillo Sepúlveda, K. N. Pirazan Villanueva, E. E. Gutiérrez Bossa, y P. A. Zárate Luna, «Implementación de un modelo de vigilancia tecnológica para la selección de las cargas útiles de la misión FACSAT-2», Cien.Ing.Neogranadina, vol. 35, n.º 2, pp. 13–26, oct. 2025.

Implementation of a technological surveillance model for the FACSAT-2 mission payloads selection

Abstract: The FACSAT-2 “Chiribiquete” nanosatellite, jointly developed by the Colombian Air Force (FAC) and the Danish company GomSpace, aims to provide critical data on Colombian territory for Earth observation applications, particularly in the quantification and assessment of environmental impacts. This study details the technological selection process for the payloads to be integrated into the FACSAT-2 bus. This paper presents the mission requirements, constraints, and market evaluation following the ten steps proposed by Larson under a technology surveillance model. The technical requirements guided the identification of global suppliers of space sensors, assessing the space heritage of instruments, and evaluating their success in previous missions. As a result, it was determined that the six-unit bus would house the MultiScape cis 100 camera, offering a resolution of 4.7 meters per pixel and a spectral range of 450 nm to 900 nm, and the Argus 2000 shortwave infrared spectrometer, covering a range of 1000 nm to 1700 nm. This combination provides significant capability for multitemporal studies in agriculture, land use, and environmental impact. Positioning to Colombia as the first South American country to launch and operate a nanosatellite mission specifically designed for greenhouse gas analysis. This mission contributes to current environmental policies and space development plans.

Keywords: Nanosatellite; Payloads; MultiScape cis100; Argus 2000; FACSAT-2; Medium Resolution; Spectrometer; Greenhouse Gases

Implementação de um modelo de vigilância tecnológica para a seleção das cargas úteis da missão FACSAT-2

Resumo: O nanossatélite FACSAT-2 “Chiribiquete”, desenvolvido conjuntamente pela Força Aeroespacial Colombiana (FAC) e pela empresa dinamarquesa GomSpace, tem como objetivo fornecer dados críticos sobre o território colombiano para aplicações de observação terrestre, especialmente na quantificação e avaliação de impactos ambientais. Este estudo detalha o processo de seleção tecnológica das cargas úteis que serão integradas ao ônibus do FACSAT-2. O documento apresenta os requisitos da missão, as limitações e a avaliação de mercado, seguindo os dez passos propostos por Larson, sob um modelo de vigilância tecnológica. Os requisitos técnicos orientaram

a identificação de fornecedores globais de sensores espaciais, a avaliação do histórico espacial dos instrumentos e sua eficácia em missões anteriores. Como resultado, determinou-se que o ônibus de seis unidades abrigaria a câmera MultiScape cis 100, que oferece uma resolução de 4,7 metros por pixel e um intervalo espectral de 450 nm a 900 nm, e o espectrômetro de infravermelho de onda curta Argus 2000, que cobre um intervalo de 1000 nm a 1700 nm. Essa combinação proporciona uma capacidade significativa para estudos multitemporais em agricultura, uso do solo e impacto ambiental. Isso posiciona a Colômbia como o primeiro país sul-americano a lançar e operar uma missão de nanossatélite especificamente projetada para a análise de gases de efeito estufa. A missão contribui para as políticas ambientais atuais e para os planos de desenvolvimento espacial.

Palavras-chave: nanossatélites; cargas úteis; MultiScape cis100; Argus 2000; FACSAT-2; resolução média; espectrômetro; gases de efeito estufa

Introducción

Colombia, mediante la implementación de iniciativas y proyectos de promoción de conocimiento y curiosidad científica en temas espaciales, como el Conpes 3983 (2020) [1]-[2], busca superar los impedimentos existentes para el emprendimiento y el conocimiento tecnológico, y potenciar la demanda de bienes y servicios espaciales para el cumplimiento de las condiciones habilitantes, con el fin de impulsar la Política de Desarrollo Espacial y Competitividad Nacional [1]. En el contexto de estos esfuerzos, la información derivada de la observación de la Tierra se vuelve esencial, debido a su transversalidad e impacto multidisciplinar [3]. Por ejemplo, estas tecnologías pueden facilitar el monitoreo de la superficie y de los cambios en la cobertura forestal, generar alertas tempranas sobre la deforestación, promover la conservación y producción sostenible de los recursos naturales, así como combatir actividades ilegales que afectan el medioambiente [4].

Con base en los resultados y el desempeño de la misión FACSAT-1 [5], se determinó que la misión FACSAT-2 requeriría una plataforma espacial más robusta, capaz de alojar y operar simultáneamente dos cargas útiles, una con una mayor resolución espacial para teledetección, superando los 30 metros de su antecesor, y una segunda carga científica.

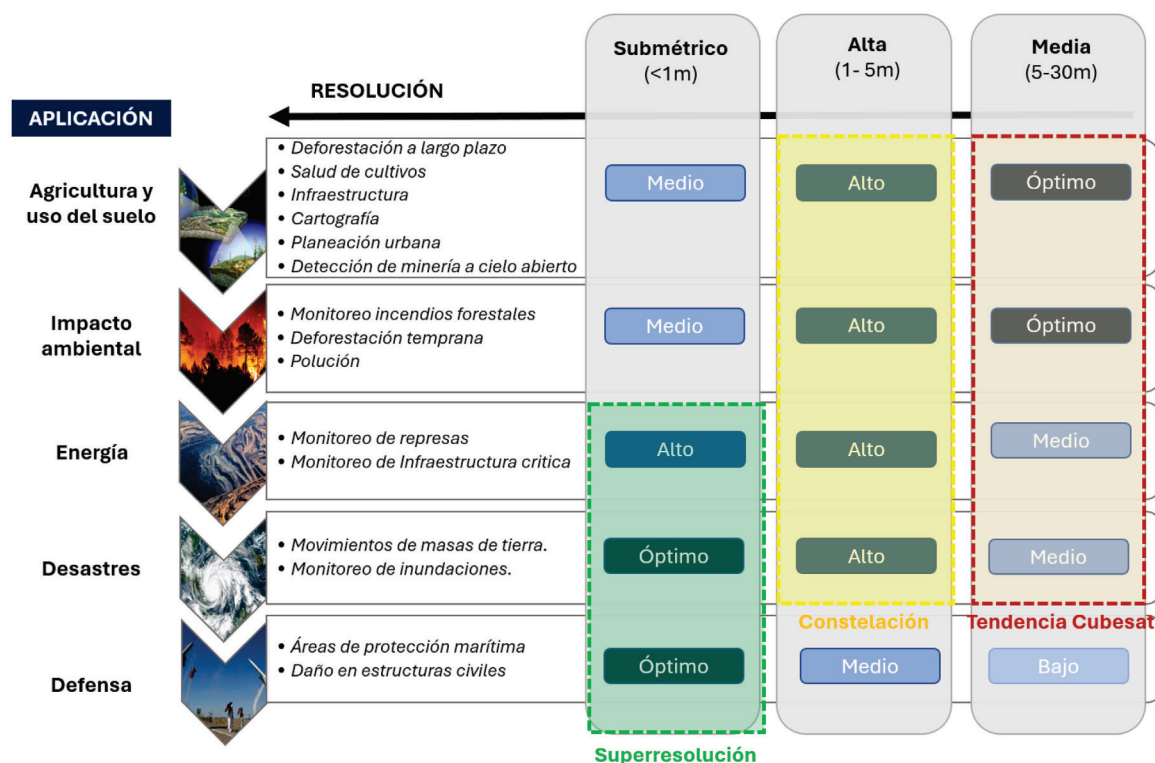
La selección de estas cargas útiles se lleva a cabo con el propósito de adquirir información de alto impacto para la toma de decisiones estratégicas de forma rápida y eficiente, abordando así las necesidades específicas del país. Como se muestra en la figura 1, el rendimiento del sensor óptico para teledetección varía en función de la aplicación y la utilidad de los datos obtenidos [6]-[7]. En esta figura, el rendimiento se clasifica en términos de

resolución espacial baja, media, alta y óptima, lo que se refiere a la capacidad del sensor para diferenciar detalles en las imágenes capturadas. Las aplicaciones que evalúan el impacto ambiental o estiman parámetros de vegetación y uso del suelo son óptimas para sensores de resolución espacial media, una tendencia predominante en las misiones de observación terrestre de nanosatélites o CubeSats [8] y que da cumplimiento al *Mission statement* de la misión FACSAT-2 para la observación de la Tierra [5].

La FAC, alineada con la estrategia gubernamental 2050, priorizó una de las metas del plan climático que busca la reducción del 51 % de los gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2042 [2]-[10], para lo que se requiere el monitoreo del impacto causado por las industrias que más generan emisiones, como son las del sector energético, la agricultura, la ganadería y el cambio de uso de suelo, y la ejecución de estrategias para la mitigación en la fuente de generación [11].

Al analizar las necesidades planteadas, la FAC logró establecer los objetivos de la misión FACSAT-2, así como los requisitos de las cargas útiles que permitirán la captura de imágenes en diversas bandas del espectro electromagnético y firmas espectrales en el infrarrojo. Al combinarlas o analizarlas de forma individual, es posible obtener información detallada y precisa del área de estudio [12].

Las firmas espectrales, que son características únicas de la radiancia emitida por materiales en la atmósfera o en la superficie terrestre, permiten identificar y diferenciar estos materiales con base en su composición específica [13]. Esta capacidad facilita la detección y análisis de vegetación, usos del suelo y la presencia de GEI, proporcionando datos para la evaluación de impactos ambientales y la planificación de estrategias de conservación y reducción de emisiones [12].

Figura 1. Relación entre aplicaciones según la capacidad óptica del sensor

Fuente: esquema adaptado de OpenCosmos y con valores de intervalos de resolución tomados de Landscape, 2023 [9].

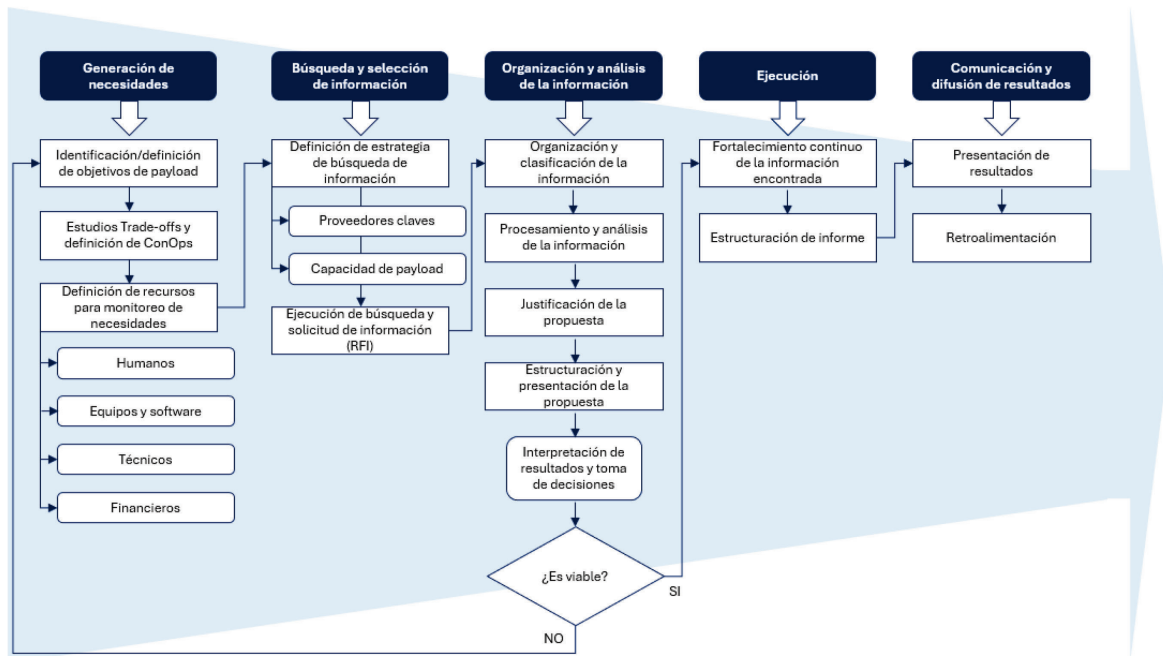
Metodología

De acuerdo con Larson [14], la definición y la selección de las cargas útiles determinan muchas de las capacidades y limitaciones de la misión. En ese sentido, resume diez pasos básicos para llevar a cabo este proceso. Estos incluyen: 1) la selección de los objetivos de las cargas útiles, 2) la realización de un análisis de compensación entre distintos aspectos (*trade-offs*), 3) el desarrollo del concepto de operación (*ConOps*) de las cargas útiles, 4) la determinación de la capacidad requerida, 5) la identificación, 6) la estimación, 7) la evaluación de las características de las posibles cargas útiles y la selección de una línea base, 8) la evaluación de los costos y la operabilidad a lo largo del ciclo de vida, 9) la definición de los requisitos

derivados de las cargas útiles, y 10) la documentación e iteración del proceso.

Los pasos del uno (1) al cinco (5) propuestos por Wertz se desarrollaron durante la fase de definición de la misión para establecer la arquitectura de línea base. Para cumplir con los pasos seis (6), siete (7) y ocho (8) se utilizó el modelo de Vigilancia Tecnológica (VT) propuesto para los grupos de investigación [15], que se presenta en la figura 2.

Se espera que al culminar el proceso de VT se genere un informe final con su correspondiente retroalimentación. Las salidas del proceso del modelo VT proporcionan la información necesaria para realizar los pasos nueve (9) y diez (10) propuestos por Larson para la definición y selección de las cargas útiles de la misión FACSAT-2. Sin embargo, estas salidas del proceso no se tratarán en detalle en este artículo.

Figura 2. Modelo de vt para grupos de investigación adaptado al proceso de selección de cargas útiles Larson para la misión FACSAT-2

Fuente: Larson, 2005 [14] y la Universidad Autónoma de Manizales, 2014 [15].

Aplicación del modelo de vt

vt, cámara multispectral

En la tabla 1 se detallan los requisitos técnicos de la carga útil principal, destacando la necesidad de proporcionar imágenes con resolución espacial o

con distancia entre dos píxeles (Ground Sample Distance o GSD por sus siglas en inglés,) en nadir menor o igual a 6,0 m. Además, se especifica un ancho de franja menor que es igual a 30 km y una mejora en la resolución respecto a los 30 m/píxel de la misión FACSAT-1 [16].

Tabla 1. Requisitos técnicos de las cargas útiles para la misión espacial FACSAT-2

Requisitos técnicos de FACSAT-2	
Número	Descripción
1	El sistema debe proporcionar productos de imágenes multispectrales en mínimo seis bandas (R, G, B, NIR2, SWIR1 y PAN). Se evaluarán amarillo, infrarrojo térmico, borde rojo y Aerosol si se ofrecen.
2	El generador de imágenes/sensor debe proporcionar imágenes con un GSD de nadir < 6,0 m, con una resolución espacial de $\leq 6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$.
3	El sistema debe proporcionar una imagen con un ancho de franja de $\leq 30 \text{ km}$.
4	Proporcionar imágenes geolocalizadas con coordenadas detalladas, con un 98 % de confianza.
5	Cubrir todo el territorio colombiano.
6	Proporcionar inclinación multiángulo para la captura de imágenes.
7	Tener una resolución radiométrica de 10-12 bits.

8	Disponer de una resolución temporal de cuatro días.
9	El generador de imágenes debe ser BSI-CMOS O SUPER CCD.
10	El sistema debe tener un formato de salida de imagen de salida en GEOTIFF, JPEG2000 o PNG.

Fuente: elaboración propia.

Los requisitos de la misión se fundamentan en los objetivos delineados por la FAC para el FACSAT-2 [5]. En un principio, el diseño del segmento espacial se guiaba por una arquitectura satelital que tuviera un peso máximo de 12 kg. Sin embargo, la solución debía ajustarse a un bus de seis unidades (200 x 300 x 10 mm = 6 U), generando una limitación en el espacio disponible para las cargas útiles, reduciéndolo a solo dos unidades para el sensor óptico y la electrónica asociada (1,5 unidades para la principal y 0,5 unidades para la secundaria).

Con base en los requisitos de la tabla 1 se realizó una búsqueda entre empresas especializadas

en el desarrollo de instrumentos para teledetección en pequeños satélites. Para recopilar datos técnicos sobre las características y el rendimiento de los instrumentos mencionados, se envió una solicitud formal de información a ocho proveedores. La tabla 2 presenta el listado de las cinco empresas proveedoras a nivel mundial que presentaron sus propuestas técnicas y comerciales. Sin embargo, debido a acuerdos de confidencialidad (Non-Disclosure Agreement o NDA, por sus siglas en inglés,) firmados, solo se incluye la información técnica disponible en línea.

Tabla 2. Opciones tecnológicas para la cámara multispectral de FACSAT-2

Empresa	Referencia	Producto	Dimensiones
Berlin Space Technologies	HRVI-6HD	Multiespectral de seis bandas con resolución espacial de 5,5 m (PAN) y 11 m (MS) y Swath de 84 km.	245 x 343 x 158 mm 13,4 U
Media Lario	Streego	Hiperespectral de nueve bandas con resolución espacial de 5,5 m e hiperespectral de 5,5 m (PAN) y 11 m (HS) con Swath de 11 km.	615 x 600 x 348 mm 128,12 U
Simera Sense	MultiScape100 cis	Multiespectral de siete bandas con resolución espacial de 4,75 m y Swath de 19,4 km	98 x 98 x 176 mm 1,7 U
SCS Space	Monitor Imager	Multiespectral de siete bandas con resolución espacial de 5 m (PAN), 10 m (MS) y Swath de 20,5 km	150 x 150 x 240 mm 5,4 U
DragonFly	Caiman	Multiespectral de siete bandas con resolución espacial de 5 m (PAN), 10 m (MS) y Swath de 12 km	100 x 100 x 250 mm 3 U

Fuente: Berlin Space Technologies [17], Media Lario [18], Simera Sense [19], SCS Space [20] y DragonFly [21].

Aunque todas las propuestas cumplieran con los requisitos de rango espectral, resolución espacial y radiométrica, tres de los sensores no satisfacían el volumen mínimo requerido para su integración en la plataforma 6 U, por lo que resultaron inviables para la misión. Por lo tanto, solo dos proveedores sudafricanos, Simera Sense y DragonFly Aerospace, pasaron a la fase de la evaluación de costo y selección final.

VT Espectrómetro

La vigilancia tecnológica comienza con la identificación de instrumentos capaces de estimar las concentraciones de GEI, al detectar la absorción atmosférica de la radiación solar reflejada desde la superficie terrestre. Los instrumentos que miden la radiación y la descomponen por longitud de onda reciben el nombre de espectrómetros [22].

Mediante una revisión bibliográfica se identificaron proyectos de ciencia y tecnología a nivel mundial direccionados hacia los GEI y su repercusión en el cambio climático. La revisión abarcó misiones actualmente en curso y otras que ya han completado su ciclo de vida útil, cuyas cargas útiles fueron diseñadas para monitorear GEI con diversos métodos y sensores.

La valoración de concentración en partes por millón (ppm) de GEI que se analiza con la absorción en bandas específicas del espectro electromagnético (en el SWIR, 1420 nm y 1600 nm para el CO₂, 1670 y 2250 nm para el CH₄) [23], se derivan

de los esfuerzos colaborativos de agencias aeroespaciales como la Agencia Espacial Europea (ESA) [2] [24], la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA) [25] y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) [26]. Las agencias mencionadas hacen uso de varias clases de espectrómetros que difieren en robustez, resolución espacial, rango y resolución espectral [27], los cuales hicieron parte de la VT. Un resumen de las características técnicas más importantes de las misiones e instrumentos para medir los GEI [2] se presenta en la tabla 3, junto a las generalidades de las misiones.

Tabla 3. Compendio de características técnicas de los sensores que monitorean CH₄ y CO₂

Satélite (Fecha) / sensores	Resolución espacial (km)	Swath (km)	Dimensiones (mm)	Rango / resolución espectral (nm)	Gases objetivo
Envisat (03-2002) / Sciamachy	30 x 60	960	1800 x 90 x 1000 162 U	214-334 / 0,24 300-412 / 0,26 383-628 / 0,44 595-812 / 0,48 773-1063 / 0,54 971-1773 / 1,48 1934-2044 / 0,22 2259-2386 / 0,26	CH ₂ O, H ₄ , CO, O ₂ , H ₂ O, NO, O ₂ , NO ₃ , 2O, O ₂ , O ₃ , SO ₂
AQUA (05-2002) / AIRS	13,5	1650	1400x 500 x 760 532 U	410-940 / (N/A) 3740-4608 / 4,25 6200-8224 / 6,76 8803-15385 / 11,83	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ O, NO ₂ , O ₃ , SO ₂
MetOp (10-2006) / IASI	24	130	1200 x 1100 x 1300 1716 U	3623-5000 / 0,63 5000-8265 / 1,71 8265-15504 / 6,01	CH ₄ , CO, CO ₂ , H ₂ O, NO, NO ₂ , N ₂ O, O ₃ , SO ₂
CanX-2 (04-2008) SathyambaSat (2016) / Argus 1000	1,4	1	50 x 60 x 80 0,24 U	900-1700 / 6	CH ₄ , CO, CO ₂ , H ₂ O, O ₂
GOSAT (01-2009) / TANSO-FTS	10,5	790	1200 x 1100 x 700 9240 U	758-775 / 0,01 1562-1724 / 0,06 1923-2083 / 0,09 5556-14286 / 4,08	CH ₄ , CO, CO ₂ , H ₂ O, NO, NO ₂ , N ₂ O, O ₂ , O ₃ , SO ₂
OCO-2 (07-2014) / OCO	1.29 x 2.25	10	1600 x 400 x 600 384 U	758-772 / 0,04 1594-1619 / 0,08 2042-2082 / 0,10	CO ₂
Sentinel – 5P (10-2017) / Tropomi	7	2600	1400 x 650 x 750 682 U	270-495 / 0,55 710-775 / 0,55 2305-2385 / 0,25	CH ₄ , CO, H ₂ O, NO, NO ₂ , N ₂ O, O ₂ , O ₃ , SO ₂

GR-5 (05-2018) / GMI	10.3	800	790 x 690 x 575 313 U	759-769 / 0,027 1568-1583 / 0,067 1642-1658 / 0,067 2043-2058 / 0,113	CO ₂ , CH ₄
Prisma (03-2019) / Prisma	30	30	770 x 590 x 780 354 U	400-1010 / 12 920-2505 / 12	CH ₄ , CO, CO ₂ , H ₂ O, NO, NO ₂ , N ₂ O, O ₂ , O ₃ , SO ₂
MeznSat (03-2020) / Argus 2000	1.25	1	45 x 50 x 80 018 U	1000-1600 / 6	CO ₂ , H ₂ O, CH ₄ , O ₂

Fuente: Cárdenas, 2023 [2], Lixin Wang, Matthew F. McCabe y Wenzhe Jiao, 2021 [28], Streets *et al.*, 2013 [29] y de la base de datos World Meteorological Organization, 2023 [30].

Después de analizar los sistemas satelitales y los sensores [2] más relevantes, se procedió a examinar misiones satelitales que pudieran ser similares o cuyos sensores cumplieran con las especificaciones técnicas para formar parte de la misión satelital tipo CubeSat FACSAT-2.

Aunque existe una variedad de misiones e instrumentos que cubren el rango espectral que corresponde al CO₂ y el CH₄, solo dos instrumentos cumplían las limitantes de tamaño, ambos desarrollados por la empresa canadiense Thoth Technology.

Otras alternativas identificadas durante el estudio incluyeron un radiómetro láser heterodino de 4 U para medir CH₄ y CO₂ en un satélite tipo cubo de visualización de ocultación [2], presente en el satélite MINICARB [31]. También un radiómetro de imagen espectral infrarroja (ISIR), que emplea microbolómetros compactos no refrigerados para capturar imágenes infrarrojas de los océanos y la atmósfera terrestre, presente en el satélite COPPER [32]. Las características clave de estas opciones se resumen en la tabla 4, además de las restricciones para ser integrado a la misión FACSAT-2 [2].

Tabla 4. Características principales y otras opciones para la misión FACSAT-2

Alternativa	Descripción General	Restricción
Radiómetro Heterodino Láser (LHR)	Se basa en un instrumento terrestre similar que se desarrolló en el Goddard Space de la NASA para mediciones de CO ₂ , CH ₄ y H ₂ O sobre la atmósfera; es el que lleva el satélite MINICARB.	Se encuentra diseñado para un CubeSat de cuatro unidades (4 U); su desarrollo no es comercial.
FLIR TAU 320	Es un radiómetro de imagen espectral infrarroja (ISIR) mediante microbolómetros compactos no refrigerados para tomar imágenes infrarrojas de los océanos y la atmósfera de la Tierra; se encuentra en el satélite COPPER.	En la búsqueda se encuentra fuera de <i>stock</i> de la compañía FLIR, en la que se presentan otras versiones (TAU 336, TAU 640) que están previstas para aeronaves no tripuladas y que no definen un rango espectral enfocado en la medición de los GEI (750 a 1350 nm).

Fuente: Cárdenas, 2022 [33].

Resultados

En línea con la metodología de VT para grupos de investigación y siguiendo los pasos propuestos por Larson, se presentan los resultados de la evaluación tecnológica de las cargas útiles. Estos resultados documentan de manera detallada el proceso de

selección, permitiendo establecer la trazabilidad de los requisitos de la misión. La VT se convierte en un ciclo iterativo en el que la información se actualiza continuamente, asegurando así la correcta selección de los sensores y el cumplimiento de los objetivos de la misión FACSAT-2.

Selección de la cámara multispectral

La tabla 5 detalla el cumplimiento de los requisitos de la carga útil principal de los proveedores Simera Sense y DragonFly Aerospace. La cámara MultiScape100 CIS ofrece una resolución espectral más alta en comparación con la cámara Caiman, lo que permite una mejor distinción entre los intervalos de longitud de onda en el espectro electromagnético. Además, presenta una mejora en la resolución espacial sin necesidad de utilizar el modo pancromático (PAN).

Según Larson, al tomar decisiones es crucial considerar los *drivers* y los limitantes de una

misión. Los *drivers*, en este contexto, son los criterios “no negociables” que pueden impactar el ciclo de vida de la misión [16]. En el caso de la selección de la carga útil principal, los *drivers* implicaban el tiempo de desarrollo y entrega de la cámara, así como su costo asociado. Como se detalla en la tabla 5, el plazo de entrega era considerablemente más largo y, además, el precio de la cámara Caiman era un 45,8 % más alto en comparación con la de Simera. Esto significaba que, para continuar con el ciclo de vida, se habría tenido que extender tres meses la campaña de ensamblaje, integración y pruebas, comprometiendo la fecha de lanzamiento y puesta en órbita del satélite.

Tabla 5. Comparación de cámaras multispectrales para la misión espacial FACSAT-2

Parámetro	MultiScape100 CIS	Caiman
Resolución espacial GSD a 500 km de altura (Nadir)	4,75 m	10 m (MS) 5 m (PAN)
Bandas espectrales	R, G, B, VNIR, SWIR	R, G, B, Amarillo, Red-Edge, NIR-2
Resolución espectral	12-bit	10-bit
Almacenamiento	128 GB	2*128 GB
Tiempo de desarrollo	6 meses	9 meses

Fuente: elaboración propia.

Además, aunque la cámara Caiman cumplía con las dimensiones para estructuras CubeSat de 6U, la integración del sensor y la electrónica asociada ocuparían casi tres unidades del bus satelital. Esto implicaría la exclusión de cargas secundarias e incluso de algunos sensores del Sistema de Determinación y Control de Actitud (Attitude Determination and Control System o ADCS, por sus siglas en inglés.). Por lo anterior, la FAC y su aliado tecnológico GomSpace seleccionaron el generador de imágenes MultiScape100 CIS, diseñado por Simera Sense como carga útil principal de la misión FACSAT-2.

Análisis de solución de la MultiScape 100 CIS

La cámara MultiScape 100 CIS es un sistema de imagen electroóptico que utiliza un sensor CMOS

CMV12000 con un filtro multispectral de ocho bandas en VNIR. Este equilibrio entre la resolución espacial y la cantidad de bandas espectrales junto con la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (IA) permitirán la caracterización del territorio colombiano [34].

El sensor electroóptico tiene un efecto de barrido a lo largo del recorrido del satélite y la captura de imágenes en modo instantáneo, con un ancho de franja de 19,4 km; también cuenta con sistemas integrados, como telemetría integral a bordo y monitoreo de salud del subsistema, seguimiento de la corriente de bloqueo e interruptor de alimentación a bordo, opcional con apagado rápido, que lo hacen más integrado, en comparación con las otras opciones, al estar diseñado específicamente para misiones espaciales de órbita baja terrestre (LEO).

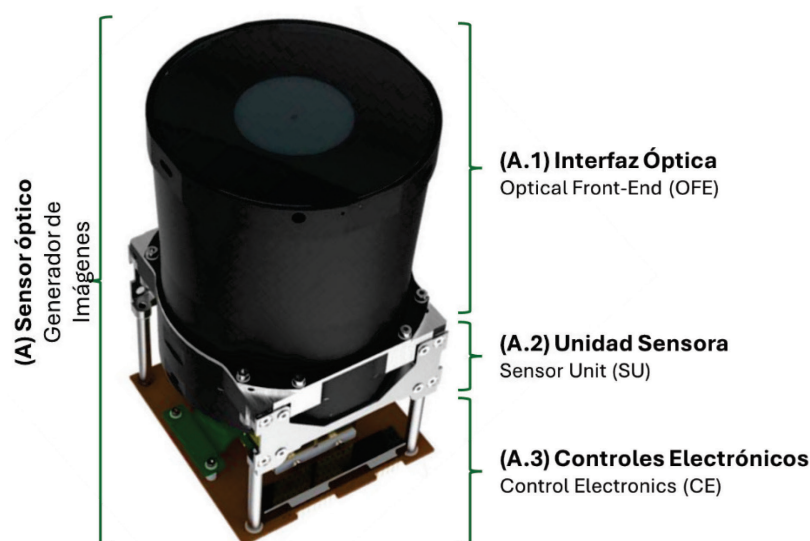
El generador de imágenes MultiScape100 CIS (figura 3) consta de los siguientes componentes funcionales:

- (A.1) – Optical Front-End (OFE): el xScape100 VNIR OFE se utiliza para enfocar la luz entrante en el plano focal.
- (A.2) -Unidad de sensor (SU): consta de la electrónica frontal del sensor CMOS (FEE) y de un filtro de siete bandas. También incluye la mecánica de la placa del sensor, que permite montarlo en el plano focal del OFE.
- (A.3) -Electrónica de Control (CE): proporciona interfaces de control y datos al bus satelital. Realiza control de sensores, manejo y almacenamiento de datos, y procesamiento de

imágenes. También es responsable de la regulación y la gestión de la energía, así como del control de la salud y la telemetría.

El xScape100 VNIR OFE se utiliza como interfaz óptica para el MultiScape100 CIS. Está diseñado para adaptarse a un amplio rango espectral, ser robusto y mantener el rendimiento en un amplio rango de temperatura. El diseño óptico de la carga útil de imágenes incorpora un diseño óptico Cassegrain modificado, es decir, que cuenta con tres lentes en su parte óptica frontal, con una lente de entrada de menisco que define la pupila de entrada de la carga útil y agrega protección ambiental adicional al OFE durante la integración, el lanzamiento y la operación [35].

Figura 3. Cámara multispectral Simera Sense MultiScape100 CIS



Fuente: Sinclair y Eng, 2010 [35].

Selección y análisis de solución del Argus 2000

En abril de 2008 fue puesto en órbita el Argus 1000, desarrollado por Thoth Technology, como carga útil principal a bordo de la misión del nanosatélite CanX-2, preparado por UTIAS/SFL (University of Toronto, Institute for Aerospace Studies/Space Flight Laboratory) [2]. Este espectrómetro fue diseñado para registrar espectros de radiancia

en rango infrarrojo de 900 a 1700 nm. Sus mediciones han permitido recuperar concentraciones de CO₂ en algunas regiones de Canadá [22].

En el año 2020, como resultado de un proyecto de colaboración entre la Universidad de Ciencia y Tecnología de Khalifa (KUST) y la Universidad Americana de Ras AlKhaimah (AURAK), con una financiación de la Agencia Espacial de los Emiratos Árabes Unidos (UAE-SA) [2] [36], fue lanzado exitosamente al espacio el CubeSat de 3 U, de nombre MeznSat.

Este nanosatélite cuenta con el Argus 2000 como carga útil principal. Este espectrómetro permite monitorear las concentraciones de GEI en la atmósfera, realizando observaciones de radiancia [36]. Debido a la novedad tecnológica del Argus 2000 y a su éxito en la misión, se selecciona el instrumento para integrarse en el bus satelital del FACSAT-2.

El espectrómetro Argus 2000 es una miniatura de bajo costo y apto para el espacio, opera en las bandas infrarrojas de onda corta (SWIR), en el rango de 1000 a 1700 nm [2], tiene una masa inferior a 280 g, un ángulo de visión de 0,15 grados, una óptica frontal de 15 mm y un consumo de energía inferior a 1 W [37].

Este instrumento permite realizar estimaciones de CO₂ y otros GEI a partir de medidas remotas espaciales en la región del infrarrojo cercano (NIR) y en la región de infrarrojo de onda corta (SWIR) [2]-[38], particularmente en el rango de 1600 a 1650 nm. En este punto es importante recalcar que Thoth Technologies ofrece cuatro opciones diferentes de espectrómetro. Dependiendo de la versión del sensor se puede tener un rango particular de absorción. La decisión final estuvo principalmente influenciada por consideraciones de tamaño, masa y, sobre todo, por la experiencia previa de los sensores en el espacio, es decir, si ya contaban con un historial de desempeño en órbita.

Con este sensor es posible recuperar concentraciones de CO₂ y de CH₄ (de forma limitada, ya que de 1650 nm a 1700 nm la eficiencia cuántica del detector decrece de 50 % a menos del 10 %, por lo que la banda de absorción en torno a 1666 nm se acerca al límite de detectabilidad, imposibilitando su cuantificación) a partir de sus picos de absorción débiles. Adicionalmente, la información integrada de la cámara y el espectrómetro Argus 2000 permitirán ampliar las capacidades investigativas para el estudio de escenarios de nubosidad y el efecto de diferentes superficies reflectantes en la recuperación de los GEI [2]-[36].

Conclusiones

- El modelo VT se adapta a las necesidades de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) para la búsqueda de proveedores estratégicos y

cumplir con los requisitos de la misión. Además, el modelo de diez pasos de Larson permite identificar, dentro del ciclo de vida de una misión espacial, cómo se cumplen los objetivos y cuáles son las limitaciones de la misión, mediante un ciclo iterativo y de refinamiento de la información.

- La configuración técnica seleccionada consiste en un nanosatélite con una estructura compuesta por seis unidades. En su interior albergará dos cargas útiles combinadas: la cámara electroóptica multispectral Multiscape CIS 100, de la casa matriz Simera Sense, que posee una resolución de 4,7 metros por píxel y un rango espectral de los 450 nm a 900 nm. Además, también incluye el espectrómetro infrarrojo de onda corta Argus 2000, que permitirá obtener datos de firmas espectrales en el rango de 1000 a 1700 nm.
- La integración de las capacidades de los dos sensores ofrece una ventaja significativa para estudios multitemporales enfocados en la agricultura, el uso del suelo y el impacto ambiental. Estos datos amplían el entendimiento del planeta y contribuyen al desarrollo de soluciones y políticas para la protección [10] y conservación del entorno, así como aquellas que impulsan el desarrollo espacial en el país [1].
- La VT revela que la mayoría de las misiones centradas en los GEI optan por diseñar y fabricar sus propias cargas útiles, por lo tanto, el espectrómetro Argus 2000 se convierte en la mejor opción disponible en el mercado global con herencia y certificación espacial para misiones de nanosatélites. Además, la VT permitió establecer la tendencia de las compañías de miniaturizar los sensores ópticos para teledetección, sin embargo, aún se presentan restricciones físicas por las cualidades ópticas de las cámaras, limitando a los CubeSats a ofrecer una resolución media.

Agradecimientos

Agradecemos a la FAC por encabezar y llevar a cabo este tipo de propuestas e investigaciones. Es

importante dar continuidad al desarrollo y mejoramiento del patrimonio y las tecnologías aeroespaciales que se han logrado con la integración y la puesta en órbita del FACSAT-2, permitiendo a la nación un mejor conocimiento del territorio y el posible estudio y análisis de las condiciones ambientales del país.

Referencias

- [1] Departamento Nacional de Planeación. (2020, ene. 13). Conpes 3983, Política de desarrollo espacial, Bogotá, D. C. [Internet]. Disponible en <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3983.pdf>.
- [2] L. Cárdenas, E. Guitiérrez, W. Chacón, I. Plata y C. Moreno, “Investigación para la implementación de una segunda carga útil al sistema satelital FACSAT-2, para el análisis de gases de efecto invernadero,” en *Gestión Tecnológica e Innovación en el Campo Aeroespacial*, Cali, Colombia: Sello Editorial Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, 2023, ch. 5, pp. 127-170.
- [3] W. Daniel, M. Rathnasabapathy, K. Stober y P. Menon, “Challenges and progress in applying space technology in support of the sustainable development goals,” *Acta Astronáutica*, vol. 219, pp. 678-692, 2024. doi: 10.1016/j.actaastro.2024.03.064
- [4] Q. Zhao, L. Yu, Z. Du, D. Peng, P. Hao, Y. Zhang y P. Gong, “An Overview of the Applications of Earth Observation Satellite Data: Impacts and Future Trends,” *Remote Sensing*, vol. 14, no. 8, Apr. 2022, Art. no. 1863, doi: 10.3390/rs14081863.
- [5] G. Corredor y E. Benavides, “Transferencia de tecnología y desarrollo de capacidades para el programa espacial colombiano mediante pequeños satélites,” *Revista de Tecnología Aeronáutica*, vol. 29, pp. 8-19, 2019.
- [6] T. Ahmad, D. Sinha, P. Chakraborty, A. Rahman y I. Imam, *Remote Sensing and GIS: Digital Image Fusion*, University Grand Commission, 2019, p. 21.
- [7] F. Gutierrez, A. Teodoro, E. Reis, C. Neto y J. Costa, “Remote Sensing Technologies for the Assessment of Marine and Coastal Ecosystems,” en *Seafloor Mapping along Continental Shelves*, vol. 13, Marzo, Springer, Cham, 2016, pp. 69-104.
- [8] T. Villela, C. Costa, A. Brandão, F. Bueno y R. Leonardi, “Towards the Thousandth CubeSat: A Statistical Overview,” *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2019, 2019, Art. no.5063145, doi: 10.1155/2019/5063145.
- [9] “Satellites in Global Development,” 2023. [Internet]. Disponible en <https://landscape.satsummit.io/capture/resolution-considerations.html>.
- [10] Gobierno de Colombia, “Estrategia 2050: Cambio climático y gestión de riesgos,” 2019. [Internet]. Disponible en <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/estrategia-2050/>
- [11] Naturgas, “Uso de la tierra y deforestación, los principales emisores de CO₂ en Colombia,” 2023. [Internet]. Disponible en <https://naturgas.com.co/uso-de-la-tierra-y-deforestacion-los-principales-emisores-de-co2-en-colombia/>.
- [12] L. Cárdenas, “Nuevas fronteras en la observación de la Tierra,” *Revista Aeronáutica*, vol. 309, pp. 14-16, 2023.
- [13] D. Manolakis, D. Marden y G. Shaw, “Hyperspectral image processing for automatic target detection applications,” *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 79-114, 2003.
- [14] W. J. Larson Wiley, “Space Payload Design y Sizing,” en *Space Mission Analysis and Design*, El segundo, California: Space Technology Library, 2005, pp. 245-248.
- [15] C. Ospina y M. Gómez, *Modelo de Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva en Grupos de Investigación*, Manizales. Tesis inédita M.S., Universidad Autónoma de Manizales, Facultad de Ingeniería, Manizales, Colombia, 2014, p. 145.
- [16] S. Rincón, J. Cárdenas, K. Pirazán, I. Acero, R. Hurtado y D. Cortés, “Critical Design of the FACSAT-2 mission CubeSat for the observation and analysis of the Colombian Territory,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 22, no. 3, pp. 69-86, Jul. 2023, doi: 10.18273/revuin.v22n3-2023006
- [17] Berlin Space Technology, “High Resolution Video Camera (Obsolete),” 2021. [Internet]. Disponible en <https://www.berlin-space-tech.com/wp-content/uploads/2020/07/PFR-PR05-HRV1-6HD-Flyer-V1.00-SV003.pdf>
- [18] Media Lario, “Streego,” 2021. [Internet]. Disponible en https://satcatalog.s3.amazonaws.com/components/755/Sat-Catalog_-_Media_Lario_Srl_-_STREEGO_-_Datashet.pdf?lastmod=20210709055114

- [19] Simera Sense, “MultiScape100 cis Datasheet,” 2021. [Internet]. Disponible en <https://www.simera-sense.com/download/multiscap100-cis/#unlock>
- [20] scs Space, “Monitor Imager,” 2021. [Internet]. Disponible en <https://satsearch.co/products/scs-space-monitor-imager>
- [21] Dragonfly Aerospace, “Caiman Imager High-performance Camera for CubeSats,” 2021. [Internet]. Disponible en <https://dragonflyaerospace.com/products/caiman/>
- [22] R. Japal, *Calibration and Validation of Argus 1000 Spectrometer - A Canadian Pollution Monitor*, Ontario, Toronto. Tesis inédita Ph. D, Departamento de Física y Astronomía, Universidad de York, Ontario, Canada, 2011.
- [23] R. Jagpal, B. Quine, H. Chesser, S. Abrarov y R. Lee, “Calibration and in-orbit performance of the Argus,” *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 4, no.1, pp. 049501-049501, 2010, doi: 10.1117/1.3302405.
- [24] ESA, Sentinel Copernicus, “Overview of Sentinel-5P Mission,” 2019. [Internet]. Disponible en <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s5p-mission>
- [25] NASA, Jet Propulsion Laboratory, “Orbiting Carbon Observatory-2,” A[Internet]. Disponible en <https://ocov2.jpl.nasa.gov/>
- [26] JAXA, “Greenhouse gases observing satellite GOSAT “IBUKI,” 2009. [Internet]. Disponible en <https://www.gosat.nies.go.jp/en/>
- [27] A. Andries, R. Murphy, S. Morse y J. Lynch, “Earth Observation for Monitoring, Reporting, and Verification within Environmental Land Management Policy,” *Sustainability*, vol. 13, no. 2021. Art. no. 9105, doi: 10.3390/su13169105.
- [28] W. Jiao, L. Wang y M. McCabe, “Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 256, 2021. Art. no. 112313, doi: 10.1016/j.rse.2021.112313.
- [29] D. Streets, T. Canty, G. Carmichael, B. De Foy, R. Dickerson, B. Duncan, D. Edwards, J. Haynes, D. Henze y M. Houyoux, “Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability,” *Atmospheric Environment*, vol. 77, pp. 1011-1042, 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.05.051.
- [30] World Meteorological Organization, “Space-based Capabilities (Oscar/Space),” 2023. [Internet]. Disponible en <https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>.
- [31] K. G. D, “MiniCarb (CNGB),” [Internet]. Disponible en https://space.skyrocket.de/doc_sdat/minicarb.htm
- [32] NASA, “Copper (Close Orbiting Propellant Plume and Elemental Recognition) CubeSat,” 2012. [Internet]. Disponible en <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copper#eop-quick-facts-section>.
- [33] L. Cárdenas, E. Gutierrez, W. Chacón y C. Moreno, “Investigación para la implementación de una segunda carga útil al sistema satelital FACSAT-2, para el análisis de gases de efecto invernadero,” en *Semana universitaria EMAVI 2022 Gestión, Ciencia, y Poder Aeroespacial*, Santiago de Cali, Colombia.
- [34] P. Zárate y J. López, “Systematic Literature Review: Artificial Neural Networks Applied in Satellite Images,” *IEEE Colombian Conference on Applications of Computational Intelligence (IEEE ColCACI 2020)*, pp. 1-6, 9 2020, doi: 10.1109/ColCACI50549.2020.9247916
- [35] D. Sinclair y P. Eng, “Interface Control Document - Simera Sense, Vol. 3761, Issue Jan.,” Simera sense, 2021. [Internet]. Disponible en <https://www.simera-sense.com/download/multiscap200-icd/>.
- [36] J. Abdul, P. Marpu, Z. Aziz, A. Al Marar y M. Awad, “MeznSat-A 3U CubeSat for Monitoring Greenhouse Gases Using Short Wave Infra-Red Spectrometry: Mission Concept and Analysis,” *Aerospace*, vol. 6, no. 11, 2019. Art. no. 118, doi: 10.3390/aerospace6110118.
- [37] Thoth Technology Inc., “Argus 2000 IR Spectrometer Owner’s Manual OG274001, Issued Release 1.03,” 2018. [Internet]. Disponible en <http://thothx.com/getmedia/4c0d3242-b4fb-4e9d-abf7-85dbb5c6653f/20180815-Argus-2K-Owner-s-Manual,-Thoth-Technology,-rel-1-03.aspx>
- [38] L. Guanterm, I. Irakulis, J. Gorroña, E. Sánchez, D. Cusworth, D. Varon, S. Cogliati y R. Colombo, “Mapping methane point emissions with the Prisma spaceborne imaging spectrometer,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 265, 2021. Art. no. 112671, doi: 10.1016/j.rse.2021.112671.