



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Recepción de Servicios Satelitales de GOES-East: HRIT y GRB

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Martín Cabrera, Pedro Pertusso

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA FINALIZACIÓN DE LAS CARRERAS DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA E INGENIERÍA EN SISTEMAS DE
COMUNICACIÓN.

TUTOR

Gonzalo Belcredi..... German Aerospace Center
Gonzalo Gutiérrez Universidad de la República
Federico La Rocca Universidad de la República

TRIBUNAL

Manuel Caldas Universidad de la República y Dinatel
Gastón De Boni Universidad de la República
Claudina Rattaro Universidad de la República
Madeleine Renom Universidad de la República e Inumet

Montevideo
Lunes 14 de julio, 2025

Recepción de Servicios Satelitales de GOES-East: HRIT y GRB, Martín Cabrera,
Pedro Pertusso.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.2).
Contiene un total de 185 páginas.
Compilada el martes 18 noviembre, 2025.
<http://iie.fing.edu.uy/>

“Desde aquí la Tierra es azul. ¡Qué hermosa es!
Pobladores del mundo, salvaguardemos esta be-
lleza, no la destruyamos.”

YURI ALEKSEYEVICH GAGARIN
Desde el Vostok 1, el 12 de abril de 1961.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

Hay ciertas personas que, si no fuese por su apoyo, este proyecto no hubiera sido posible. Agradecemos profundamente el apoyo, la ayuda y los conocimientos brindados por las distintas personas que directa e indirectamente nos acompañaron durante nuestro camino.

Agradecemos a nuestros tutores por toda su labor durante el transcurso del mismo. A Federico La Rocca, por orientarnos en la idea de realizar nuestro proyecto en un tema vinculado a las imágenes satelitales, por gestionar en gran parte las colaboraciones que enriquecieron el resultado final de este proyecto y por ayudarnos a encaminar las tareas cuando solo parecía que encontrábamos más problemas. A Gonzalo Belcredi, quien a pesar de estar a 11200 km y 5 horas de distancia, supo compartir con nosotros su conocimiento y experiencia para poder resolver los distintos problemas a los que nos fuimos enfrentando, incluso antes de que nos enfrentáramos a ellos. A Gonzalo Gutiérrez, por sumarse como tutor luego de comenzado este proyecto y compartir con nosotros de primera mano su conocimiento y sus habilidades, que resultaron vitales para trabajar de forma directa con sistemas de radiofrecuencia.

Agradecemos especialmente al equipo de la Estación Terrena de Antel en Manga: Emiliano Irace, Martín Vezoli, Diego Vila y Javier Thevenet por disponer de su tiempo, ayuda y conocimiento para trabajar con una antena parabólica y por mostrarnos su trabajo en la propia Estación. También a Néstor Álvarez, sin cuya ayuda no hubiera sido posible el trabajo en la Estación. Le agradecemos también por su interés en nuestro trabajo y por ayudarnos con la tarea de simulación de la caracterización de nuestra antena.

Al personal de vigilancia de la Facultad de Ingeniería, por permitirnos el acceso cuando hizo falta a la azotea de la facultad.

También queremos agradecer a Douglas Cáceres, quien brindándonos su tiempo y experiencia, nos ayudó con mucha paciencia construyendo, ensamblando, modificando y adaptando un soporte para la antena de Wi-Fi y el Septum Feed, una pieza clave del sistema de GRB. Sin él y su disponibilidad para ayudar y permanente prolijidad al momento de construir cosas, este proyecto hubiera sido muy difícil, por no decir imposible, de llevar a cabo.

Agradecemos a TCC por la gentileza de permitirnos utilizar material indispensable para el desarrollo de este proyecto.

Agradecemos a todas las personas que estuvieron presentes durante nuestra formación, quienes quizás no figuren de forma visible en este documento pero sus aprendizajes y enseñanzas nos marcaron de por vida. Por eso queremos agradecer

a nuestras maestras y maestros de preescolar, la escuela, el liceo y a los profesores de la Universidad de la República. A todos ustedes, muchas gracias por formarnos en las personas que somos hoy.

También nos gustaría agradecer a nuestras familias, amigos y personas más cercanas, quienes nos brindaron su permanente apoyo y nos motivaron a no bajar los brazos incluso cuando nos enfrentábamos a problemas que parecían no tener solución. Especialmente queríamos mencionar a Lucía, Claudio, Rosario, Laura y Santiago.

A todos ustedes, ¡muchas gracias!

*A mi abuelo Tono, a mis padres y a Lucía.
A mis padres y a Santi. A Ulises e Igor.*

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

Los satélites meteorológicos GOES, operados por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) de EE.UU., proveen imágenes de alta resolución e información meteorológica clave sobre la Tierra. Estos datos, especialmente los de GOES-East, son indispensables para instituciones como el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Udelar y el Instituto Uruguayo de Meteorología (Inumet). En Uruguay, esta información se accede mayoritariamente vía Internet, generando una dependencia crítica de la conectividad y la disponibilidad de estos servicios. Una alternativa es recibir los datos directamente desde el satélite, sin intermediarios.

Los GOES transmiten su información a través de dos servicios: HRIT (*High Rate Information Transmission*) y GRB (*GOES Rebroadcast*). HRIT distribuye un subconjunto limitado de los datos, mientras que GRB retransmite todos, incluso con mayor resolución espacial. Debido a las características de la señal, la recepción de GRB requiere equipamiento más complejo, como una antena parabólica de aproximadamente 4,5 m y un alimentador de polarización doble circular.

Este proyecto tuvo como objetivo desarrollar sistemas de recepción para ambos servicios, empleando tecnología de Radio Definida por Software (SDR) y el software de código abierto SatDump. En una primera etapa se desarrolló un sistema de recepción para HRIT, instalado en la azotea de la Facultad de Ingeniería. El sistema se basó en un SDR de bajo costo y una antena Wi-Fi reutilizada, adaptada a la frecuencia de HRIT. Para ello, se caracterizó la antena con un analizador de redes vectoriales (VNA) y se modificó el dipolo para minimizar las pérdidas de retorno. El resultado fue un diseño económico y sencillo, ideal para entornos educativos, permitiendo introducir a estudiantes a la recepción de servicios satelitales.

En una segunda etapa se diseñó el sistema de recepción para GRB, basado en un SDR de gama alta, una antena parabólica de 3,9 m y un alimentador de polarización doble circular. La antena parabólica fue cedida por Antel, con quien se gestionó el préstamo de la misma en la Estación Terrena de Manga, lugar donde se instaló el sistema de recepción. Una parte esencial del trabajo fue el diseño, construcción y caracterización del alimentador. Su desarrollo es una contribución técnica clave del proyecto, pues implicó un proceso de investigación y ajustes iterativos al modelo. El sistema resultante es flexible y evita el uso de equipos propietarios, facilitando su adaptación según las necesidades locales.

Ambos sistemas demostraron ser plenamente funcionales, permitiendo la recepción directa y confiable de imágenes y datos de GOES-East. Estos resultados prueban la viabilidad de soluciones de observación meteorológica avanzadas basadas en tecnología abierta, además de ofrecer una vía concreta para reducir la

dependencia de Internet en la adquisición de información meteorológica crítica.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	VII
1. Introducción	1
1.1. Contexto y Motivación	1
1.2. Objetivos	5
1.3. Alcance	7
1.4. Contenido	7
2. Fundamentos de Radiofrecuencia para Telecomunicaciones	9
2.1. Antenas	9
2.1.1. Ganancia	9
2.1.2. Ancho de Banda	10
2.1.3. Polarización	11
2.2. Líneas de Transmisión	12
2.2.1. Impedancia Característica	13
2.2.2. Coeficiente de Reflexión	13
2.2.3. Relación de Onda Estacionaria de Voltaje (VSWR)	14
2.3. Parámetros S y Analizador de Redes Vectoriales	15
2.4. Cálculo del Margen de Enlace	15
2.4.1. Cálculo de Enlace para Recepción Satelital	16
2.4.2. Expresión Completa para el Cálculo de Enlace para Recepción Satelital	16
2.4.3. Estimación de la Temperatura de Ruido del Sistema	18
3. Introducción a la Radio Definida por Software (SDR)	21
3.1. Fundamentos de la Radio Definida por Software	21
3.1.1. Funcionamiento de los SDR	22
3.1.2. Sistema de Recepción Básico con SDR	26
3.1.3. Variantes de SDR	27
3.2. Aplicaciones para SDR	29
3.2.1. GNU Radio	30
3.2.2. SatDump	30

Tabla de contenidos

4. Comunicaciones Satelitales	33
4.1. Principios Básicos de las Comunicaciones Satelitales	33
4.1.1. Introducción a las Comunicaciones Satelitales	33
4.1.2. Funcionamiento de un Sistema de Comunicación Satelital	34
4.2. Generación de Satélites GOES-R	42
4.2.1. Instrumentos del Satélite	43
4.2.2. Servicios Transmitidos	45
4.2.3. Productos Satelitales	46
4.3. High Rate Information Transmission (HRIT)	47
4.3.1. Parámetros de HRIT	48
4.3.2. Productos Provistos por HRIT	49
4.4. GOES Rebroadcast (GRB)	50
4.4.1. Parámetros de GRB	51
4.4.2. Requerimientos para la Recepción de GRB	52
4.4.3. Especificaciones de GRB	54
5. Recepción de High Rate Information Transmission (HRIT)	57
5.1. Sistema de Recepción	57
5.1.1. Estructura General del Sistema de Recepción	58
5.1.2. Cálculo de Margen de Enlace	59
5.1.3. Etapa de Recepción RF	59
5.1.4. Digitalización y Procesamiento en Software	63
5.2. Resultados Obtenidos de HRIT	66
5.2.1. Desempeño General del Sistema	66
5.2.2. Imágenes de Disco Completo - GOES-East	67
5.2.3. Gráficos del EMWIN	67
5.2.4. Gráficos del NWS	70
6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)	73
6.1. Diseño del Sistema de Recepción de GRB	73
6.2. Feed de Polarización Doble Circular	75
6.2.1. Septum Feed	76
6.2.2. Alternativas al Septum Feed	78
6.2.3. Simulaciones del Septum Feed	79
6.2.4. Construcción del Septum Feed	80
6.2.5. Ajustes al Septum Feed	83
6.3. Implementación del Sistema de Recepción de GRB	85
6.3.1. Cálculo del Margen de Enlace	88
6.3.2. Puesta en Marcha del Sistema	89
6.3.3. Sistema de Procesamiento de SatDump	94
6.4. Resultados obtenidos de GRB	95
6.4.1. Productos de la Polarización Circular Izquierda (LHCP)	97
6.4.2. Productos de la Polarización Circular Derecha (RHCP)	97
6.4.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)	98
6.4.4. Productos del Geostationary Lightning Mapper (GLM)	99

7. Conclusiones	101
7.1. Evaluación de Resultados	101
7.2. Reflexiones	103
7.3. Trabajo a Futuro	104
A. Instalación y Uso de SatDump	107
A.1. Instalación	107
A.2. Uso	108
A.3. Configuración para el Uso con Parámetros Avanzados	112
B. GEONETCast	115
B.1. Introducción	115
B.2. Funcionamiento	116
B.3. Recepción	118
C. Método del Segundo y el Cuarto Momento para la Estimación del SNR	121
C.1. Estimación del SNR	121
C.2. Cálculo de E_B/N_0 a Partir del SNR	122
D. Productos Obtenidos de High Rate Information Transmission (HRIT)	125
D.1. Imágenes de Disco Completo - GOES-East	125
D.1.1. Imágenes de Disco Completo - GOES-West	130
D.1.2. Imágenes de Mesoescala - GOES-East	130
D.1.3. Imágenes de Himawari y EUMETSAT	132
E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)	135
E.1. Productos de la Polarización Circular Izquierda (LHCP)	135
E.2. Productos de la Polarización Circular Derecha (RCHP)	140
E.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)	141
F. Instrumentos de los Satélites GOES-R	151
F.1. Space Environment In-Situ Suite (SEISS)	151
F.2. Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors (EXIS)	151
F.3. Magnetometer (MAG)	152
F.4. Geostationary Lightning Mapper (GLM)	152
F.5. Compact Coronagraph (CCOR)	152
Referencias	153
Glosario	163
Índice de tablas	163
Índice de figuras	164

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y Motivación

Los GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) son satélites meteorológicos geoestacionarios operados por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA). Desde sus comienzos en 1975, han sido instrumentales en transformar cómo observamos y entendemos procesos ambientales y atmosféricos. La NOAA cuenta con dos satélites GOES en actividad: GOES-East y GOES-West. GOES-East se enfoca en el continente americano, mientras que GOES-West monitorea gran parte del océano Pacífico.

Ambos satélites están equipados con instrumentos capaces de capturar imágenes de la Tierra con alta resolución espacial y temporal. Esta información permite a científicos y meteorólogos monitorear en detalle fenómenos que van desde el desarrollo de ciclones hasta incendios forestales. La Figura 1.1 muestra una imagen de disco completo capturada por GOES-East el 7 de septiembre. En ella se observa una extensa masa de humo sobre Brasil, producto de incendios forestales en la región Amazónica [1].

Lo que distingue a los satélites GOES no es solo su capacidad tecnológica, sino su impacto en distintas disciplinas. Los datos que generan, de acceso libre y abierto, se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, que van desde la meteorología y la ciencia climática, hasta la gestión de desastres, la agricultura y la salud pública. La Figura 1.2 muestra el área de cobertura de ambos satélites. Debido a que Uruguay se encuentra dentro de la huella de GOES-East, la información del satélite es usada a diario por distintas instituciones y equipos de trabajo en el país. En concreto, es de vital importancia para las investigaciones del Laboratorio de Energía Solar (LES), de la Facultad de Ingeniería (FING), así como para las tareas del Instituto Uruguayo de Meteorología (Inumet).

Actualmente, hay tres formas principales de recibir la información generada por los satélites GOES: a través de Internet, utilizando servicios como Amazon Web Services (AWS), mediante retransmisiones satelitales, como GEONETCast (GNC), o recibéndola directamente a través de transmisiones de los propios satélites GOES. Esta última modalidad es más compleja desde el punto de vista técni-

Capítulo 1. Introducción

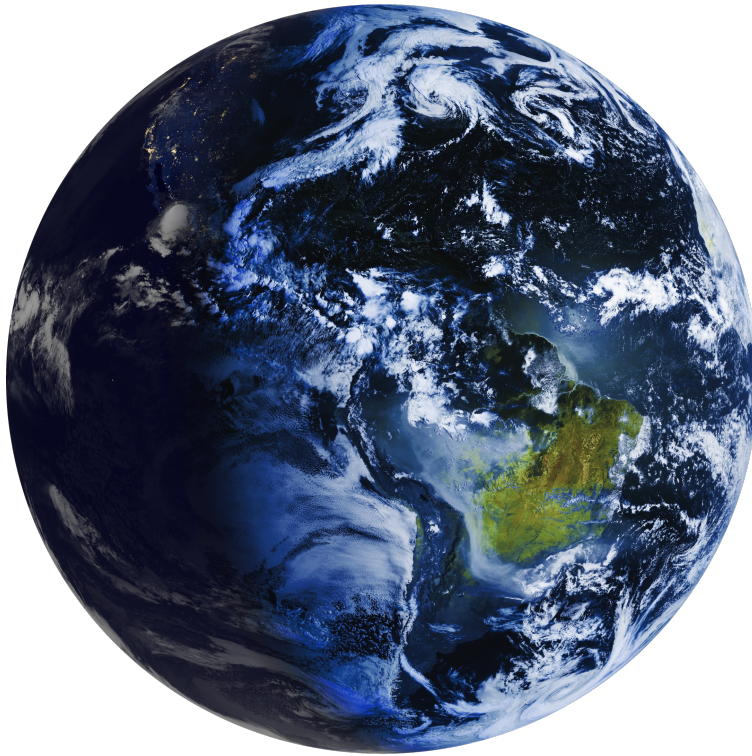


Figura 1.1: Imagen de disco completo de la Tierra. Capturada por el GOES-East el 7 de septiembre de 2024, utilizando uno de los sistemas diseñados en el proyecto en la azotea de la Facultad de Ingeniería.

co. Aun así, es la preferida por muchos sistemas de alerta temprana y agencias meteorológicas, ya que minimiza la latencia y garantiza un acceso autónomo e independiente de Internet y de servicios en la nube. Por estas razones, es utilizada por instituciones como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina [3], el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil [4], entre otras.

Actualmente, ni Inumet ni el LES cuentan con un sistema de recepción capaz de obtener directamente la información transmitida por el satélite GOES-East. En su lugar, acceden a la información a través de Internet. Esta dependencia a la conectividad representa una limitación crítica, especialmente durante fenómenos meteorológicos severos, cuando la información en tiempo real del GOES-East es clave para una respuesta rápida y efectiva. Es justamente en estas situaciones extremas cuando las redes de Internet suelen estar más vulnerables. Por ello, contar con un sistema autónomo de recepción directa se vuelve fundamental para garantizar el acceso ininterrumpido a los datos y reforzar la capacidad de respuesta ante eventos de alto impacto.

Para transmitir su información, los satélites GOES disponen de dos servicios: High Rate Information Transmission (HRIT) y GOES Rebroadcast (GRB). HRIT distribuye un subconjunto limitado de los datos, mientras que GRB retransmite todos, incluso con mayor resolución espacial. Este proyecto busca diseñar, documentar e implementar dos sistemas de recepción, uno para cada servicio del satélite.



Figura 1.2: Áreas de cobertura (conocidas como huellas o *footprints* en inglés) de los satélites GOES-West y GOES-East [2].

Debido a las características de la señal, la recepción de GRB requiere equipamiento más complejo, como una antena parabólica de aproximadamente 4,5 m de diámetro y un alimentador (o *feed* en inglés) de polarización doble circular.

Tradicionalmente, los sistemas de recepción satelital suelen involucrar dispositivos costosos y depender de software propietario para su procesamiento. La falta de flexibilidad y transparencia de estos programas puede representar un obstáculo significativo al momento de instalar y operar el sistema, impidiendo en muchos casos aprovechar plenamente las capacidades de los equipos. Considerando esto, los sistemas diseñados estarán basados en la tecnología de Radio Definida por Software (SDR) [5], una alternativa genérica a los sistemas de recepción satelital tradicionales. Para el procesamiento se usará SatDump [6], un programa gratuito y de código abierto que implementa sistemas de procesamiento para diversos servicios satelitales, incluyendo HRIT y GRB.

HRIT es el servicio más sencillo, siendo más accesible de recibir que GRB. No está orientado a instituciones meteorológicas, pues gran parte de la información capturada por GOES-East no es transmitida. En cambio, se presenta como un sistema de emergencia sencillo, pensado especialmente para zonas remotas sin conectividad. La señal tiene un ancho de banda de 1,2 MHz y puede ser recibida usando una antena de polarización lineal con una ganancia en el orden de los 20 dBi [7]. La posibilidad de poder recibirlo con un sistema barato y sencillo lo destaca como una gran opción para introducirse en la recepción satelital. En particular, puede ser una herramienta muy valiosa en contextos educativos, como para el curso de Talleres de Comunicaciones Inalámbricas [8], donde su implementación y puesta en marcha podría tener un gran valor didáctico.

Para la recepción de HRIT, se diseñó un sistema basado en un SDR de bajo costo y una antena Wi-Fi modificada, cuya frecuencia de operación fue ajustada

Capítulo 1. Introducción

a la del servicio. En la FING ya se contaba con los materiales necesarios para su implementación, en particular un SDR Adalm-Pluto [9] y una antena Wi-Fi en desuso. Fue necesario caracterizar la antena usando un Analizador de Redes Vectoriales (VNA) y adaptar su frecuencia de operación a la de HRIT, ya que difiere de la que se utiliza en Wi-Fi. Asimismo, dado que la antena entrega una señal balanceada y el SDR espera una entrada desbalanceada, se incorporó un balun (del inglés *balanced-unbalanced lines transformer*), encargado de realizar dicha conversión. El diseño se complementa con un amplificador de bajo ruido (LNA) y un filtro pasabanda, permitiendo mitigar interferencias externas y aumentar el nivel de la señal. El sistema, presentado en la Figura 1.3, se desarrolló en la azotea de la FING, donde ya se disponía del espacio para implementarlo. Este lugar había sido acondicionado previamente para el proyecto de grado *Construcción y Operación de Estación Terrena para el Seguimiento de Satélites* [10], el cual también se enfocó en la recepción de servicios satelitales mediante tecnología SDR, aunque orientado a satélites distintos del GOES.

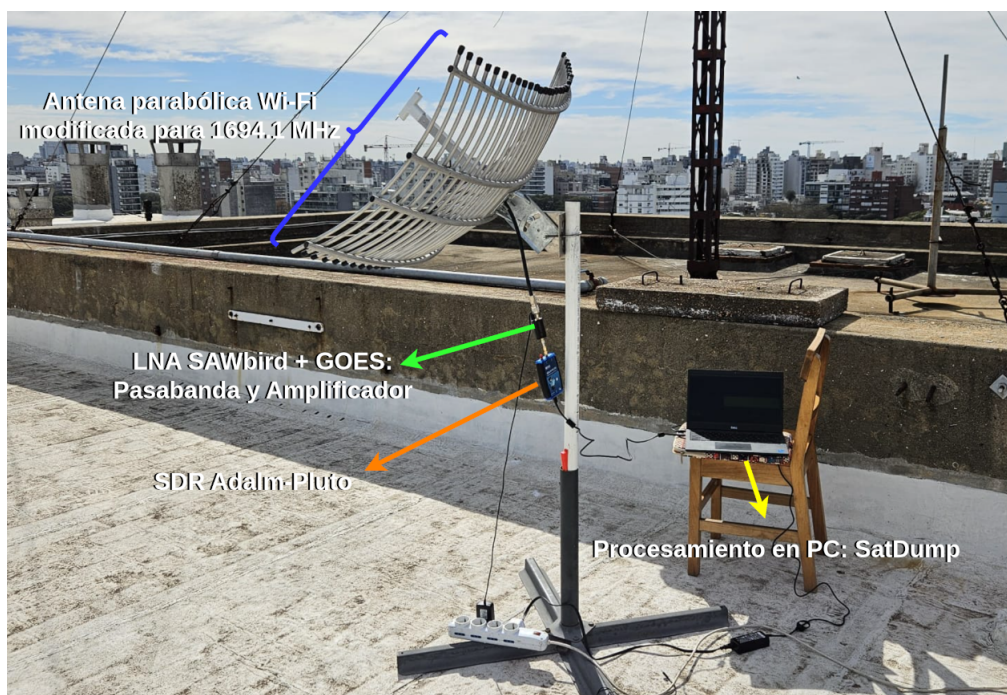


Figura 1.3: Sistema de recepción de HRIT implementado en la azotea de la FING.

La recepción de GRB es considerablemente más compleja que la de HRIT, requiriendo un sistema más sofisticado. Este es el servicio más importante del GOES y el objetivo principal del proyecto, ya que retransmite toda la información capturada por los instrumentos del satélite e imágenes con una resolución espacial más alta. Esta complejidad se ve reflejada en las características de la señal, pues tiene un ancho de banda de 10,9 MHz, requiere una parábola de 4,5 m [11] y es transmitida usando dos señales superpuestas con polarización circular izquierda (LHCP) y derecha (RHCP). En este tipo de polarización, el campo electromagnético rota

1.2. Objetivos

en sentidos opuestos y ortogonales. Por ello, es necesario utilizar una antena con un alimentador diseñado específicamente para polarización circular doble, el cual pueda separar ambas componentes y recibirlas simultáneamente. Conseguir un alimentador capaz de lograr esto representa un gran desafío, considerando que si la separación entre polarizaciones no es suficiente, se tendrá interferencia, imposibilitando la recepción.

Para la recepción de GRB, se diseñó un sistema basado en un SDR de gama alta, una antena parabólica de 3,9 m y un alimentador de polarización circular doble. Del equipamiento necesario, solo se disponía inicialmente del SDR, optando por utilizar el USRP B200mini [12]. Para obtener la antena y el alimentador, se estableció contacto con Inumet y Antel, instituciones que, además de mostrar interés en la recepción del servicio, podrían contar con el equipamiento requerido. Se concretó un préstamo con Antel para utilizar una antena parabólica fuera de servicio, de 3,9 m de diámetro, ubicada en la Estación Terrena en Manga [13]. Sin embargo, ninguna de las instituciones disponía de un alimentador con las características necesarias, por lo que fue necesario diseñar, construir y caracterizar uno propio. Esta etapa representó el mayor desafío técnico del proyecto, dado el rol crítico del alimentador en la correcta recepción del servicio. Tras una revisión de distintos diseños, se optó por un alimentador llamado septum feed, el cual se ajustaba a los requerimientos del sistema y podía ser construido con los materiales disponibles. A lo largo del proyecto, fue necesario realizar múltiples ajustes al alimentador para optimizar su desempeño. Para ello, se llevaron a cabo simulaciones, mediciones con el VNA y un análisis detallado de sus dimensiones más críticas. Finalmente, se logró construir una versión funcional capaz de recibir exitosamente ambas polarizaciones de GRB. Al igual que en el sistema para HRIT, se incorporó un LNA y un filtro pasabanda para mejorar la relación señal a ruido y mitigar interferencias externas. La implementación del sistema se llevó a cabo en la Estación Terrena en Manga, aprovechando la infraestructura existente y el valioso apoyo técnico del personal de la estación. Dicho sistema se presenta en la Figura 1.4.

1.2. Objetivos

Se plantean como objetivos de este proyecto el diseño, implementación y validación de sistemas de recepción de los servicios provistos por el satélite GOES-East: HRIT y GRB. Ambos sistemas se basan en el uso de tecnología SDR y el programa SatDump, lo que permite prescindir de equipamiento y software propietario, brindando así mayor flexibilidad para configurar y adaptar el sistema a fin de garantizar su correcto funcionamiento.

Con respecto a la recepción de HRIT, el sistema debe ser capaz de lograr una recepción confiable de todos los productos que este servicio provee. En concreto, se deben poder recibir las imágenes de la superficie terrestre, las alertas y pronósticos generados por el EMWIN (Emergency Managers Weather Information), y los datos de las estaciones meteorológicas transmitidos por el sistema GOES-DCS (GOES Data Collection System). Se buscó también mejorar el funcionamiento de la cadena de recepción, incluyendo los componentes de radiofrecuencia (antena, filtro, SDR)

Capítulo 1. Introducción

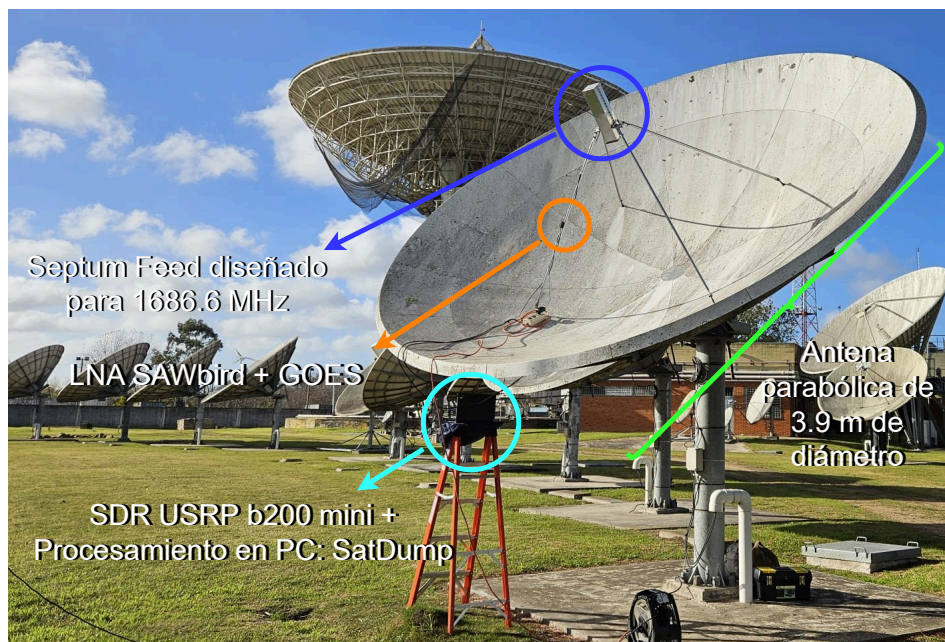


Figura 1.4: Sistema de recepción de GRB implementado en la Estación Terrena en Manga.

y luego el procesamiento de los datos en SatDump.

Sobre la recepción de GRB, el alimentador construido debe tener una separación entre polarizaciones suficiente como para permitir recibir correctamente las dos señales transmitidas. En particular, el sistema tiene que ser capaz de recibir las imágenes de la superficie terrestre disponibles en ambas polarizaciones, además de recibir las imágenes de la corona solar y los datos de las descargas eléctricas atmosféricas para la polarización RHCP. Se trabajó en optimizar el desempeño del sistema, aplicando mejoras al alimentador, ajustes en la configuración del SDR y modificaciones en la alimentación eléctrica del filtro y amplificador.

Con el fin de contribuir a la transparencia y comprensión del funcionamiento de cada uno, así como también al desarrollo de soluciones abiertas y accesibles, se documentó el proceso de implementación y configuración de cada sistema. Esta documentación no solo facilita el montaje de los diseños en otros entornos, sino que también permite su adaptación a distintas configuraciones de hardware o necesidades específicas. A diferencia de los sistemas propietarios, donde la falta de acceso a información técnica limita la capacidad de configuración y diagnóstico de problemas, el enfoque abierto empleado en este proyecto facilita la autonomía tecnológica y el aprendizaje colaborativo. En particular, el sistema de recepción de HRIT representa una valiosa herramienta educativa para introducir conceptos de sistemas de comunicaciones digitales, meteorología satelital y procesamiento de señales con SDR. Por otro lado, la capacidad de recepción del servicio GRB, por su volumen y nivel de complejidad, resulta especialmente útil para instituciones que requieran datos meteorológicos satelitales en tiempo real para fines operativos, de monitoreo ambiental o investigación científica, como es el caso de Inumet o el

LES.

1.3. Alcance

Se plantea recibir el conjunto completo de los datos transmitidos por ambos servicios del satélite, incluyendo todas las imágenes de la Tierra y los servicios adicionales que este provee. En condiciones meteorológicas favorables, se espera que los sistemas sean capaces de recibir de forma continua y estable HRIT y GRB.

Debido al volumen de información transmitida por GRB, el proyecto no tiene como objetivo almacenar ni archivar permanentemente los datos recibidos. De manera similar, no se contempla la implementación de un método para la distribución de la información del satélite. Todos los datos se almacenarán localmente en un disco duro.

Los sistemas implementados no están diseñados para ser permanentes. Debido a las condiciones del lugar y a la disponibilidad de materiales, los sistemas serán desmantelados al finalizar todas las actividades del proyecto. El diseño de sistemas fijos no forma parte de los objetivos; en cambio, el proyecto busca construir, implementar y validar ambos sistemas de recepción, sentando las bases para el desarrollo de una solución permanente en futuros trabajos.

1.4. Contenido

Este documento se separa en cuatro partes. En la primera, compuesta por los Capítulos 2 y 3, se presentan conceptos clave para el desarrollo del proyecto. El Capítulo 2 introduce conceptos importantes de las telecomunicaciones para el proyecto, tales como el funcionamiento de las antenas, la polarización de una onda electromagnética y de una antena, las líneas de transmisión, la relación de onda estacionaria y la utilización del VNA. Por otro lado, el Capítulo 3 introduce la tecnología SDR y SatDump, destacando el funcionamiento de ambos, el impacto de la comunidad de código abierto y las características de los equipos SDR utilizados.

La segunda, compuesta por el Capítulo 4, introduce las comunicaciones satelitales y presenta a GOES-East, el satélite a recibir, junto con sus dos servicios: HRIT y GRB. En este capítulo se comienza por introducir los conceptos básicos de las comunicaciones satelitales y su funcionamiento. Luego se presenta el satélite GOES-East, explicando los distintos niveles de productos satelitales provistos por el mismo y cómo se generan. Para terminar, se presentan HRIT y GRB, junto con la información transmitida por cada uno, los parámetros más relevantes y las especificaciones para su recepción.

La tercera, que contiene los Capítulos 5 y 6, presenta los sistemas de recepción implementados para ambos servicios, mostrando el diseño de cada sistema y los resultados obtenidos. El Capítulo 5 se enfoca en la recepción de HRIT, comenzando por presentar el sistema de recepción, el desempeño del sistema y la información recibida. El Capítulo 6 presenta la recepción de GRB, comenzando por introducir el sistema de recepción y sus requerimientos. Luego, se presenta el alimentador

Capítulo 1. Introducción

utilizado, junto con su diseño y simulaciones. Finalmente, se muestra el desempeño del sistema de recepción junto con la información recibida del servicio.

En la cuarta, compuesta por el Capítulo 7, se presentan las conclusiones del proyecto, en donde se evalúan los resultados. Se inicia con una revisión del cumplimiento de los objetivos establecidos, seguida de una reflexión general sobre el desarrollo del proyecto. Finalmente, se proponen posibles líneas de trabajo a futuro que puedan continuar y ampliar las bases sentadas por este proyecto.

Capítulo 2

Fundamentos de Radiofrecuencia para Telecomunicaciones

A continuación se presentarán conceptos teóricos a partir de los cuales se puede explicar el funcionamiento de los sistemas de comunicaciones satelitales. En este capítulo se detallan conceptos y características de los sistemas que emplean antenas, así como también de las líneas de transmisión, que son los dispositivos encargados de transportar la señal recibida por la antena hasta el receptor. El contenido de este capítulo toma como referencia el material del curso de grado Antenas y Propagación de la FING [14], así como también el material de Comunicaciones Inalámbricas del curso Tecnologías de Internet de las Cosas de la FING [15].

2.1. Antenas

Una antena es un dispositivo que convierte ondas electromagnéticas en señales eléctricas (o viceversa) para recibir o transmitir información. Conocer los parámetros que caracterizan el funcionamiento de una antena es un punto importante en el diseño de sistemas de radiofrecuencia, ya que permite conocer su desempeño y garantizar el correcto funcionamiento del sistema en el que se utilice [15].

2.1.1. Ganancia

La ganancia de una antena es la cantidad de potencia por ángulo sólido que la misma puede concentrar o dirigir en una dirección dada, en relación a una antena que lo haga de forma isotrópica, la cual radia uniformemente en todas las direcciones. Se representa con la forma $G(\theta, \phi)$, donde θ y ϕ son los ángulos de elevación y acimut. Se puede expresar de acuerdo a la siguiente ecuación [14]:

$$G(\theta, \phi) = \frac{\text{Intensidad de radiación por ángulo sólido}}{\frac{\text{Potencia (aceptada) de entrada total}}{4\pi}} = 4\pi \cdot \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}. \quad (2.1)$$

Capítulo 2. Fundamentos de Radiofrecuencia para Telecomunicaciones

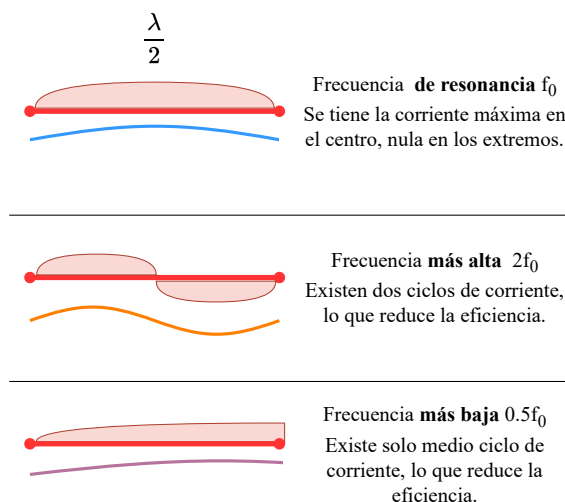


Figura 2.1: Diagrama que muestra el comportamiento de una antena dipolo cuando recibe ondas con distintas frecuencias.

En caso de que no se especifique la dirección, se considera la dirección de máxima ganancia de la antena. Para la Ecuación (2.1), la ganancia toma la unidad de dBi, donde la *i* hace referencia a la antena isotrópica utilizada como referencia en la comparación. Para cumplir con los objetivos planteados en este proyecto, resulta necesario que las antenas tengan una ganancia suficiente para la recepción de señales satelitales, ya que éstas se ven considerablemente atenuadas debido a la extensa distancia que deben recorrer entre el satélite y la Tierra.

2.1.2. Ancho de Banda

Las señales transmitidas por el satélite GOES-East, en particular las del servicio GRB, presentan un ancho de banda de unos 10,9 MHz. Por lo tanto, resulta necesario utilizar una antena que tenga un desempeño adecuado en todas las frecuencias dentro del ancho de banda de la señal de GRB. El ancho de banda de una antena describe el rango de frecuencia sobre el cual puede radiar o recibir energía de forma adecuada. En la Figura 2.1 se muestra el comportamiento del dipolo, un tipo de antena sencilla. El dipolo está formado por dos elementos conductores de igual longitud y, como se observa en dicha figura, su longitud está directamente relacionada con la frecuencia de la onda que reciben.

El caso ideal es cuando la longitud total del dipolo es $\frac{\lambda}{2}$, donde λ es la longitud de onda de la onda incidente. Esta condición corresponde a la frecuencia de resonancia del dipolo. Cuando esta relación no se cumple, la corriente inducida sobre los elementos conductores del dipolo se ve afectada, lo que provoca una desadaptación de la impedancia y reduce la eficiencia del sistema. Para evaluar esta desadaptación, se define la Relación de Onda Estacionaria de Voltaje (VSWR, por su sigla en inglés) que se relaciona con la cantidad de energía reflejada hacia la fuente como consecuencia de una desadaptación de impedancia entre la antena

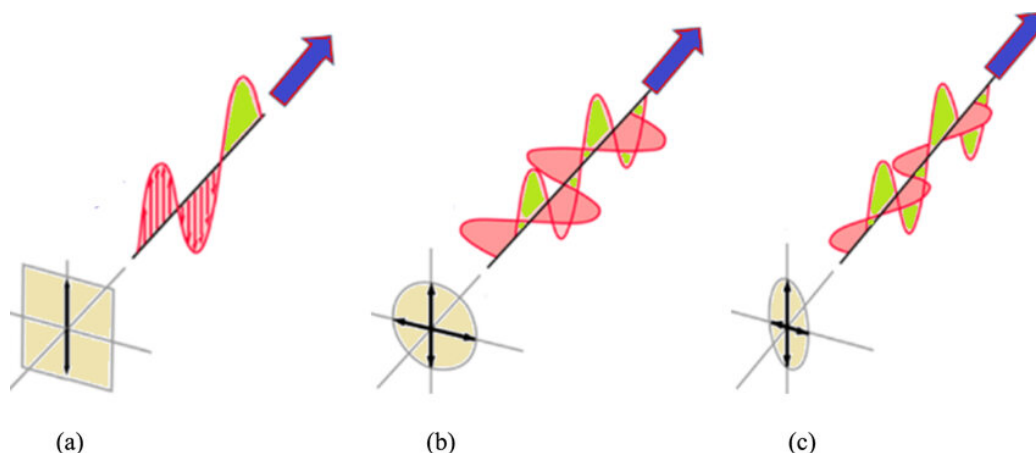


Figura 2.2: Tipos de polarización que puede tener una onda [16]. a) Polarización lineal. b) Polarización circular. c) Polarización elíptica. En verde se muestra el componente vertical del campo y en rojo el horizontal.

y la línea de transmisión. De esta manera, el ancho de banda de una antena se define como el rango de frecuencias en el cual el VSWR se mantiene por debajo de un valor especificado. Fuera de este rango, las pérdidas por reflexión se vuelven significativas y el rendimiento del sistema se degrada considerablemente. Por esta razón, el diseño de antenas para aplicaciones de banda ancha, como la recepción de GRB, requiere dispositivos cuyo desempeño sea adecuado en todo el espectro de interés.

2.1.3. Polarización

Otro punto relevante para considerar es la polarización de la antena. En caso de que la antena utilizada no pueda modificarse para la polarización de la onda a recibir (circular en el caso de GRB y vertical en el caso de HRIT), la antena no podrá captar la mayor potencia posible y el desempeño del sistema no será el adecuado. La polarización de una antena está dada por la polarización de la onda que esta transmite o recibe. Los distintos tipos de polarización se definen según el comportamiento del campo electromagnético de la onda que se propaga en el espacio. Se suele considerar la orientación del campo eléctrico de la onda para definir su tipo de polarización. La polarización de una onda puede ser de tipo lineal, circular o elíptica, como se puede apreciar en la Figura 2.2. La polarización circular y la elíptica pueden ser en sentido horario o antihorario; el primero se conoce como derecho (RHCP en inglés) y al segundo como izquierdo (LHCP en inglés). Por otro lado, la polarización lineal puede ser vertical (V) u horizontal (H). En estos casos, es posible que la señal presente una leve desviación (*offset*) respecto al eje de polarización. Por ello, es necesario ajustar la inclinación de la antena para que coincida con la dirección de la señal y así obtener la mayor ganancia posible.

Cuando se trata de una polarización lineal, la expresión del campo eléctrico

Capítulo 2. Fundamentos de Radiofrecuencia para Telecomunicaciones

toma una forma semejante a la detallada en la siguiente ecuación:

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos(kx - \omega t) \cdot \hat{x}. \quad (2.2)$$

Donde k representa el número de onda expresado en rad/m, que indica la cantidad de períodos que completa la onda por unidad de longitud. Por su parte, ω representa la frecuencia angular de la onda expresada en rad/s, lo que indica qué tan rápido oscila la onda en el tiempo.

En el caso de polarización circular, el campo eléctrico adopta la siguiente forma para las señales RHCP y LHCP:

$$\vec{E}_{RHCP}(x, t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} [\cos(kx - \omega t) \cdot \hat{x} + \sin(kx - \omega t) \cdot \hat{y}]. \quad (2.3)$$

$$\vec{E}_{LHCP}(x, t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} [\cos(kx - \omega t) \cdot \hat{x} - \sin(kx - \omega t) \cdot \hat{y}]. \quad (2.4)$$

Se habla de desadaptación de polarización cuando la polarización de la antena no coincide exactamente con la polarización de la onda incidente. Esta desadaptación hace que la potencia que se puede extraer de la señal incidente no sea la máxima posible [14]. HRIT emplea polarización vertical y fue recibido utilizando una antena dipolo orientada verticalmente. Si la misma antena se colocara en forma horizontal, la potencia recibida sería mínima, ya que se tendría una desadaptación total de polarización entre la antena y la onda transmitida por el satélite.

2.2. Líneas de Transmisión

Una vez que se cuenta con una antena capaz de recibir la onda transmitida por el satélite y convertirla en energía eléctrica con una potencia adecuada, es necesario transportar esta energía hasta el receptor, procurando minimizar las pérdidas durante el proceso. Las líneas de transmisión son estructuras diseñadas para transportar energía electromagnética desde un punto a otro. Las más comunes incluyen cables coaxiales, que constan de un conductor central aislado y rodeado por una malla conductora, o guías de onda, que son tubos metálicos huecos que propagan ondas electromagnéticas. Un diagrama general de las mismas puede apreciarse en la Figura 2.3, en donde se introducen los siguientes parámetros:

- R : Resistencia combinada de los conductores por unidad de longitud, expresada en $\Omega \text{ m}^{-1}$.
- L : Inductancia debida al área encerrada por la corriente que circula por los conductores por unidad de longitud, se expresa en H m^{-1} .
- G : Conductancia del medio dieléctrico por unidad de longitud, expresada en S m^{-1} .
- C : Capacidad del dieléctrico, debido a la diferencia de tensión de los conductores, por unidad de longitud. Se expresa en F m^{-1} .

2.2. Líneas de Transmisión

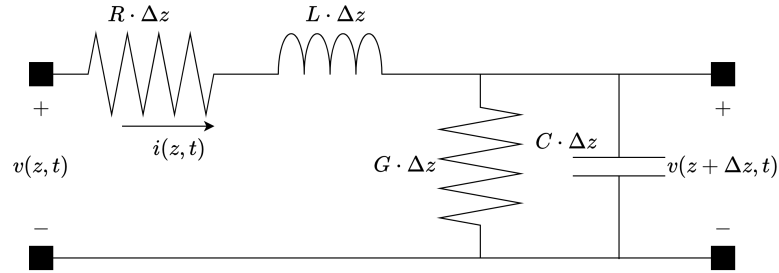


Figura 2.3: Diagrama de una línea de transmisión.

Estos parámetros son presentados en forma diferencial, es decir, en función de la longitud de la línea de transmisión, Δz . Esto se denomina modelo diferencial de línea de transmisión. Para poder utilizarlo, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- La longitud de la línea es comparable con la longitud de la onda viajera.
- La señal es de frecuencia suficientemente alta.
- Los parámetros de la línea son uniformes.

2.2.1. Impedancia Característica

La impedancia característica de una línea es un número complejo que representa la relación de proporcionalidad entre la tensión y la corriente de la onda incidente en la línea (la que se dibuja con verde en la Figura 2.4). Se deduce aplicando las leyes de Kirchhoff al modelo diferencial de la línea de transmisión (el de la Figura 2.3). Se denomina Z_0 y está dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (2.5)$$

En el caso de que se trabaje con frecuencias lo suficientemente altas o se tengan bajas pérdidas, la impedancia característica es real y toma el siguiente valor:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.6)$$

2.2.2. Coeficiente de Reflexión

En la Figura 2.4 se puede apreciar el diagrama general de una línea de transmisión. En él, V_s representa una fuente de voltaje, los segmentos simbolizan una línea de transmisión con impedancia característica Z_0 , y Z_L corresponde a la impedancia de carga de la línea. Se le denomina onda incidente a aquella que viaja desde la fuente hacia la carga, y reflejada a la que viaja en el sentido contrario.

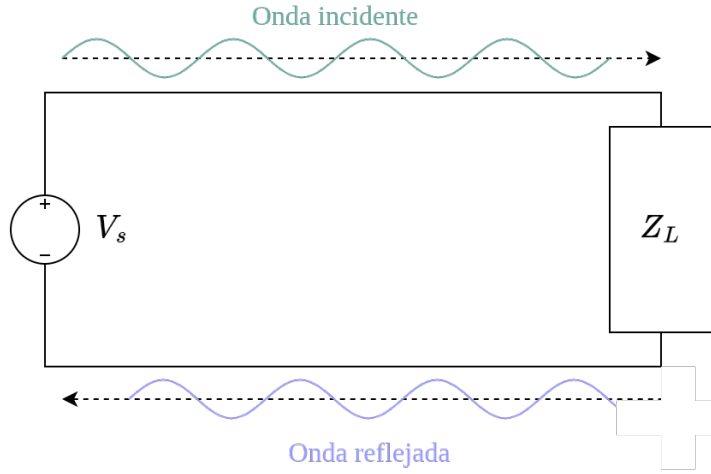


Figura 2.4: Diagrama general de una línea de transmisión.

Ambas se presentan en la Figura 2.4. Considerando estas ondas, se puede definir el coeficiente de reflexión, en la carga, Γ como la razón entre las dos. Este coeficiente se expresa como:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}. \quad (2.7)$$

Resulta importante resaltar que en el caso donde $Z_L = Z_0$ el coeficiente es nulo, lo que significa que no existe onda reflejada. En ese caso se dice que la línea está adaptada.

2.2.3. Relación de Onda Estacionaria de Voltaje (VSWR)

Se define la relación de onda estacionaria de voltaje como:¹

$$VSWR = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (2.8)$$

En donde V_{max} y V_{min} corresponden al máximo y al mínimo valor del voltaje en la línea de transmisión, considerando los efectos tanto de la onda incidente como de la reflejada. El caso en donde la impedancia de carga es capaz de consumir toda la potencia transmitida se tiene que $Z_L = Z_0$, por lo que no hay onda reflejada y $\Gamma = 0$. En este caso se dice que la línea está adaptada y se cumple que $VSWR = 1$.

¹Para esta definición se considera el modelo de línea de transmisión con bajas pérdidas.

2.3. Parámetros S y Analizador de Redes Vectoriales



Figura 2.5: VNA del mismo modelo que el disponible en la FING.

2.3. Parámetros S y Analizador de Redes Vectoriales

Para evaluar un sistema compuesto por una antena y una línea de transmisión, y asegurar así el correcto funcionamiento del receptor, es necesario medir las magnitudes antes mencionadas. De esta forma, se puede conocer y por lo tanto, mejorar el desempeño del sistema. Un instrumento capaz de determinar estas magnitudes con sistemas de prueba es el VNA. El mismo mide los parámetros S del sistema que se esté probando. Los parámetros S o parámetros de dispersión se utilizan para caracterizar sistemas de radiofrecuencia. En lugar de trabajar con voltajes y corrientes, como en baja frecuencia, se utilizan ondas de voltaje (entrantes y salientes) en cada puerto. Estos puertos se suelen denominar 1 y 2, dando lugar a los parámetros S: S_{11} , S_{12} , S_{21} y S_{22} . Los casos donde $i = j$ (S_{11} y S_{22}) indican cuánta potencia es reflejada por el puerto en cuestión, lo que es la misma magnitud que se definió antes como Γ .

El Laboratorio de Microelectrónica del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería cuenta con un VNA Rohde & Schwarz ZVB 8 [17] capaz de operar entre 300 kHz y 8 GHz [18]. Una foto de un equipo del mismo modelo puede verse en la Figura 2.5.

El mismo fue utilizado durante el proyecto para la caracterización y ajuste del dipolo en el sistema de HRIT así como en el ajuste de la longitud de los probes del septum feed en el sistema de GRB.

2.4. Cálculo del Margen de Enlace

A la hora de evaluar el desempeño de un sistema de comunicaciones inalámbrico, el margen de enlace es una medida esencial que nos permite determinar si el sistema será capaz de operar satisfactoriamente bajo condiciones variables. El

Capítulo 2. Fundamentos de Radiofrecuencia para Telecomunicaciones

margen de enlace representa la diferencia entre la potencia de señal recibida y la potencia mínima necesaria para mantener una comunicación confiable, constituyendo uno de los parámetros más críticos en el diseño de sistemas de comunicaciones satelitales. Este margen debe ser suficientemente alto para compensar las variaciones en las condiciones de propagación, degradaciones atmosféricas, desapuntamiento de antenas y otros factores que pueden afectar la calidad del enlace. Un margen inadecuado puede resultar en pérdida de recepción. Por lo tanto, el cálculo del margen de enlace es fundamental para garantizar la disponibilidad del servicio y optimizar el rendimiento del sistema de recepción satelital.

2.4.1. Cálculo de Enlace para Recepción Satelital

El análisis del enlace de recepción satelital permite determinar si la señal transmitida será recibida con la calidad suficiente para una comunicación exitosa. El margen de enlace de recepción suele expresarse de la forma C/N , donde C representa la potencia recibida y N la potencia del ruido. Esta relación mide cuánto nivel de señal se tiene sobre el nivel de ruido del sistema. La potencia del ruido se calcula multiplicando el ancho de banda de la señal (B) por la densidad espectral de ruido (N_0). Por otro lado, la densidad espectral de ruido se expresa de la forma: $N_0 = kT$ donde k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura de ruido del sistema. Al dividir la potencia recibida por estos términos se obtiene la expresión para el margen de enlace (C/N). La expresión para el cálculo de enlace de recepción satelital se detalla en la Ecuación 2.9.

$$C/N_{dB} = EIRP_{dBm} - L_{dB} + G/T_{dBK^{-1}} - 10 \log(k)_{dB} - 10 \log(B)_{dBHz} \quad (2.9)$$

En esta ecuación, se consideran los siguientes elementos:

- **EIRP**: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente, caracteriza las propiedades del transmisor, en este caso las del satélite GOES-East.
- **L**: Representa las pérdidas por propagación en el espacio libre y en la atmósfera.
- **G**: Ganancia del sistema receptor.
- **T**: Temperatura de Ruido del sistema receptor.
- **B**: Ancho de banda de la señal a recibir.
- **k**: Constante de Boltzmann.

2.4.2. Expresión Completa para el Cálculo de Enlace para Recepción Satelital

La expresión considerada para el cálculo de enlace se extrae del libro *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technologies* [19]. La misma es la que se da en la ecuación 2.10.

2.4. Cálculo del Margen de Enlace

$$C/N = \frac{\overbrace{\left(\frac{P_{Tx} G_{T_{max}}}{L_T L_{FTx}} \right)}^{\text{EIRP del transmisor}} \cdot \overbrace{\left(\frac{1}{L_{FS} L_A} \right)}^{\text{Pérdidas de propagación}} \cdot \overbrace{\left(\frac{G_{R_{max}}}{L_R L_{FRx} L_{Pol}} \right)}^{\text{Ganancia completa del receptor}}}{\underbrace{\left(\frac{T_A}{L_{FRx}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRx}} \right) + T_{eRx} \right) \cdot \left(\frac{1}{k} \right) \cdot B}_{\text{Potencia total de ruido}}} \quad (2.10)$$

Los términos aquí utilizados son:

- **EIRP del transmisor:** Caracteriza las propiedades del transmisor; en el caso del proyecto, se trata del propio satélite.
 - P_{Tx} : Es la potencia de transmisión.
 - $G_{T_{max}}$: Es la potencia máxima de la antena transmisora.
 - L_T : Es la pérdida de potencia de la antena transmisora por desalineamiento.
 - L_{FTx} : Representa las pérdidas entre el amplificador del transmisor y la antena transmisora.
- **Pérdidas de propagación:** Caracteriza las pérdidas por el medio de transmisión.
 - L_{FS} : Representa las pérdidas por propagación en el espacio libre. Se expresa de acuerdo a la Fórmula de Friis, detallada en la Ecuación 2.11.²
 - L_A : Representa las pérdidas por la propagación en la atmósfera.
- **Ganancia completa del receptor:** Caracteriza las propiedades del receptor.
 - $G_{R_{max}}$: La ganancia máxima de la antena receptora.
 - L_R : Representa la pérdida de potencia por desalineamiento de la antena receptora.
 - L_{FRx} : Representa la pérdida de potencia entre la antena receptora y el receptor.
 - L_{POL} : Representa la pérdida de potencia por la desadaptación de polarización entre la antena receptora y la transmisora.

²La distancia considerada en este cálculo es la que hay entre el satélite y la estación donde esté la antena. La altitud del satélite GOES-East es de 35 784 km y la distancia hasta una estación en Uruguay es, en promedio, de 37 441 km. El cálculo se realizó en base a la sección 2.4 del libro *Satellite Communications Systems Engineering* [20].

Capítulo 2. Fundamentos de Radiofrecuencia para Telecomunicaciones

Potencia total de ruido: Representa la cantidad de ruido presente en el ancho de banda de recepción. Se calcula multiplicando la densidad espectral de potencia de ruido por el ancho de banda de la señal.

- T_A : Es la temperatura de ruido de la antena receptora.
- T_F : Es la temperatura termodinámica del feed de la antena.
- T_{eRx} : Es la temperatura de ruido efectiva en la entrada del receptor.
- B : Ancho de banda de la señal transmitida.

$$\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (2.11)$$

2.4.3. Estimación de la Temperatura de Ruido del Sistema

El cálculo de la potencia total de ruido en el sistema se calcula de la forma que se expresa en la Ecuación 2.12.

$$N = k \cdot T \cdot B \quad (2.12)$$

En la ecuación, T representa la temperatura del ruido del sistema, cuya expresión se calcula de acuerdo a la Ecuación 2.10. B representa el ancho de banda de la señal y k es la constante de Boltzmann, que toma el valor de $1,380649 \cdot 10^{-23} J/K$. Tanto en el sistema de recepción de HRIT como en el de GRB se utilizó el mismo modelo de LNA, cuya figura de ruido es de 1,2 dB. Esta magnitud indica cuánto empeora la relación señal a ruido un dispositivo comparado con un sistema ideal, es decir, el ruido adicional que el dispositivo introduce en la señal recibida. Además, se consideran los siguientes parámetros:

- T_A : Temperatura de ruido de la antena. De acuerdo a la elevación requerida para recibir GOES-East en Uruguay, que es de $44,7^\circ$, estimada en 25 K [19].
- T_F : Temperatura termodinámica de feed de la antena. Se estima en 290,7 K (aproximadamente $17,5^\circ C$) que es la temperatura promedio de Uruguay [21].
- L_{FRx} : Pérdidas entre antena receptora y el receptor. Se estiman estas pérdidas en 0,5 dB para el caso de HIRT y de 3 dB en el caso de GRB.
- T_{eRx} : Temperatura de ruido efectiva en la entrada del receptor. Toma el valor de 93 K. Su cálculo se muestra en la Ecuación 2.13. NF es la Figura de Ruido del LNA utilizado.

$$T_{eRx} = \left(10^{\frac{NF}{10}} - 1\right) T_F = \left(10^{\frac{1,2}{10}} - 1\right) 290,7 \text{ K} = 93 \text{ K} \quad (2.13)$$

Por lo tanto, podemos estimar la temperatura de ruido del sistema en la Ecuación 2.14 [19].

2.4. Cálculo del Margen de Enlace

$$T = \frac{T_A}{L_{FRx}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRx}} \right) + T_{eRx} \quad (2.14)$$

De esta ecuación se obtienen los valores:

- $T_{HRIT} = 146,4 \text{ K}$.
- $T_{GRB} = 250,5 \text{ K}$.

Entonces, aplicando la Ecuación 2.12 para el caso de HRIT, $B = 1,205 \text{ MHz}$, obtenemos una potencia de ruido de $-116,13 \text{ dBm}$. Y para el caso de GRB, donde $B = 10,9 \text{ MHz}$, obtenemos una potencia de ruido de $-104,2 \text{ dBm}$.

Habiendo establecido los fundamentos de radiofrecuencia necesarios para el desarrollo del proyecto, en el siguiente capítulo se presentará la Radio Definida por Software (SDR). Entender qué es y cómo funciona es fundamental para avanzar en las etapas siguientes del proyecto.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Introducción a la Radio Definida por Software (SDR)

Tradicionalmente, los equipos utilizados para la recepción y transmisión de señales de radio han sido muy costosos y diseñados para funciones específicas. Esto ha limitado su uso, en la mayoría de los casos, a grandes empresas u organizaciones con los recursos necesarios para adquirir, mantener y operar estos sistemas. El software tampoco escapa a esta realidad, ya que muchos de estos dispositivos utilizan tecnología propietaria y requieren licencias. Además, en varios casos, estos programas son antiguos y presentan problemas de compatibilidad con equipos modernos.

Desde hace algunos años, impulsadas en gran medida por la comunidad de radioaficionados, han surgido alternativas más accesibles frente a las soluciones tradicionales. Esta sección busca introducir una de estas alternativas, la cual fue indispensable para el desarrollo del proyecto: la Radio Definida por Software (SDR). La tecnología SDR fue utilizada extensamente en todas las etapas del trabajo, por lo que conocer su funcionamiento y características resulta clave para comprender en profundidad los sistemas de recepción implementados.

3.1. Fundamentos de la Radio Definida por Software

Los SDR surgieron como una respuesta a la rigidez de las tecnologías tradicionales empleadas para la recepción y transmisión de señales de radio, las cuales dependían por completo de componentes físicos. Estos dispositivos implementan mediante software funciones que, tradicionalmente, se realizaban por medio de hardware, como filtros, demoduladores, entre otros. De este modo, proporcionan una base flexible que puede ser programada para distintas aplicaciones. Generalmente, los SDR se utilizan en combinación con una computadora, aunque existe una amplia variedad de modelos programables que permiten su funcionamiento de manera autónoma.

Los avances en la capacidad de procesamiento computacional, junto con el abaratamiento de los componentes electrónicos, han contribuido a popularizar el

Capítulo 3. Introducción a la Radio Definida por Software (SDR)

uso de los SDR. Así, los SDR posibilitan el manejo de señales de radio a un costo económico considerablemente menor, lo que los ha hecho especialmente atractivos para la implementación de sistemas de recepción de bajo presupuesto.

3.1.1. Funcionamiento de los SDR

Los SDR se encargan de recibir o transmitir señales de radio y convertirlas en señales digitales que el software puede procesar. Por lo tanto, el SDR transforma una señal continua (presente en el mundo real) a muestras discretas (presentes en el mundo digital). De manera simplificada, puede pensarse a un SDR como un conversor analógico-digital (ADC) o digital-analógico (DAC), según se trate de la recepción o la transmisión de una señal [22]. La Figura 3.1 presenta, de manera muy simplificada, el funcionamiento de un SDR.

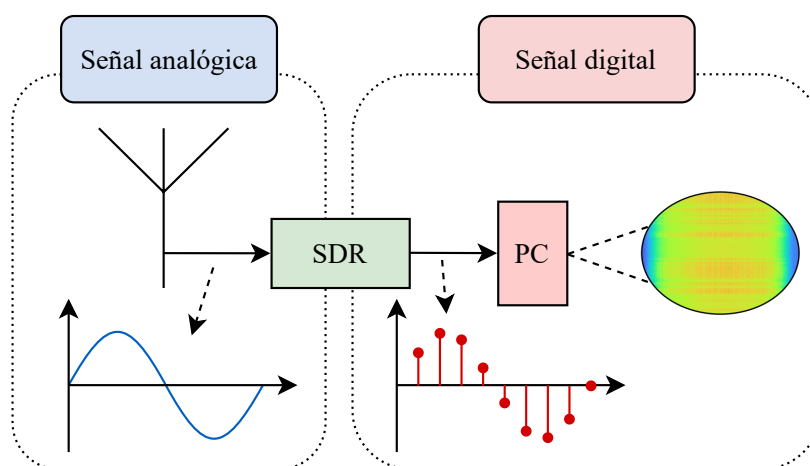


Figura 3.1: Funcionamiento simplificado de un SDR.

Una vez establecido qué hace el SDR, hay que estudiar cómo lo hace. Debido a que en este proyecto solo se trabaja con la recepción de señales, únicamente se presentará el funcionamiento de un SDR en recepción.¹ Para esto, consideremos una señal pasabanda denominada $s(t)$ de ancho de banda limitado BW centrada en la frecuencia f_c , donde $BW \ll f_c$. Siendo más concretos, consideremos un servicio satelital ubicado en 1,7 GHz y con un ancho de banda de 1 MHz. El espectro de la señal $S(f)$ se presenta en la Figura 3.2. Considerando que nos interesa obtener las muestras de la señal, la respuesta inmediata es muestrear la señal usando un ADC. Para esto, y según el teorema de Nyquist, deberíamos muestrear la señal al doble de la frecuencia de la misma. Por lo tanto, necesitaríamos un ADC capaz de muestrear a una tasa de $2 \times 1,7 \text{ GHz} = 3,4 \text{ GHz}$. A pesar de que existen ADC capaces de muestrear a esa velocidad, digitalizar la señal recibida sin modificar

¹El funcionamiento en transmisión es análogo al de recepción.

3.1. Fundamentos de la Radio Definida por Software

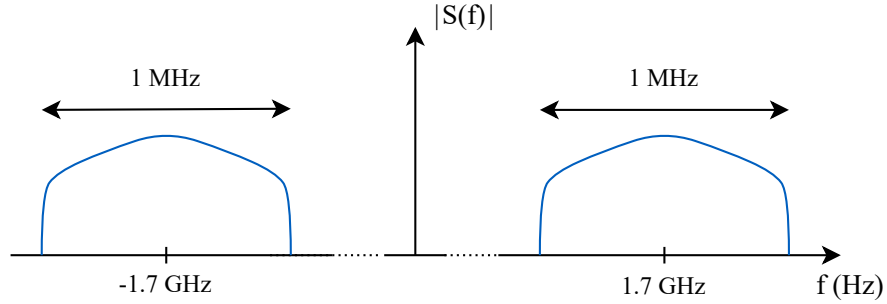


Figura 3.2: Espectro de una señal pasabanda.

no es una buena idea. Especialmente considerando que la señal tiene un ancho de banda de órdenes de magnitud menor.

Para solucionar este problema, nos gustaría bajar la frecuencia de la señal, lo que se traduce a trabajar con la señal en bandabase. La Figura 3.3 presenta el espectro de la señal de interés en bandabase, denominada $S_b(f)$. De esta forma, la velocidad a la cual el ADC tendrá que muestrear la señal queda definida por el ancho de banda de la misma y no la frecuencia a la cual fue transmitida.

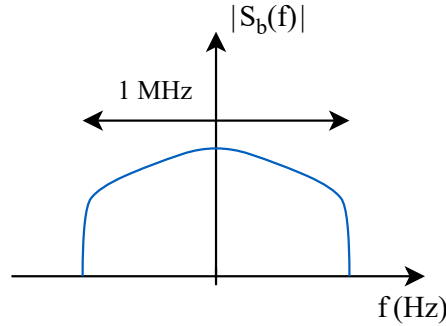


Figura 3.3: Espectro de la señal estudiada en bandabase.

Considerando que la señal bandabase es la que nos interesa, podemos expresar la señal pasabanda en función de $S_b(f)$. Para esto, debemos definir primero la expresión de la señal pasabanda, donde el $\sqrt{2}$ normaliza la potencia de la señal:

$$S_b(f) = \begin{cases} \sqrt{2}S(f + f_c) & \text{si } f \leq |f_c| \\ 0 & \text{si } f > |f_c| \end{cases}. \quad (3.1)$$

Es importante destacar que esta ecuación resulta en una señal $s_b(t)$ compleja con una componente imaginaria no necesariamente nula. Esto puede resultar contra-

Capítulo 3. Introducción a la Radio Definida por Software (SDR)

dictorio, pues estamos trabajando con señales puramente reales. De todas formas, al encontrar la expresión de $S_b(f)$ se podrá verificar que la señal $s(t)$ sigue siendo real.

De esta forma, la señal pasabanda está compuesta por la señal bandabase ubicada en la frecuencia f_c y por su conjugado ubicado en $-f_c$. Lo que resulta en la siguiente expresión:

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2}}S_b(f - f_c) + \frac{1}{\sqrt{2}}S_b^*(-(f + f_c)). \quad (3.2)$$

Para pasar la señal al dominio del tiempo debemos anti-transformar. Recordando que $\mathcal{F}^{-1}\{X(f - f_0)\} = x(t)e^{j2\pi f_0 t}$, que $\mathcal{F}^{-1}\{X^*(-f)\} = x^*(t)$ y que para los números complejos $z + z^* = 2\text{Re}(z)$, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}}s_b(t)e^{j2\pi f_c t} + \frac{1}{\sqrt{2}}s_b^*(t)e^{-j2\pi f_c t} \\ \implies s(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}}2\text{Re}\left\{s_b(t)e^{j2\pi f_c t}\right\}. \end{aligned}$$

La última expresión, a pesar de estar compuesta por $s_b(t)$ (que tiene una componente imaginaria), es puramente real. Esto coincide con lo esperado, pues estamos trabajando con señales reales. Para terminar con el desarrollo, se reemplaza la exponencial según la fórmula de Euler $e^{jt} = \cos(x) + j\sin(x)$, lo que resulta en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} s(t) &= \sqrt{2}\text{Re}\{s_b(t)(\cos(2\pi f_c t) + j\sin(2\pi f_c t))\} \\ \implies s(t) &= \sqrt{2}[\text{Re}\{s_b(t)\}(\cos(2\pi f_c t) - \text{Im}\{s_b(t)\}\sin(2\pi f_c t))]. \end{aligned}$$

Para recuperar la señal bandabase $s_b(t)$, debemos obtener las componentes reales e imaginarias de la señal. Para obtener la parte real debemos multiplicar la señal por un coseno. Recordando algunas identidades trigonométricas y multiplicando ambas partes por $\sqrt{2}$, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} s(t)\sqrt{2}\cos(2\pi f_c t) &= \text{Re}\{s_b(t)\}\underbrace{2\cos^2(2\pi f_c t)}_{1+\cos(2\pi 2f_c t)} - \text{Im}\{s_b(t)\}\underbrace{2\sin(2\pi f_c t)\cos(2\pi f_c t)}_{\sin(2\pi 2f_c t)} \\ \implies s(t)\sqrt{2}\cos(2\pi f_c t) &= \text{Re}\{s_b(t)\}(1 + \cos(2\pi 2f_c t)) - \text{Im}\{s_b(t)\}\sin(2\pi 2f_c t). \end{aligned}$$

La parte imaginaria se obtiene multiplicando la señal por un seno:

$$\begin{aligned} s(t)\sqrt{2}\sin(2\pi f_c t) &= \text{Re}\{s_b(t)\}\underbrace{2\cos(2\pi f_c t)\sin(2\pi f_c t)}_{\sin(2\pi 2f_c t)} - \text{Im}\{s_b(t)\}\underbrace{2\sin^2(2\pi f_c t)}_{1-\cos(2\pi 2f_c t)} \\ \implies s(t)\sqrt{2}\sin(2\pi f_c t) &= \text{Re}\{s_b(t)\}\sin(2\pi 2f_c t) - \text{Im}\{s_b(t)\}(1 - \cos(2\pi 2f_c t)). \end{aligned}$$

De esta forma, aplicando un filtro pasabajos con frecuencia de corte el ancho de banda de la señal BW , podemos eliminar las componentes ubicadas en la frecuencia $2f_c$ y recuperar la parte real e imaginaria de $s_b(t)$ (también llamadas componentes

3.1. Fundamentos de la Radio Definida por Software

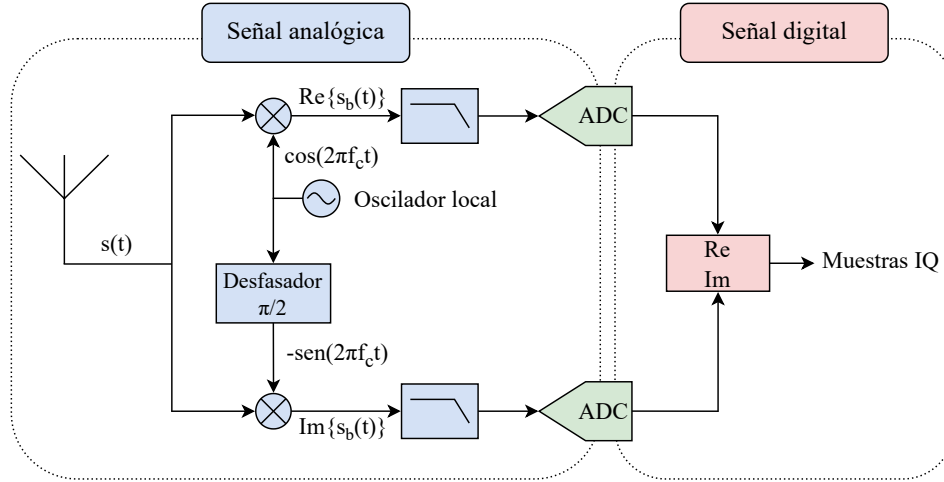


Figura 3.4: Diagrama de un sistema de recepción IQ.

en fase y cuadratura o I y Q, de *In-phase* y *Quadrature*). Un diagrama del sistema de recepción se presenta en la Figura 3.4.

Como se puede ver en la figura, para bajar la frecuencia de la señal a bandabase el sistema usa un único oscilador, el cual es desfasado 90° , obteniendo así un coseno y seno. Esto es algo importante al trabajar con elementos reales, pues dos osciladores, a pesar de que estén sintonizados a la misma frecuencia, siempre tienen una leve diferencia en frecuencia Δf .

Los SDR usan un sistema muy similar al presentado en la Figura 3.4, aunque ciertos aspectos del diseño pueden variar dependiendo del modelo y sus prestaciones. A modo de ejemplo, la Figura 3.5 presenta un diagrama simplificado del diseño del USRP B200mini, el SDR utilizado para la recepción de GRB. El SDR contiene un transceptor, por lo que puede recibir y transmitir. En el proyecto solamente se trabajó con el receptor, por lo que no se describirá el diseño del transmisor.

El USRP B200mini implementa un sistema de frecuencia intermedia (IF), desplazando primero la señal a una frecuencia intermedia antes de digitalizarla. Esto es distinto a lo que implementa el receptor en la Figura 3.4, llamado Direct Down-Conversion o Zero-IF, donde se baja la señal directamente a bandabase. Quitando esta diferencia, el SDR sigue la misma filosofía que presenta el receptor de la Figura 3.4, ya que sintoniza la señal con un mismo oscilador desfasado y la muestrea con un ADC. Es el DDC (Digital Down Converter en inglés) quien se encarga de trasladar las muestras digitales a bandabase [23]. En definitiva, independientemente de la arquitectura empleada, el driver entrega las muestras IQ como si se hubiera utilizado un esquema Zero-IF.

En el diagrama del USRP B200mini se distinguen dos etapas: una analógica (señalada por los bloques rojos) y otra digital (señalada por los bloques azules). Para comenzar, el SDR amplifica y convierte la señal analógica recibida a una frecuencia intermedia mediante un oscilador local sintonizable. A continuación, se incorpora un filtro y un amplificador analógico con ganancia controlable. La señal

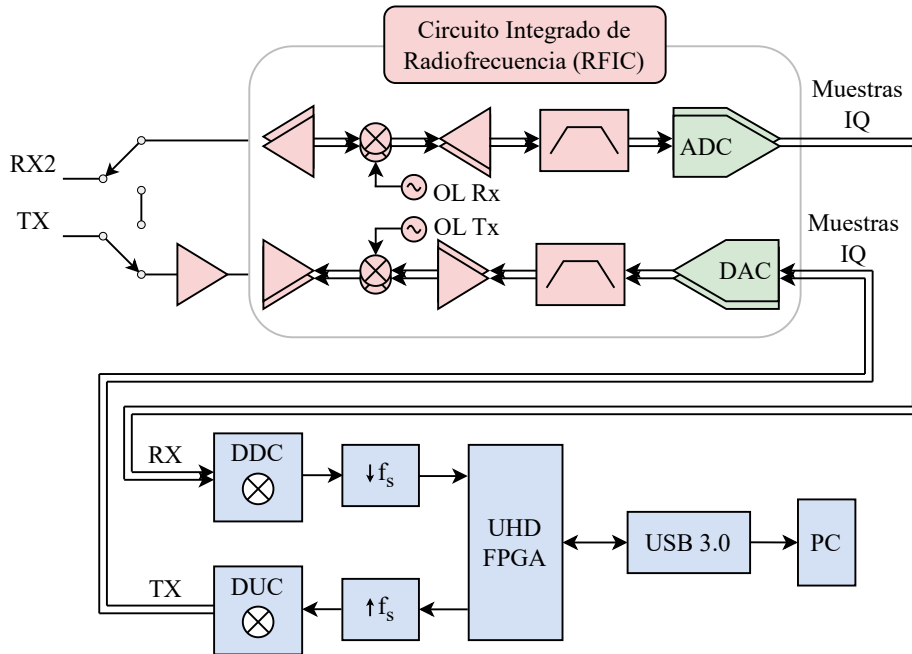


Figura 3.5: Diagrama simplificado del SDR USRP B200mini [12].

filtrada es digitalizada mediante un ADC, y luego se obtienen las componentes en fase y cuadratura con un DDC. En algunos casos, si se programó dicha función, las muestras digitales se envían a una matriz de puertas lógicas programable (FPGA), donde se realiza un procesamiento digital de señales específico. Finalmente, las muestras procesadas se transmiten a una computadora a través de un puerto USB u otro tipo de conexión, donde pueden ser almacenadas o procesadas con un software externo.

3.1.2. Sistema de Recepción Básico con SDR

Los sistemas de recepción basados en SDR no solo son flexibles, sino también fáciles de instalar. La Figura 3.6 muestra un ejemplo de un sistema de recepción con esta tecnología. El mismo incluye una antena, cuya salida se conecta a un filtro pasabandas y un amplificador de bajo ruido (LNA).

El filtro está centrado en la frecuencia de interés y posee un ancho de banda que abarca toda la señal a recibir. Conocido como pre-selector, se encarga de bloquear señales fuera de la banda útil antes de que pase al amplificador. Así, se reducen posibles distorsiones provocadas por productos de intermodulación, que pueden generarse durante la amplificación. El LNA, que debe estar diseñado para operar en la frecuencia de interés, amplifica la señal sin deteriorar demasiado su relación señal-ruido (SNR). Para lograrlo, estos amplificadores están diseñados para aumentar la potencia de la señal útil, teniendo cuidado de introducir la menor

3.1. Fundamentos de la Radio Definida por Software

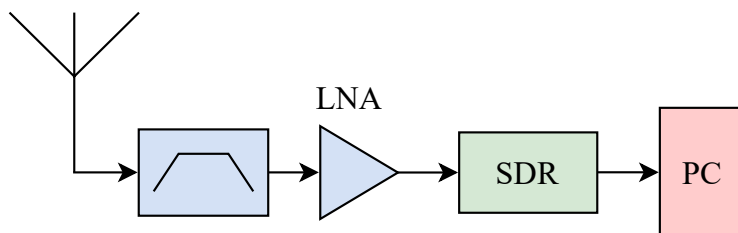


Figura 3.6: Diagrama de bloques de un sistema receptor basado en SDR.

cantidad posible de ruido. Para obtener el mejor desempeño posible, es clave que la distancia entre la antena y el LNA sea pequeña, ya que así se minimiza el ruido introducido por los cables coaxiales. Estos cables generan pérdidas que se incrementan con la longitud, por lo que al reducir la distancia, también se disminuye la longitud del cable y, en consecuencia, dichas pérdidas [24]. Una vez amplificada, la señal es enviada al SDR, que se encarga de digitalizarla y transmitir las muestras en bandabase a una computadora para su posterior procesamiento.

3.1.3. Variantes de SDR

Existe una amplia variedad de SDRs, cada una con distintas capacidades y especificaciones. En función de las necesidades del sistema, es posible encontrar modelos con un amplio ancho de banda, con conversores ADC de alta resolución e incluso dispositivos con capacidad de transmisión y recepción (transceptores). En nuestro caso, y dado que fueron los equipos utilizados a lo largo del proyecto, resultan de particular interés dos modelos: el Adalm-Pluto [9] y el USRP B200mini [12].

Adalm-Pluto

El Adalm-Pluto, mostrado en la Figura 3.7, es un SDR desarrollado por *Analog Devices* y lanzado originalmente en 2017. Este SDR incorpora un transceptor que cubre un rango de frecuencias desde los 325 MHz hasta los 3,8 GHz. Puede alcanzar hasta un ancho de banda instantáneo de 20 MHz y cuenta con conversores ADC y DAC de 12 bits. Para la conectividad, utiliza un puerto micro USB 2.0, lo que limita su velocidad teórica máxima de transferencia a 480 Mbps, aunque la transferencia efectiva es considerablemente menor. Considerando la resolución de los conversores y que estamos trabajando con muestras IQ en simultaneo, esto equivale a:

$$\frac{480\text{Mbps}}{12 \times 2} = 20 \text{ Msps.}$$

Donde *sps* significa muestras por segundo transmitidas, por lo que *Msps* refiere a millones de muestras por segundo. La velocidad real máxima es bastante menor, pudiendo llegar hasta 4 Msps sin perder ninguna muestra según las especificaciones



Figura 3.7: SDR Adalm-Pluto.

del SDR [25].² En cuanto a la ganancia en recepción, el Adalm-Pluto ofrece dos opciones: un control automático de ganancia (AGC) configurable y un control manual.

USRP B200mini

El USRP B200mini, visto en la Figura 3.8, fue desarrollado por *Ettus Research* y surge como una revisión del modelo original USRP B200, lanzado en 2013. Al igual que el Adalm-Pluto, cuenta con un transceptor, un FPGA y conversores ADC y DAC de 12 bits. El rango de frecuencias de este SDR va desde los 70 MHz hasta los 6 GHz y alcanzar un ancho de banda instantáneo de hasta 56 MHz. Para la conectividad, cuenta con un puerto USB Micro-B 3.0, lo que le permite alcanzar una velocidad de transferencia teórica de 5 Gbps. Lo que equivale a la siguiente tasa de símbolos:

$$\frac{5 \text{ Gbps}}{12 \times 2} = 208 \text{ Msps.}$$

Dicho valor es suficiente para llegar hasta los 56 MHz de ancho de banda sin tener como limitante la conexión USB. En recepción, al igual que el Adalm-Pluto, cuenta con un AGC y un control manual.

Para utilizar el USRP es necesario contar con el software UHD (*USRP Hardware Driver*) [26], un conjunto de drivers de código abierto que permite a la computadora comunicarse con el SDR. A través de la API (*Application Programming Interface*) que proporciona UHD, es posible controlar el dispositivo de forma sencilla. En este proyecto se emplearon dos funciones clave del UHD: `rx.samples_to_file` y `benchmark_rate`.

La función `rx.samples_to_file` permite grabar de una manera eficiente las muestras recibidas por el USRP. Su uso fue fundamental, ya que eliminó la necesidad de recurrir a software adicional para grabar las señales, además de permitir

²Este valor se debe a las limitaciones en la capacidad de transferencia efectiva de la interfaz USB 2.0 utilizada por el Adalm-Pluto.

3.2. Aplicaciones para SDR



Figura 3.8: SDR USRP B200mini.

configurar varios parámetros del SDR en recepción. Estos aspectos fueron especialmente importantes al trabajar con señales de gran ancho de banda, donde la optimización de recursos es crucial para evitar la pérdida de muestras por desbordamiento. Por su parte, `benchmark_rate` permite evaluar la calidad del enlace entre el USRP y la computadora. Esta herramienta envía una determinada tasa de muestras por segundo desde el SDR y detecta posibles pérdidas. Gracias a esta función, fue posible probar diferentes cables, velocidades y configuraciones antes de iniciar la grabación, lo que resultó importante para garantizar una configuración óptima del sistema.

3.2. Aplicaciones para SDR

Las aplicaciones de software son una parte esencial del ecosistema SDR. A diferencia de los receptores tradicionales, en los SDR gran parte del procesamiento de señales se implementa directamente en software. Las mismas cumplen un rol fundamental, ya que se encargan de manipular las muestras, aplicar filtros, amplificar, demodular, entre muchas otras funciones. Esto convierte al software no solo en un complemento, sino en una parte fundamental del sistema. Por eso, disponer de la aplicación correcta para cada tarea es esencial al trabajar con esta tecnología. De hecho, sin aplicaciones adecuadas, un SDR pierde su valor práctico, pues es el software el que define cómo funciona la radio. Gracias a esta arquitectura, los SDR se comportan como receptores reprogramables: el mismo hardware puede adaptarse a diferentes protocolos, bandas o tipos de señal simplemente cambiando el software que lo controla.

Una de las mayores fortalezas del ecosistema SDR es que la mayoría del software disponible es de código abierto y gratuito. Esto significa que cualquier persona puede acceder, estudiar, modificar y compartir estas herramientas sin necesidad de licencias costosas. La accesibilidad económica democratiza el acceso a la tecnología, permitiendo que estudiantes, aficionados y profesionales puedan experimentar, aprender y desarrollar soluciones avanzadas sin enfrentar grandes barreras de entrada. Además, al ser proyectos comunitarios, estos programas fomentan la transparencia y evolucionan de forma ágil gracias a la colaboración de usuarios de

Capítulo 3. Introducción a la Radio Definida por Software (SDR)

todo el mundo. Esto facilita el prototipado rápido de nuevos sistemas de recepción, así como la incorporación constante de mejoras y nuevas funcionalidades. Dentro de este ecosistema, dos herramientas se destacan por su utilidad, accesibilidad y relevancia en este proyecto: GNU Radio [27] y SatDump [6].

3.2.1. GNU Radio

GNU Radio es una de las plataformas más reconocidas y utilizadas en el mundo del SDR. Es gratuita, de código abierto y está diseñada con una filosofía modular y expansible, lo que facilita tanto el desarrollo de sistemas complejos como el aprendizaje progresivo de los conceptos relacionados con los sistemas de radio. GNU Radio ofrece un entorno gráfico donde los usuarios pueden construir diagramas de flujo (flowgraphs en inglés) conectando bloques funcionales. Cada bloque cumple una función específica (leer datos, aplicar un filtro, demodular, visualizar, etc.) y pueden combinarse para construir sistemas completos de recepción o transmisión. De esta forma, con un conocimiento sólido del sistema que se quiere implementar, basta con seleccionar y configurar de manera adecuada los bloques disponibles para construirlo. Se destaca por ofrecer una amplia variedad de bloques, incluyendo la mayoría de los componentes utilizados en los sistemas de comunicaciones digitales modernos, evitando así en gran medida la necesidad de programar manualmente la mayoría de estas funciones.

Pero en caso de que alguna funcionalidad no esté disponible, es posible programar bloques personalizados utilizando Python o C++. Esto no solo permite adaptar GNU Radio a necesidades específicas, sino que también abre la puerta al desarrollo de extensiones con nuevas funcionalidades. Esta capacidad de expansión es posible en gran parte gracias a que el programa es de código abierto, lo que permite a cualquier desarrollador acceder al núcleo del sistema, entender su funcionamiento interno y construir sobre él.

Por su naturaleza abierta, su comunidad activa y su flexibilidad, GNU Radio se ha convertido en una de las herramientas más usadas para el desarrollo de soluciones basadas en SDR. Su capacidad para simular y testear sistemas lo vuelve ideal para el prototipado rápido de sistemas de radio. Gracias a su arquitectura modular, GNU Radio también sirve como base para la creación de aplicaciones SDR más especializadas. De esta forma, su impacto en la comunidad va mucho más allá de su uso directo, pues también actúa como una plataforma que impulsa el desarrollo de nuevos proyectos.

3.2.2. SatDump

SatDump es una aplicación gratuita y de código abierto, diseñada específicamente para la recepción y procesamiento de señales satelitales. Su objetivo es ofrecer una solución integral para la decodificación de múltiples servicios, integrando en un solo programa todo lo necesario para recibir, interpretar y procesar datos de una amplia variedad de satélites. Incluye configuraciones preestablecidas para numerosos sistemas, lo que facilita su uso. Entre sus funciones más relevantes

3.2. Aplicaciones para SDR

destaca el soporte para los servicios HRIT y GRB del GOES, un aspecto clave en este proyecto, ya que fue la herramienta utilizada para procesar ambos.

Su interfaz es moderna e intuitiva. El usuario solo debe seleccionar el servicio deseado, sintonizar la frecuencia correspondiente, definir el ancho de banda y el sistema comenzará a recibir y procesar automáticamente la señal. Su naturaleza abierta permite a los usuarios más avanzados modificar parámetros clave para la recepción editando un archivo JSON. Este último punto fue fundamental durante el proyecto, especialmente para lograr una recepción exitosa de GRB. Gracias a esta combinación de accesibilidad y flexibilidad, SatDump se presenta como una herramienta ideal tanto para principiantes como para personas con experiencia previa en la recepción satelital.

Más allá de la recepción de señales, SatDump reúne en una sola plataforma todo el flujo de procesamiento, incluyendo el seguimiento automático de satélites, decodificación, reensamblado de datos y aplicación de LUTs (paletas de color) a las imágenes. Esto le permite generar diversos productos derivados, como la temperatura superficial terrestre y oceánica, o la tasa de precipitación cada cuarto de hora (los tres disponibles para HRIT). Todo este contenido se puede visualizar directamente desde la aplicación, sin necesidad de herramientas adicionales.

Cabe destacar que SatDump es un proyecto en constante desarrollo, con actualizaciones frecuentes y una comunidad activa. Esto permite incorporar nuevas funciones, ampliar el soporte a productos adicionales y adaptar el software a cambios en los servicios satelitales. Un ejemplo concreto de esto fue la transición de GOES-16 a GOES-19. Cuando este último reemplazó al anterior como satélite operativo en la posición GOES-East, SatDump incorporó rápidamente las modificaciones necesarias para continuar con la recepción y decodificación sin interrupciones.

Aunque es una aplicación relativamente reciente, lanzada en 2021, todas estas características han hecho que SatDump se consolide como una herramienta importante dentro de la comunidad SDR. En el contexto de este trabajo, su uso fue crucial para el procesamiento de los servicios HRIT y GRB. Su simplicidad y versatilidad fueron clave para el éxito del proyecto, y refuerza su valor como una solución eficaz para la recepción y procesamiento de datos satelitales. En el Apéndice A se presenta una guía para instalar y utilizar SatDump en una computadora con un sistema operativo de tipo Linux.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 4

Comunicaciones Satelitales

Este capítulo tiene como objetivo introducir la serie de satélites GOES-R, teniendo un enfoque particular en el satélite GOES-East. Para ello, primero se presentarán algunos conceptos clave en las comunicaciones satelitales. Luego, se explicará qué son los productos satelitales, para finalmente abordar el eje central del capítulo: los servicios HRIT y GRB. De ellos se dará una introducción, detallando sus principales parámetros, los requerimientos para su recepción, sus especificaciones y los productos que proveen.

4.1. Principios Básicos de las Comunicaciones Satelitales

4.1.1. Introducción a las Comunicaciones Satelitales

La creación y el desarrollo de satélites se basan en lograr ampliar el rango de alcance y las capacidades de los sistemas de comunicación. Permiten lograr la difusión de señales desde un transmisor hacia múltiples receptores sin la necesidad de repetir el flujo de información. En base a avances científicos y tecnológicos que comenzaron a suceder debido a la Segunda Guerra Mundial, en áreas como microondas y el lanzamiento de misiles, se dio comienzo al desarrollo satelital. Típicamente el área de telecomunicaciones para la época se apoyaba en el uso de ondas de radio y de tramos cableados, por lo que los satélites representaban la posibilidad de complementar estas herramientas. Es así como el 4 de octubre de 1957 la Unión Soviética lanza el primer satélite artificial, Sputnik 1, el cual era capaz de retransmitir mensajes de radio hacia la Tierra así como también información sobre su estado, lo que se denomina telemetría [28]. Desde ese momento hasta el año 2023, se han lanzado 15946 satélites al espacio [29]. Esto es consecuencia del gran desarrollo que ha tenido el área de las comunicaciones satelitales, así como de la disminución en los costos de implementación de los mismos. Además, se han incrementado significativamente las posibles aplicaciones de los satélites, entre las cuales se destacan:

- Satélites de comunicaciones.

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

- Satélites meteorológicos y de observación terrestre. El satélite GOES-East corresponde a esta categoría.
- Satélites de navegación. Por ejemplo, GPS.
- Satélites de televisión.
- Satélites científicos.
- Satélites militares.

4.1.2. Funcionamiento de un Sistema de Comunicación Satelital

En la Figura 4.1 se puede apreciar un diagrama que describe los componentes y arquitectura de un sistema de comunicación satelital. Su funcionamiento puede repartirse en tres grandes segmentos:

- **Segmento Espacial:** En este segmento se encuentra el satélite. Puede estar acompañado por otros satélites, activos o de reserva, conformando lo que se denomina una constelación satelital.
- **Segmento de Control:** Consiste en todas las instalaciones terrenas de control y monitoreo de los satélites, lo que se denomina rastreo, telemetría y control. Se encarga de operar el tráfico y los recursos del satélite.
- **Segmento Terrestre:** Está formado por todas las estaciones terrestres que transportan datos. Según el tipo de servicio del que se trate, las dimensiones de la misma varían desde algunos centímetros a decenas de metros.

Con respecto al segmento terrestre, observamos tres posibles estaciones: las estaciones de enlace, las de usuario y las de servicio. Las de enlace sirven para interconectar redes terrestres con redes satelitales. Las de usuario son el extremo a través del cual el usuario se conecta con el satélite. Finalmente, las de servicio permiten conectar a proveedores de servicios con el satélite. Se observa también la existencia de enlaces de comunicación dentro y entre los distintos segmentos. Estos enlaces son:

- **Uplink:** Corresponde al enlace desde estaciones terrestres hacia el satélite, lo que se conoce como enlace de subida.
- **Downlink:** Corresponde al enlace desde el satélite hacia estaciones terrestres, se conoce como enlace de bajada.
- **Enlaces entre satélites:** En el caso que la configuración del segmento espacial sea una constelación, estos enlaces comunicarán a los distintos satélites entre sí.

4.1. Principios Básicos de las Comunicaciones Satelitales

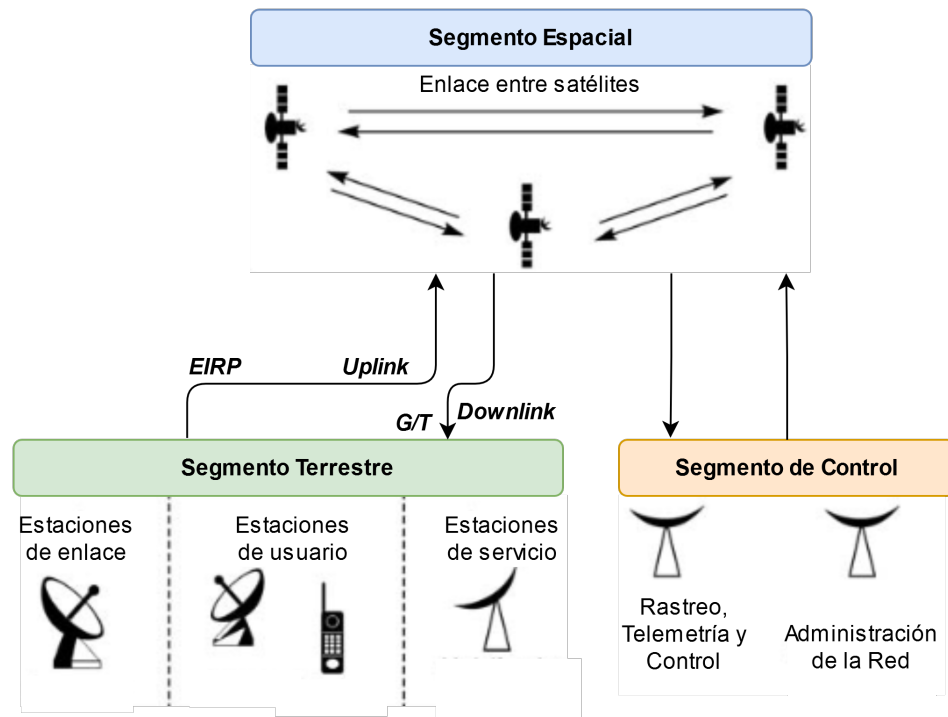


Figura 4.1: Diagrama del funcionamiento de un sistema de comunicación satelital [19].

Estructura de un Satélite

Una de las funciones que puede cumplir un satélite es actuar como un repetidor entre un transmisor y un receptor, permitiendo extender el alcance del enlace de comunicación. En el caso de GOES-East, esta función es la que permite la distribución de la información meteorológica obtenida por el propio satélite. Los dos componentes principales de un satélite son la carga útil y la plataforma. La carga útil corresponde a todo el equipamiento necesario para realizar el funcionamiento del satélite. Por otro lado, la plataforma está formada por todos los subsistemas que permiten a la carga útil funcionar adecuadamente. Ejemplos de sus componentes principales se detallan en la Tabla 4.1.

La disponibilidad de un satélite es clave para asegurar el correcto funcionamiento del sistema de comunicación, es por esto que se suele disponer de un satélite de reserva para poder tener redundancia en caso de fallas. En el caso de GOES-East, el satélite activo es GOES-19, mientras que GOES-16 se mantiene en reserva [30]. El tiempo que un satélite puede ofrecer cobertura en las distintas áreas que puede alcanzar está limitado por el tiempo de vida del propio satélite, así como también por la operativa que se realiza desde el segmento de control.

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

Componente	Función principal
Instrumentos de observación meteorológica	Captura y detección de datos ambientales
Sistema de procesamiento y comunicaciones	Manejo y transmisión datos meteorológicos
Control de altitud y órbita	Estabilización de altitud y determinación de la órbita
Propulsión	Proveer aceleración
Suministro Eléctrico	Proveer energía eléctrica
Control térmico	Regulación de la temperatura
Estructura	Apoyo estructural para el satélite

Tabla 4.1: Componentes principales de la plataforma de un satélite meteorológico.

Estructura de una Estación Terrena

Como se describió anteriormente, el segmento terrestre está formado por las estaciones que transportan datos. Según el volumen de tráfico que operen, varía el tamaño y las características de la estación. Tal como se muestra en la Figura 4.2, una estación terrena cuenta con antenas parabólicas de diversos tamaños. En el caso de la NOAA, estas pueden alcanzar hasta 26 m de diámetro, tal como ocurre en su Estación de Comando y Adquisición de Datos (CDAS) en Wallops Island, Virginia, EE.UU.



Figura 4.2: Estación terrena de la NOAA en Wallops Island, Virginia, EE.UU., desde donde se operan y controlan los satélites GOES-16, GOES-17, GOES-18 y GOES-19 [31].

Por otro lado, en el caso de terminales para usuarios más pequeños, como ocurre con un usuario de Televisión Directa al Hogar (DTH, por sus siglas en

4.1. Principios Básicos de las Comunicaciones Satelitales

inglés), se emplea una antena parabólica de aproximadamente 0,45 m de diámetro. Esto es posible precisamente porque el usuario es un punto final dentro del sistema de comunicación satelital, por lo tanto se puede recibir la señal con un equipo de menor tamaño, ya que se requiere menor potencia de recepción.

La estructura de una estación terrena, para el caso de una estación de enlace o de una estación de servicio, puede observarse en la Figura 4.3. En la misma podemos observar los distintos componentes que debe tener una estación terrena para operar un sistema de comunicación satelital. Estos componentes son:

- Antena.
- Multiplexor. En el caso de la Figura 4.3, es un diplexor que combina la señal de radiofrecuencia transmitida con la recibida.
- Transmisión.
- Recepción.
- Rastreo, Monitoreo y Control.
- Suministro de energía eléctrica.

En cuanto a la transmisión, esta se compone por un modulador en frecuencia intermedia, encargado de modular la señal en bandabase desde su origen, y un amplificador de alta potencia (HPA, por sus siglas en inglés).

Sobre la recepción, esta se realiza mediante un Low-Noise Block Downconverter (LNB), que se encarga de aplicar un filtrado pasabanda a la señal, además de amplificarla y convertirla a una frecuencia intermedia más baja. Esto permite reducir las pérdidas de potencia en la señal recibida desde su transmisión de la antena al receptor. Posteriormente, esta señal es demodulada para obtener la señal en bandabase en el destino. Sobre la antena, la misma se orienta con su respectivo ángulo de elevación sobre la línea del horizonte. Este ángulo depende de la ubicación del satélite, la cual a su vez está determinada por el tipo de órbita en la que se encuentra.

Órbitas Satelitales

Johannes Kepler determinó a principios del siglo XVII que las órbitas que siguen los planetas que orbitan en torno al Sol son de forma elíptica. Estas leyes no solo describen el movimiento de los planetas, sino que también se aplican a otros cuerpos en el espacio, como los satélites artificiales. La teoría desarrollada por Kepler puede resumirse en tres leyes:

1. **Primera ley (1605):** Los planetas se mueven en un plano. Las órbitas descritas son elipses con el Sol en uno de los focos.
2. **Ley de las áreas (1609):** El vector desde el Sol a los planetas cubre áreas iguales en tiempos iguales.

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

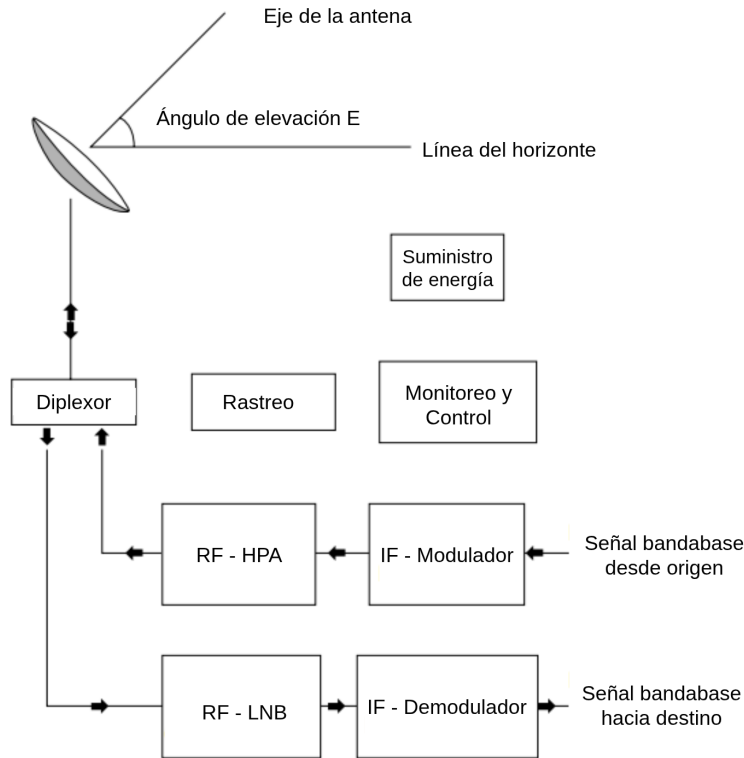


Figura 4.3: Diagrama con los componentes y la estructura de una estación terrena [19]. RF: Radio Frecuencia. IF: Frecuencia Intermedia.

3. **Tercera ley (1619):** La razón entre el cuadrado del período T de la revolución de un planeta alrededor del Sol y el cubo del semi-eje mayor de la elipse es la misma para todos los planetas.

Aplicando la Segunda Ley de Newton junto con la Ley de Gravitación Universal a esta situación, y considerando la conservación del momento angular y la energía, puede determinarse la trayectoria seguida por un satélite. Para órbitas elípticas, esta trayectoria es la que se aprecia en la siguiente ecuación:

$$r = \frac{p}{1 + e \cdot \cos(\theta - \theta_0)}. \quad (4.1)$$

Los parámetros de esta ecuación son:

- r : La distancia del satélite al foco. En este caso, el foco es el centro de la Tierra.
- p : Es el parámetro orbital, caracteriza el tamaño de la órbita.

4.1. Principios Básicos de las Comunicaciones Satelitales

- e : Es la excentricidad de la órbita. Representa cuán alargada o acortada es la elipse. En este caso debe ser un valor mayor a 0 (órbita circular) y menor a 1 (órbita parabólica).
- θ : Es la anomalía verdadera. Es el ángulo actual medido desde el perigeo hasta la posición instantánea del satélite, con vértice en el centro de la Tierra. Varía entre 0° y 360° a lo largo de toda la trayectoria.
- θ_0 : Es la anomalía verdadera del perigeo. Es el ángulo de referencia que indica dónde está ubicado el perigeo de la elipse en el sistema de coordenadas elegido.

De los parámetros mencionados, r varía según dónde esté el satélite (θ), mientras que p , e y θ_0 son constantes que definen la forma y orientación de la órbita. En base a la trayectoria de la órbita, se puede calcular el período T de la misma, el cual se muestra a continuación:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}. \quad (4.2)$$

Donde los parámetros usados son:

- a : Es el semi-eje mayor de la elipse.
- μ : Es el parámetro gravitacional de la Tierra. Se obtiene multiplicando la constante de gravitación universal (G) por la masa de la Tierra.

La órbita de un satélite, que como mencionamos sigue una forma elíptica, alcanza su máxima extensión en el apogeo y la mínima en el perigeo. Un satélite recorre su órbita más lentamente, o sea tiene un mayor período orbital, a medida que aumenta su distancia respecto a la Tierra. Los tipos de órbita más favorables para aplicaciones de telecomunicaciones se eligen según factores como la cobertura geográfica requerida, la latencia de comunicación, los costos de lanzamiento y mantenimiento, y la duración de la cobertura sobre una región específica. Estos tipos de órbita se muestran en la Figura 4.4.

Órbitas HEO Las órbitas elípticas con alta inclinación (HEO, por sus siglas en inglés) se caracterizan por tener una inclinación considerable respecto a la línea del Ecuador. De esta manera, logra que el satélite recorra gran parte de su órbita en latitudes altas, motivo por el cual es la órbita que solían utilizar los satélites lanzados por la URSS [19]. La Agencia Espacial Europea (ESA) comenzó a estudiar este tipo de órbitas en la década de los años 1990, observando que con inclinaciones cercanas a los 90° era posible también dar cobertura a latitudes medianas, por lo que siguen siendo utilizadas hasta el día de hoy [19]. Con el propósito de proveer cobertura de Internet en la Antártida, se ha propuesto emplear órbitas HEO invertidas, de forma que la trayectoria del satélite recorra en su mayoría las latitudes inferiores [32]. Este tipo de órbita es especialmente útil para establecer enlaces satelitales en áreas urbanas donde existen obstáculos elevados, como edificios, en un rango de ángulo entre 0° y 70° , ya que los satélites aparecen en puntos muy elevados del cielo.

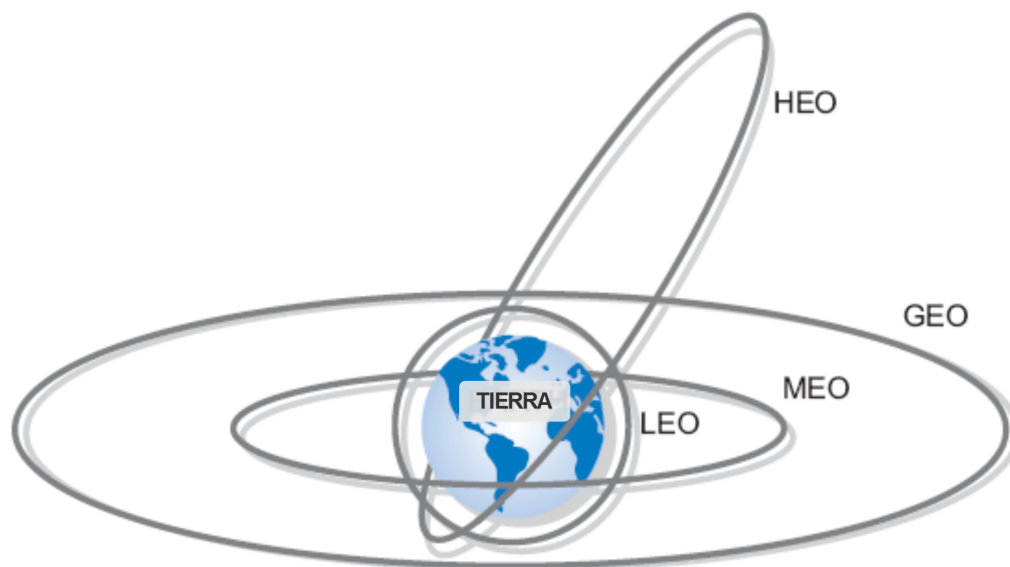


Figura 4.4: Forma de las órbitas HEO, LEO, MEO y GEO.

Órbitas LEO Las órbitas circulares de baja elevación sobre la Tierra (LEO, por sus siglas en inglés) se caracterizan por tener una altitud constante respecto a la Tierra, usualmente en valores de centenas de kilómetros. Esta baja altitud, en comparación con otras órbitas, la hace especialmente útil para aplicaciones con requerimientos exigentes de latencia, como es el caso de Redes de Internet Satelital como Starlink o OneWeb. El período de la misma es de aproximadamente una hora y media. Este tipo de órbita permite dar cobertura a todo el planeta en diversos momentos de tiempo, ya que además de recorrer toda la extensión de la Tierra, se debe considerar la rotación de la Tierra sobre sí misma.

Órbitas MEO Las órbitas medias circulares (MEO, por sus siglas en inglés) tienen una altitud de 10 000 km con un período de aproximadamente 6 horas. Se estima que con una constelación de entre 10 y 15 satélites con esta órbita es posible dar cobertura continua para todo el planeta [19].

Órbitas GEO Dentro de las órbitas Ecuatorial Geosíncronas (GEO, por sus siglas en inglés) se encuentra la órbita geoestacionaria, la más popular dentro de esta categoría. En esta órbita, los satélites se desplazan alrededor de la Tierra en el plano ecuatorial, siguiendo su rotación, a una altitud de aproximadamente 35 786 km. De esta manera, su período orbital coincide exactamente con el de la rotación terrestre, por lo que los satélites parecen permanecer fijos en un punto del cielo. Esto permite un funcionamiento continuo y una cobertura de cerca del 43 % de la superficie terrestre. Los satélites de la generación GOES-R (GOES-16, GOES-17, GOES-18 y GOES-19) todos operan en la órbita geoestacionaria [33].

Dada la gran cantidad de satélites que orbitan de forma geosíncrona, es ne-

4.1. Principios Básicos de las Comunicaciones Satelitales

cesario evitar interferencias entre las frecuencias utilizadas organizando el uso de las mismas por parte de los satélites. Esta tarea es responsabilidad de organismos gubernamentales que se encargan de asignar rangos específicos de frecuencias para distintos usos, así como para satélites que orbitan cerca unos de otros. En este tipo de órbita, el ángulo de elevación varía según la diferencia de latitud y longitud entre la estación terrena y el satélite. Consecuentemente, países situados en latitudes extremas tendrán ángulos de elevación muy bajos, lo que puede ocasionar interferencias atmosféricas y obstáculos terrestres que comprometen la comunicación satelital.

Es importante notar que los satélites geoestacionarios no logran dar cobertura en las áreas polares, algo que se debe lograr empleando órbitas como las HEO. En el caso de la NOAA, significa que los satélites GOES no pueden capturar datos de estas regiones, motivo por el cual la NOAA dispone de los satélites polares JPSS [34].

Rangos de Frecuencia para Comunicaciones Satelitales

Como se comentó antes, las frecuencias en las que operan los satélites son atribuidas de forma tal que se eviten interferencias. Estas son:

- **Banda VHF:** Se utiliza principalmente para servicios meteorológicos y de emergencia, ofreciendo excelente propagación a largas distancias pero con limitaciones de ancho de banda.
- **Banda C:** Es la banda más utilizada en sistemas satelitales comerciales y, por ello, la más saturada debido a su uso en transmisiones.
- **Banda X:** Generalmente está reservada para aplicaciones gubernamentales y militares.
- **Banda Ku:** Principalmente se emplea para ofrecer servicios a usuarios, ya que utiliza terminales de pequeño tamaño. Sin embargo, sufre de atenuaciones debido a fenómenos climáticos como la lluvia.
- **Banda Ka:** Actualmente es de gran interés por su baja saturación y por contar con grandes rangos de ancho de banda disponibles.

A continuación, en la Tabla 4.2, se detallan las frecuencias utilizadas por cada tipo de sistema de comunicaciones satelital. Aunque normalmente estas frecuencias están reservadas para comunicaciones satelitales, en países de América como Estados Unidos, Colombia o Uruguay, se ha dado el caso de reasignar estas bandas para otros usos, por ejemplo, para tecnologías emergentes como el 5G [35]. Porciones del espectro superiores a los 30 GHz se explorarán e investigarán a medida que sea necesario tener más ancho de banda disponible.

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

Aplicación Satelital	Frecuencia	Banda	Ejemplos
Internet satelital de banda ancha	12,75-10,7 GHz 20,2-17,8 GHz 30-27,5 GHz 14,5-11,2 GHz 29,5-19,7 GHz	Ku Ka Ka Ku Ka	Starlink, OneWeb Viasat, HughesNet Starlink Amazon Kuiper OneWeb
Comunicaciones satelitales fijas	6-4 GHz 8-7 GHz 14-11,2 GHz 30-20 GHz 19,7-17,7 GHz	C X Ku Ka Ka	SES, Intelsat Eutelsat Telesat, Hispasat Inmarsat Viasat
Comunicaciones móviles	1,559-1,525 GHz 1,66-1,6 GHz 20,2-19,7 GHz	L L Ka	Iridium, Globalstar Thuraya, Inmarsat Inmarsat GX
Televisión Satelital (DTH)	12,2-11,7 GHz 17,8-17,3 GHz	Ku Ka	DirecTV, Dish Sky Brasil
Satélites meteorológicos	137-138 MHz 1,7-1,67 GHz 8,4-8,025 GHz 1,71-1,7 GHz	VHF L X L	NOAA-15/18/19 GOES-East/West MSG, FengYun Himawari, INSAT
Servicios de emergencia e IoT	137-138 MHz 1,66-1,6 GHz	VHF L	Cospas-Sarsat Orbcomm

Tabla 4.2: Asignación de frecuencias para aplicaciones satelitales [36]. Se muestran de la forma uplink-downlink, cuando aplica.

4.2. Generación de Satélites GOES-R

La NOAA mantiene operativos únicamente dos satélites GOES, definidos por su ubicación orbital: los ya mencionados GOES-East (actualmente el GOES-19) y GOES-West (actualmente el GOES-18). Su ubicación y área de cobertura se puede apreciar en la Figura 4.5. En particular, Uruguay se encuentra dentro de la huella del satélite GOES-East, por lo que es posible recibir los servicios que proporciona. Ambos satélites en operación corresponden a la generación actual de satélites GOES, denominada GOES-R.¹ También forman parte de esta generación los satélites GOES-16 y GOES-17, los cuales funcionan como respaldo a GOES-18 y GOES-19. Cabe destacar que la NOAA suele renombrar sus satélites GOES una vez que alcanzan su órbita geoestacionaria, empleando una letra antes de su lanzamiento y reemplazándola por un número secuencial al entrar en operación.

¹La generación actual comienza con el GOES-16, el cual incorporó mejoras significativas respecto a la generación GOES-N. Fue lanzado el 19 de noviembre de 2016 y comenzó a operar como GOES-East el 18 de diciembre de 2017, función que desempeñó hasta ser reemplazado por el GOES-19 el 7 de abril de 2025 [37].

4.2. Generación de Satélites GOES-R

Por este motivo, es común encontrar referencias a ambos nombres.² Cada nuevo lanzamiento reemplaza a un satélite anterior en una de estas dos posiciones, garantizando así la continuidad operativa y mejorando progresivamente la capacidad de observación meteorológica.

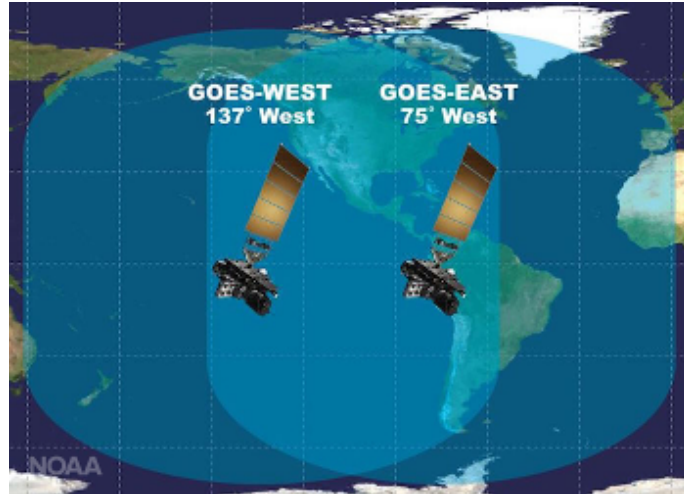


Figura 4.5: Áreas de cobertura de los satélites GOES-West y GOES-East de la NOAA [38].

4.2.1. Instrumentos del Satélite

Estos satélites cuentan con seis instrumentos principales: el *Advanced Baseline Imager* (ABI), el *Space Environment In-Situ Suite* (SEISS), el *Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors* (EXIS), el *Solar Ultraviolet Imager* (SUVI), el *Magnetometer* (MAG) y el *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) [39]. A estos se suma un nuevo instrumento incorporado exclusivamente en el GOES-19, el satélite más reciente de la serie: el *Compact Coronagraph* (CCOR). A continuación, debido a su importancia, se presentarán en detalle el ABI y el SUVI. El resto de los instrumentos se describen en el Apéndice F.

Advanced Baseline Imager (ABI)

El ABI es uno de los instrumento más importante de los satélites de la generación GOES-R, siendo responsable de aproximadamente el 65 % de los datos transmitidos [40]. Su relevancia radica en la capacidad de capturar imágenes de la Tierra y de la atmósfera en 16 bandas espectrales (también llamados canales): dos en el visible, cuatro en el infrarrojo cercano y diez en el infrarrojo [39]. Cada banda registra la radiancia reflejada o emitida en una longitud de onda específica y, por lo tanto, revela distintos fenómenos [41]. Con estas 16 bandas, los meteorólo-

²De esta forma, GOES-16 es también conocido como GOES-R, GOES-17 como GOES-S, GOES-18 como GOES-T y GOES-19 como GOES-U [37].

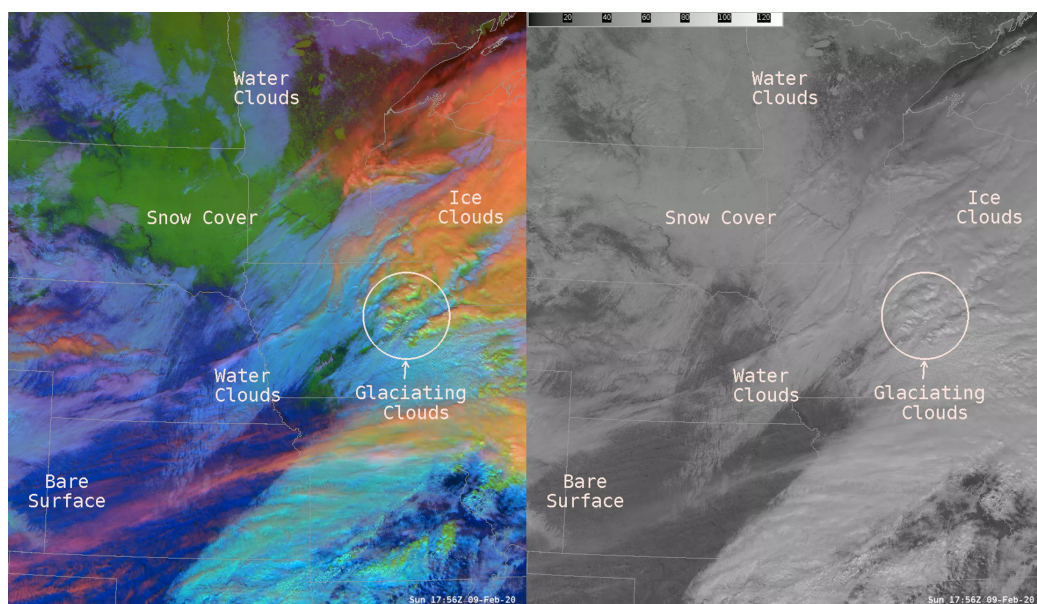


Figura 4.6: Comparación entre una imagen RGB compuesta y una imagen monocromática del canal 2 ($0,64\mu\text{m}$) [41].

gos pueden desarrollar productos destinados al estudio de diversos aspectos de la superficie terrestre y la atmósfera.³

Aunque las imágenes originales del ABI son monocromáticas (cada canal produce una imagen en escala de grises), es posible crear composiciones en color mediante la fusión de varios canales. Una opción es el compuesto *False Color*, que utiliza el canal 2 ($0,64\mu\text{m}$) del espectro visible y el canal 13 ($10,3\mu\text{m}$) del infrarrojo. Mediante una *lookup table* (LUT), es posible colorear la imagen combinando la reflectancia del canal visible con las estimaciones de temperatura superficial obtenidas del canal infrarrojo.⁴ Debido a las bandas que emplea, esta composición se utiliza frecuentemente para mostrar imágenes en color al recibir HRIT. Más allá del color natural, la combinación estratégica de bandas en composiciones RGB permite resaltar características poco evidentes en imágenes de un solo canal. Este es quizás el aspecto más importante del instrumento, pues posibilita el estudio y el seguimiento de distintas partes del clima terrestre. La Figura 4.6 ilustra esta ventaja, la imagen compuesta de la izquierda realza, mediante el uso de color, superficies y fenómenos atmosféricos que en la imagen monocromática de la derecha son difíciles de discernir a simple vista. Estas composiciones RGB se han convertido en una herramienta esencial para la vigilancia meteorológica operativa, ya que sintetizan información crítica sobre procesos de rápida evolución.

El ABI escanea la Tierra mediante tres tipos de imágenes, cada una con tamaños y regiones de cobertura distintas: disco completo (*Full Disk*), Estados Uni-

³Entre los productos generados se encuentran mapas de la tasa de precipitación y de la temperatura superficial, detección de polvo, localización de incendios, entre otros [42].

⁴SatDump implementa este método para HRIT utilizando una LUT diseñada por el usuario WXstar [43].

4.2. Generación de Satélites GOES-R

dos continental (CONUS) para el GOES-East o Estados Unidos del Pacífico (PACUS) para el GOES-West, y mesoescala (*Mesoscale*) [40]. La resolución espacial de las imágenes va de 0,5 km a 2 km, dependiendo del canal capturado. La imagen de disco completo es la más grande, siendo un círculo centrado en la ubicación del satélite, con una cobertura hemisférica de hasta 83° de ángulo cenital local. El área de cobertura de este tipo de imagen se puede ver en la Figura 4.5. Por su parte, las imágenes CONUS y PACUS abarcan el territorio continental y del Pacífico de Estados Unidos, con una dimensión fija de 5000 km×3000 km. Finalmente, las imágenes de mesoescala cubren un área de 1000 km×1000 km, en una región variable determinada por la NOAA, la cual debe estar dentro del rango de las imágenes de disco completo [44].⁵

El ABI tiene tres modos de escaneo. En el modo 4, llamado modo continuo de disco completo, el ABI genera una imagen de disco completo cada 5 minutos. En el modo 3, o modo flexible, el ABI genera simultáneamente una imagen de disco completo cada 15 minutos, una imagen CONUS o PACUS cada 5 minutos y dos imágenes de mesoescala (de diferentes regiones) cada 60 segundos, o bien una imagen de una única región cada 30 segundos. El modo 6, o modo flexible, captura una imagen de disco completo cada 10 minutos, una imagen CONUS o PACUS cada 5 minutos, y dos imágenes mesoescala cada 60 segundos (o una sola imagen de una única región cada 30 segundos). Desde abril de 2019, el modo por defecto de los GOES-R es el 6 [40].

Solar Ultraviolet Imager (SUVI)

El SUVI es un telescopio que monitorea al Sol en el rango de frecuencias del ultravioleta extremo (EUV), proporcionando imágenes del disco solar completo de manera continua [45]. Este instrumento permite la observación y caracterización de regiones activas del Sol, así como de erupciones y filamentos solares que pueden dar lugar a eyecciones de masa coronal (CME). Dichos eventos pueden desencadenar tormentas geomagnéticas con el potencial de afectar sistemas eléctricos, telecomunicaciones e incluso causar daños a satélites y a la Estación Espacial Internacional.

Las observaciones del SUVI permiten emitir alertas tempranas sobre eventos solares con capacidad de afectar la Tierra. El Centro de Predicción del Clima Espacial de la NOAA (SWPC) utiliza estos datos para emitir advertencias dirigidas a empresas de energía eléctrica, proveedores de telecomunicaciones y operadores satelitales, contribuyendo a la mitigación de riesgos tecnológicos.

4.2.2. Servicios Transmitidos

Las transmisiones del satélite hacia la Tierra se realizan en la banda L, que abarca desde los 1 GHz hasta los 2 GHz, dentro del rango asignado por EE.UU. para las comunicaciones de satélites meteorológicos [46]. En particular, el espectro

⁵Según la disponibilidad del satélite y del personal de la NOAA, es posible solicitar la captura de imágenes de mesoescala en una región particular mediante el formulario [GOES-R Series Research Mesoscale Domain Sector \(MDS\) Requests](#).

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

emitido por el satélite presenta una forma como la que se muestra en la Figura 4.7. Los cuatro servicios que se aprecian en la figura son:

- **DCPR (*Data Collection Platform Relay*)**: Retransmite datos de sensores recopilados por numerosas estaciones ambientales pequeñas distribuidas en distintas regiones de América [47]. La retransmisión se realiza con polarización lineal vertical y utiliza 556 canales de 750 Hz de ancho de banda [48].
- **GRB (*GOES Rebroadcast*)**: Es el principal servicio para la difusión de datos de los satélites GOES, ya que transmite toda la información que generan. Se centra en 1686,6 MHz y ocupa un ancho de banda de 10,9 MHz. Se transmite empleando ambas polarizaciones circulares, izquierda y derecha (LHCP y RHCP), con dos señales independientes superpuestas en el espectro. Considerando que es una de las señales que deben recibirse, sus características y sistema de recepción se detallarán más adelante.
- **CDA (*Command and Data Acquisition*)**: Permite la operación, gestión y control del satélite por parte de la NOAA. Dispone de un enlace de bajada (downlink) en 1693 MHz (transmitido con polarización RHCP) y uno de subida al satélite (uplink) en una frecuencia superior.
- **HRIT (*High Rate Information Transmission*)**: Transmite una parte de los datos meteorológicos capturados por el satélite, incluyendo imágenes con menor resolución espacial que las provistas por GRB. Se centra en 1694,1 MHz y ocupa un ancho de banda de 1,2 MHz. Se transmite utilizando polarización lineal vertical, con un pequeño desvío del eje vertical (offset). Al igual que en el caso de GRB, sus características y sistema de recepción se describirán en detalle en las siguientes secciones.

4.2.3. Productos Satelitales

Al igual que la mayoría de las misiones espaciales, los satélites de la generación GOES-R dividen su operación en tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento terrestre. Comprender el funcionamiento de estos segmentos y el flujo de datos capturados por el satélite a través de ellos es clave para interpretar la información proporcionada por HRIT y GRB.

El satélite captura información cruda mediante sus instrumentos, conocida como productos de nivel 0 (L0). Esta información es transmitida a las estaciones terrestres de la NOAA, donde se procesan y se generan productos de nivel 1b (L1b) y nivel 2+ (L2+), los cuales son posteriormente retransmitidos al satélite. Finalmente, este distribuye dichos productos a través de los servicios HRIT y GRB [39].

Los productos L1b consisten en datos L0 a los que se les han aplicado correcciones radiométricas y geométricas, con el fin de producir parámetros en unidades físicas. Además de ser productos utilizables por sí mismos, los productos L1b sirven como insumo principal para la generación de los productos de nivel 2+ [39].

4.3. High Rate Information Transmission (HRIT)

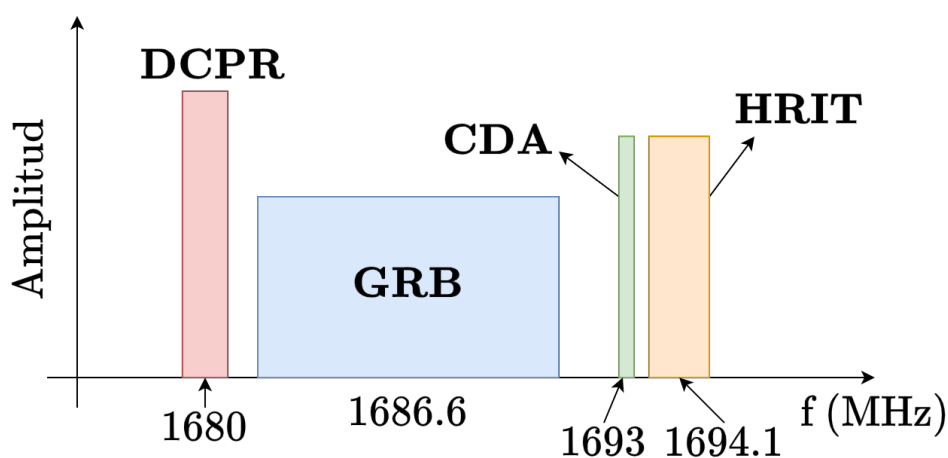


Figura 4.7: Espectro de la transmisión en banda L del satélite GOES-East.

Los productos L2+ comprenden todas las variables ambientales derivadas (por ejemplo, la temperatura superficial del mar), generadas a partir de datos L1b con resolución temporal y espacial comparable. También pueden incluir variables ambientales remuestreadas espacial o temporalmente mediante técnicas de promediado o composición, así como salidas de modelos o resultados de análisis que no provienen directamente de observaciones instrumentales [39].

La NOAA opera tres estaciones terrestres dedicadas a la recepción y procesamiento de los datos del satélite. Las dos principales son NSOF, en Suitland, Maryland, y WCDAS, en Wallops, Virginia [39]. La tercera, CBU, ubicada en Fairmont, West Virginia, funciona como respaldo en caso de fallas en NSOF o en WCDAS. El WCDAS se encarga de recibir los datos de nivel L0 y generar los productos L1b y L2+, que luego son retransmitidos por el satélite mediante los servicios HRIT y GRB. Por su parte, el NSOF recibe la señal GRB y realiza un procesamiento adicional para generar otros productos L2+. Estos datos se envían directamente al Subsistema de Acceso GOES-R (GAS) y al Sistema Avanzado de Procesamiento Interactivo del Tiempo (AWIPS) del Servicio Meteorológico Nacional (NWS), donde son utilizados por diversas Oficinas de Pronóstico (WFO) del NWS.

4.3. High Rate Information Transmission (HRIT)

HRIT, también conocido como HRIT/EMWIN, es un servicio satelital presente en la generación GOES-R. Esta basado en la especificación *LRIT/HRIT Global Specification*, cuyo objetivo principal es establecer un estándar para la diseminación

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

de imágenes rasterizadas de la superficie terrestre [49].⁶

HRIT proporciona imágenes de la Tierra con resolución espacial reducida respecto a las transmitidas por GRB, incluyendo vistas de disco completo y de meso-escala capturadas por el ABI. Asimismo, combina en un solo servicio la transmisión de pronósticos y emergencias del NWS a través de EMWIN (*Emergency Managers Weather Information Network*), junto con la retransmisión de datos meteorológicos de otras agencias y la información recopilada por numerosas estaciones meteorológicas mediante el sistema GOES DCS (*Data Collection System*). Al concentrar toda esta información en un único servicio, HRIT busca ofrecer un sistema de alertas accesible para regiones remotas sin conectividad, además de servir como respaldo en situaciones donde servicios como Internet se vean interrumpidos.

4.3.1. Parámetros de HRIT

HRIT está diseñado con el objetivo de ofrecer un servicio de alerta accesible, pensado para ser recibido usando sistemas pequeños y simples. Las características de la señal responden a esta finalidad, empleando una modulación sencilla y una elevada tasa de corrección de errores, ideal para sistemas robustos que buscan garantizar la continuidad del servicio. Los parámetros de la señal se presentan a continuación:

- **Corrección de errores:**
 - Código convolucional con tasa $\frac{1}{2}$ y largo 7.
 - Código Reed-Solomon (255,223) con entrelazado de 4 símbolos.
- **Conformación de pulso SRRC:** Con roll-off $\beta = 0,3$.
- **Tasa de símbolos:** 0,927 Msps.
- **Modulación:** BPSK.

A partir de estos parámetros es posible determinar tanto el ancho de banda de la señal como la tasa de bits. Considerando el roll-off del pulso SRRC y la tasa de símbolos, se tiene el siguiente cálculo para el ancho de banda:

$$BW = 0,927 \text{ Msps} \times (1 + 0,3) = 1,205 \text{ MHz.} \quad (4.3)$$

El ancho de banda de esta señal permite su recepción con SDRs de mediano porte, lo que la convierte en una opción ideal para sistemas de bajo costo.

La tasa de bits se puede determinar a partir de la tasa de símbolos, la modulación y las tasas asociadas a los códigos de corrección de errores. En primer lugar, la tasa de bits bruta se calcula utilizando la tasa de símbolos y la modulación

⁶Elaborada por la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), permitió reemplazar sistemas analógicos empleados anteriormente, como WEFAX o GVAR (basados en *Automatic Picture Transmission*, APT), que eran empleados por EUMETSAT y la NOAA.

4.3. High Rate Information Transmission (HRIT)

empleada. En este caso, al utilizar modulación BPSK tenemos un bit por símbolo, por lo que se obtiene:

$$R_b = 0,927 \text{ Msps} \times 1 = 0,927 \text{ Mbps.} \quad (4.4)$$

Luego, considerando el código convolucional con tasa de $\frac{1}{2}$, la tasa de bits resultante tras su aplicación es la siguiente:

$$R_{\text{despues conv.}} = 0,927 \text{ Mbps} \times \frac{1}{2} = 0,4635 \text{ Mbps.} \quad (4.5)$$

Finalmente, al aplicar el código Reed-Solomon (255,223), se obtiene:

$$R = 0,4635 \text{ Mbps} \times \frac{223}{255} = 0,405 \text{ Mbps.} \quad (4.6)$$

A modo de resumen, los parámetros más relevantes para la recepción de HRIT se presentan en la Tabla 4.3. El sistema de recepción, así como el análisis del margen de enlace, se describirán en detalle en el Capítulo 5.

Ubicación (GOES-East):	75,2°W
Frecuencia central:	1694,1 MHz
Ancho de banda de la señal:	1,205 MHz
Polarización de la señal:	Lineal — Vertical
Modulación — Tasa de símbolos:	BPSK — 0,927 MSps

Tabla 4.3: Parámetros clave para la recepción de HRIT [39].

El hecho de que la señal se transmita con polarización vertical simplifica considerablemente la fabricación de la antena receptora.⁷ Si bien esta polarización puede presentar ciertas dificultades al momento de orientar la antena hacia el satélite, dichas complicaciones no constituyen un obstáculo importante frente a los desafíos que implicaría la construcción de una antena más compleja.

4.3.2. Productos Provistos por HRIT

Debido a su tasa de transmisión de bits, la cantidad y resolución de los productos que puede enviar HRIT es limitada, especialmente al compararlo con GRB. A continuación se presenta una lista de los productos transmitidos por el servicio:

- Mensaje del administrador.
- Imágenes de mesoescala (bandas 2, 7 y 13).
- Imágenes de disco completo (bandas 2, 7, 8, 9, 13, 14, y 15).
- Imágenes de disco completo del GOES-West (banda 13).

⁷En particular, el sistema diseñado utilizó una antena que emplea un dipolo, el cual fue descrito en el Capítulo 2.

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

- Mensajes EMWIN - Alta Prioridad.
- Mensajes EMWIN - Gráficos.
- Mensajes EMWIN - Baja Prioridad.
- Gráficos del NHC.⁸
- Otras imágenes de GOES-East - Productos L2.
- Otras imágenes de Himawari o METEOSAT.⁹
- Mensaje del Administrador de DCS.
- Datos de DCS.

Para HRIT, las imágenes de disco completo se transmiten cada 30 minutos y tienen una resolución espacial de 2 km para todas las bandas. En el caso de las imágenes de mesoescala, la banda 2 alcanza una resolución de 0,5 km, mientras que las bandas 7 y 13 tienen una resolución de 2 km; para las tres bandas, la frecuencia de transmisión es de 15 minutos [50].

4.4. GOES Rebroadcast (GRB)

GRB es la principal servicio mediante el cual los satélites de la generación GOES-R transmiten la información que capturan.¹⁰ Este servicio distribuye todos los productos de nivel 1b, incluidas imágenes de disco completo, de mesoescala y CONUS o PACUS (dependiendo de si es GOES-East o GOES-West) de los 16 canales que captura el ABI. Asimismo, transmite los datos de otros instrumentos a bordo de los satélites GOES-R (GLM, MAG, SEISS, SUVI, EXIS y MAG).

Para manejar este mayor volumen de información, GRB emplea polarización circular doble, izquierda (LHCP) y derecha (RHCP), lo que permite la transmisión simultánea de dos flujos de datos [52]. Ambas polarizaciones están superpuestas en el espectro, por lo que es fundamental que la antena sea capaz de separarlas correctamente en recepción para evitar interferencias. Al concentrar y retransmitir toda la información generada por los distintos sensores del satélite, los requerimientos del sistema de recepción de GRB son mucho más exigentes que los de HRIT. Por esta razón, está orientado a instituciones o grupos con la capacidad de instalar y mantener estaciones de recepción de mayor porte, y no a usuarios individuales, como sí lo es HRIT.

⁸NHC es el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos. En esta transmisión se emiten alertas y pronósticos de eventos marítimos.

⁹Himawari y METEOSAT son las series actuales de satélites geoestacionarios operadas por la Agencia Meteorológica de Japón y EUMETSAT, respectivamente.

¹⁰GRB surge como un reemplazo al sistema GOES VARiable (GVAR), utilizado en la generación anterior GOES-N [51].

4.4.1. Parámetros de GRB

Para su transmisión, GRB emplea el estándar DVB-S2 (*Digital Video Broadcasting by Satellite - Second Generation*) [53], un formato flexible diseñado para la transmisión de televisión digital, que permite enviar imágenes y sonido a través de satélites. El uso de DVB-S2 por parte de GRB simplifica notablemente el diseño de los sistemas de recepción al tratarse de un estándar común y ampliamente adoptado, es más fácil acceder a receptores compatibles y a documentación técnica, lo que puede reducir costos y esfuerzos de desarrollo.¹¹ Asimismo, la información de la tecnología está más difundida, lo que facilita la implementación del sistema. Además, su popularidad ha impulsado el desarrollo de herramientas de software abiertas que permiten procesar la señal sin necesidad de hardware especializado.¹²

Como se comentó anteriormente, GRB debe transmitir una gran cantidad de información, por lo que usa polarización doble circular (RHCP y LHCP). Debido a esto y a que el servicio está pensado para ser recibido con sistemas más complejos que los de HRIT, la señal utiliza una tasa de corrección de errores más baja. La modulación es QPSK, por lo que utiliza un bit por símbolo más que HRIT, lo que permite lograr una mayor eficiencia espectral. Considerando esto, los parámetros de la señal se presentan a continuación [39]:

- **Corrección de errores:** Bloques con 64800 bits de largo y tasa de $\frac{9}{10}$.¹³
 - Código BCH.
 - Código LDPC (*Low Density Parity Check*).
- **Tipo de señal:** DVB-S2.
- **Conformación de pulso SRRC:** Con roll-off $\beta = 0,25$.
- **Polarización de la señal:** Doble circular (RHCP y LHCP).
- **Tasa de símbolos:** 8,665938 Msps.
- **Modulación:** QPSK.

Considerar la tasa de símbolos y el roll-off, el ancho de banda de la señal es el siguiente:

$$BW = 8,665938 \text{ Msps} \times (1 + 0,25) = 10,83 \text{ MHz} \quad (4.7)$$

En general, en los documentos de la NOAA suele redondearse a 10,9 MHz [11].

Para la tasa de bits debemos considerar la tasa de símbolos, la polarización, la modulación y la tasa asociada a los códigos de corrección de errores. Considerando

¹¹Este es un cambio importante respecto al servicio anterior (GVAR), el cual no utilizaba un estándar común y solamente establecía criterios que el receptor debía cumplir [54].

¹²Un ejemplo es el proyecto de código abierto `gr-dvbs2rx`, que implementa un receptor y transmisor DVB-S2 para SDR [55].

¹³Este valor corresponde a la tasa de codificación completa de acuerdo al protocolo DVB-S2 [53], que incluye tanto el código interno LDPC como el código exterior BCH.

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

que la señal utiliza la modulación QPSK, se tienen dos bits por símbolo. Por lo tanto, la tasa de bits bruta es la siguiente:

$$R_b = 8,665938 \text{ Msps} \times 2 = 17,33 \text{ Mbps.} \quad (4.8)$$

Aplicando la tasa de los códigos de corrección de errores se obtiene la tasa de bits para cada polarización:

$$R_{pol.} = 17,33 \text{ Mbps} \times \frac{9}{10} = 15,59 \text{ Mbps.} \quad (4.9)$$

Finalmente, considerando que se tienen dos flujos de datos (uno para cada polarización circular), la tasa de bits total es la siguiente:

$$R = 15,59 \text{ Mbps} \times 2 = 31,18 \text{ Mbps.} \quad (4.10)$$

En resumen, la Tabla 4.4 muestra los parámetros clave para la recepción de GRB.

Ubicación (GOES-East):	75,2°W
Frecuencia central:	1686,6 MHz
Ancho de banda de la señal:	10,9 MHz
Tipo de señal:	DVB-S2
Polarización de la señal:	Doble circular (RHCP y LHCP)
Modulación — Tasa de símbolos:	QPSK — 8,665938 Msps

Tabla 4.4: Parámetros clave para la recepción de GRB [39].

4.4.2. Requerimientos para la Recepción de GRB

Considerando los requerimientos estrictos para recibir GRB, la NOAA establece una serie de requerimientos mínimos para garantizar la correcta recepción de la señal. Los parámetros principales para la recepción de la señal son dos: el diámetro de la antena y la aislación entre puertos. Con estos dos valores es posible tener una idea de cuán complejo o qué exigencias debe cumplir el sistema para lograr una recepción exitosa. De esta forma, esta subsección busca comentar estos dos parámetros y las recomendaciones de la NOAA con el objetivo de contextualizar el sistema de recepción a implementar para GRB. Un análisis más detallado del sistema, incluyendo el cálculo del margen de enlace, se presentará en el Capítulo 6.

La NOAA recomienda ciertos tamaños de antena según la ubicación de la estación. La Figura 4.8 muestra un mapa con los distintos diámetros sugeridos. En el caso de Uruguay, el diámetro mínimo recomendado para la recepción del satélite GOES-East es de 4,5 m.

Los diámetros que establece la NOAA no son obligatorios, sino que buscan asegurar la recepción continua de GRB teniendo en cuenta factores atenuantes como la lluvia y la interferencia celular. Para el cálculo de los diámetros, la NOAA

4.4. GOES Rebroadcast (GRB)

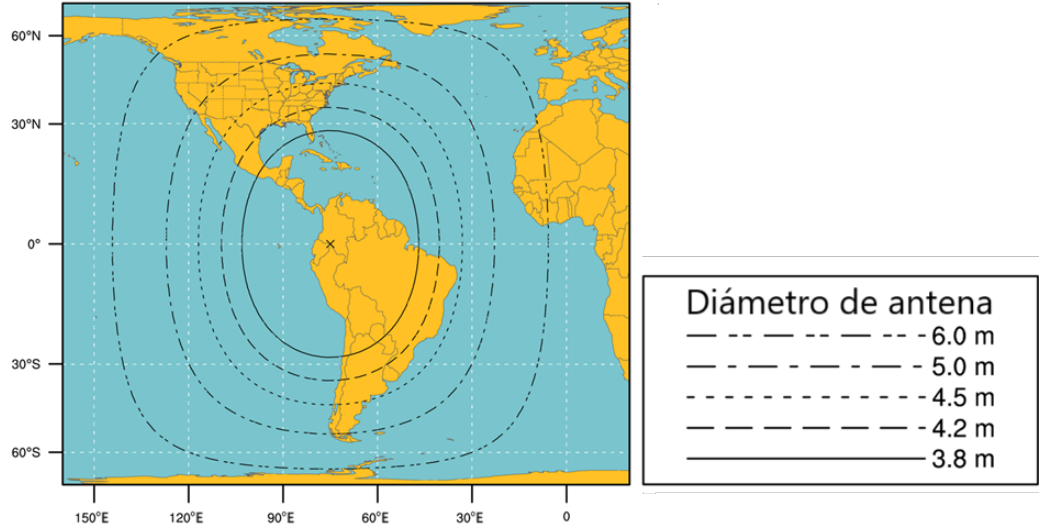


Figura 4.8: Diámetros de antena mínimos establecidos por la NOAA para GOES-East [56].

consideró un margen de ganancia de 2,5 dB. Así, en la mayoría de los casos, es posible recibir GRB con antenas de menor diámetro. No obstante, se aclara que en zonas con alta densidad de torres celulares, dicho margen podría no ser suficiente.

El otro parámetro importante para la recepción de GRB es la capacidad que tiene la antena de separar y recibir las dos polarizaciones superpuestas. Dicha capacidad está expresada por la discriminación de polarización cruzada (XPD). Antes de entrar en detalle sobre este parámetro, se explicará cómo está compuesta la señal de GRB.

Como se presentó en el Capítulo 2, las señales con polarización circular pueden representarse según lo visto en las Ecuaciones (2.3) y (2.4). Es importante destacar que para la polarización circular, los campos eléctricos en ambos ejes del plano son iguales. En otras palabras, se tiene que $E_x = E_y$. De esta forma, solo tenemos una única componente que representa el campo para cada polarización: E_{RHCP} y E_{LHCP} .

GRB consiste en la suma de ambas polarizaciones, por lo que se tiene:

$$\vec{E}_{GRB} = \vec{E}_{RHCP} + \vec{E}_{LHCP}. \quad (4.11)$$

Reemplazando las expresiones del campo para la señal RHCP y LHCP se obtiene:

$$\vec{E}_{GRB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{RHCP} + E_{LHCP}) \cos(\omega t) \hat{x} + \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{RHCP} - E_{LHCP}) \sin(\omega t) \hat{y}. \quad (4.12)$$

Por lo tanto, si recibiéramos la señal con una antena de polarización horizontal (alineada con $\hat{x}$) recibiríamos la suma de E_{LHCP} y E_{RHCP} . Es necesario, entonces, construir una antena capaz de separar ambas polarizaciones. En la práctica, ninguna antena puede lograr una separación ideal entre polarizaciones, de modo que siempre existirá un valor $\Delta \neq 0$ tal que tengamos interferencia en recepción:

$$E_{Rx,RHCP} = E_{RHCP} + E_{LHCP} \Delta_{RHCP}. \quad (4.13)$$

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

$$E_{Rx,LHCP} = E_{LHCP} + E_{RHCP}\Delta_{LHCP}. \quad (4.14)$$

En el caso de la antena con polarización horizontal, la interferencia sería total y no se podrá recibir GRB.

Considerando esto, el XPD se define como la relación entre la potencia de la polarización deseada (co-polarización) y la potencia de la polarización ortogonal no deseada (polarización cruzada). El XPD se mide por polarización, pues no tiene porque ser igual para ambas polarizaciones. El XPD para RHCP se puede calcular de la siguiente forma:

$$XPD_{RHCP} = 20 \log \left(\frac{P_{RHCP}}{P_{\Delta,LHCP}} \right). \quad (4.15)$$

Donde P_{RHCP} es la potencia recibida de la señal RHCP (la que nos interesa recibir) y $P_{\Delta,LHCP}$ es la potencia recibida de la señal LHCP (la que no nos interesa recibir). La expresión para el XPD de LHCP es análoga:

$$XPD_{LHCP} = 20 \log \left(\frac{P_{LHCP}}{P_{\Delta,RHCP}} \right). \quad (4.16)$$

Según la NOAA, el XPD debe superar los 27 dB para garantizar una adecuada separación entre las polarizaciones circular izquierda y circular derecha [11]. Si el XPD no es suficiente, ambas polarizaciones se mezclarán durante la recepción, generando interferencias que dificultan o impiden la correcta recepción de la señal GRB.

4.4.3. Especificaciones de GRB

Gracias a su alta tasa de datos, GRB puede transmitir todos los productos relevantes generados por el satélite. En la Tabla 4.5 se listan algunos de estos productos junto con el instrumento encargado de capturar la información.

Producto	Instrumento
Radiancia	ABI
Detección de Rayos	GLM
Imágenes Solares SUVI de Nivel 1b: EUV	SUVI

Tabla 4.5: Productos relevantes para el proyecto del servicio GRB junto a su instrumento de origen [57, p. 38].

Las 16 bandas de radiancia del ABI se encuentran distribuidas en las dos polarizaciones LHCP y RHCP.¹⁴ La Tabla 4.6 muestra la distribución de los distintos productos en las polarizaciones.

Es interesante notar que en ambas polarizaciones se distribuye información de GRB. Esto se hace considerando estaciones de recepción más pequeñas, las cuales puedan recibir solamente una polarización. La información de GRB incluye:

¹⁴Las bandas transmitidas por la polarización LHCP son similares a las provistas por el servicio GVAR de la serie anterior de satélites GOES (GOES-N), con el añadido de los canales 10 y 15.

4.4. GOES Rebroadcast (GRB)

Producto	Polarización
Información de GRB	LHCP
Radiancia: canales 2, 7, 8, 10, 14, 15, 16	
Información de GRB	RHCP
Radiancia: canales 1, 3, 4, 5, 6, 9, 11, 12, 13	
Detección de Rayos	
Imágenes Solares SUVI de Nivel 1b: EUV	

Tabla 4.6: Distribución de los productos relevantes para el proyecto del servicio GRB en cada polarización [57].

- Operaciones programadas.
- Estatus sobre el desempeño de ciertos procesos.
- Vectores de estado de órbita.
- Mensajes del administrador.

Además de transmitir una mayor cantidad de bandas, este servicio también transmite ciertos canales con una resolución espacial superior a la de HRIT. La Tabla 4.7 muestra la resolución espacial de cada banda transmitida por GRB.

Banda ABI	λ (μm)	Resolución espacial (km)
1	0,47	1
2	0,64	0,5
3	0,87	1
4	1,38	2
5	1,61	1
6	2,25	2
7	3,89	2
8	6,17	2
9	6,93	2
10	7,34	2
11	8,44	2
12	9,61	2
13	10,33	2
14	11,19	2
15	12,27	2
16	13,27	2

Tabla 4.7: Bandas del instrumento ABI junto a su resolución espacial para GRB [57].

Capítulo 4. Comunicaciones Satelitales

En definitiva, en esta sección se presentaron los satélites GOES y su funcionamiento, destacando sus instrumentos y los distintos productos satelitales que generan. Asimismo, se introdujeron los servicios a recibir en este proyecto: HRIT y GRB. De ambos se presentó la información que proveen, destacando de cada uno su enfoque principal. También se presentó información clave de la señal, como su tasa de bits, ancho de banda, frecuencia, tipo de señal, modulación y polarización, realizando un análisis justificando la elección de los distintos parámetros. Para el caso de GRB, debido a la complejidad del sistema, se realizó un análisis extra de los distintos requerimientos para recibir la señal, con el objetivo de dar una idea de qué se requiere para el sistema de recepción y cuáles serán los principales obstáculos en su implementación.

Considerando los parámetros presentados en esta sección y el análisis realizado para el sistema de GRB, en los próximos dos capítulos se describirán en detalle los sistemas de recepción implementados. Asimismo, se presentará la información recibida, realizando también un análisis del desempeño del sistema.

Capítulo 5

Recepción de High Rate Information Transmission (HRIT)

En este capítulo se presenta el diseño y la implementación del sistema de recepción para el servicio HRIT, así como los resultados obtenidos durante su operación. Todo el trabajo de recepción se llevó a cabo en la azotea de la FING, aprovechando su ubicación estratégica para la tarea de recepción satelital, ya que ofrece una vista despejada del cielo hacia el norte y el noreste. Esto permite tener una línea de vista directa hacia el satélite GOES-East sin obstrucciones ni interferencias significativas. Un aspecto destacable de esta tarea es su relativa baja complejidad, tanto en cuanto a los materiales utilizados como al conocimiento requerido para poner el sistema en funcionamiento. Se presenta, de este modo, una implementación de bajo costo que permite aplicar de manera práctica numerosos conceptos teóricos adquiridos a lo largo de la carrera.

5.1. Sistema de Recepción

El sistema de recepción implementado para HRIT puede describirse a partir de la Figura 5.1. En él, la antena capta la señal entrante, que luego pasa por un filtro y un amplificador. Finalmente, un SDR digitaliza la señal para su posterior procesamiento y decodificación en una PC.

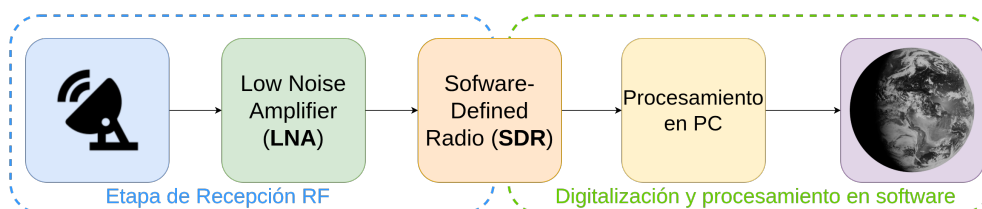


Figura 5.1: Diagrama del sistema de recepción utilizado para HRIT.

Capítulo 5. Recepción de High Rate Information Transmission (HRIT)

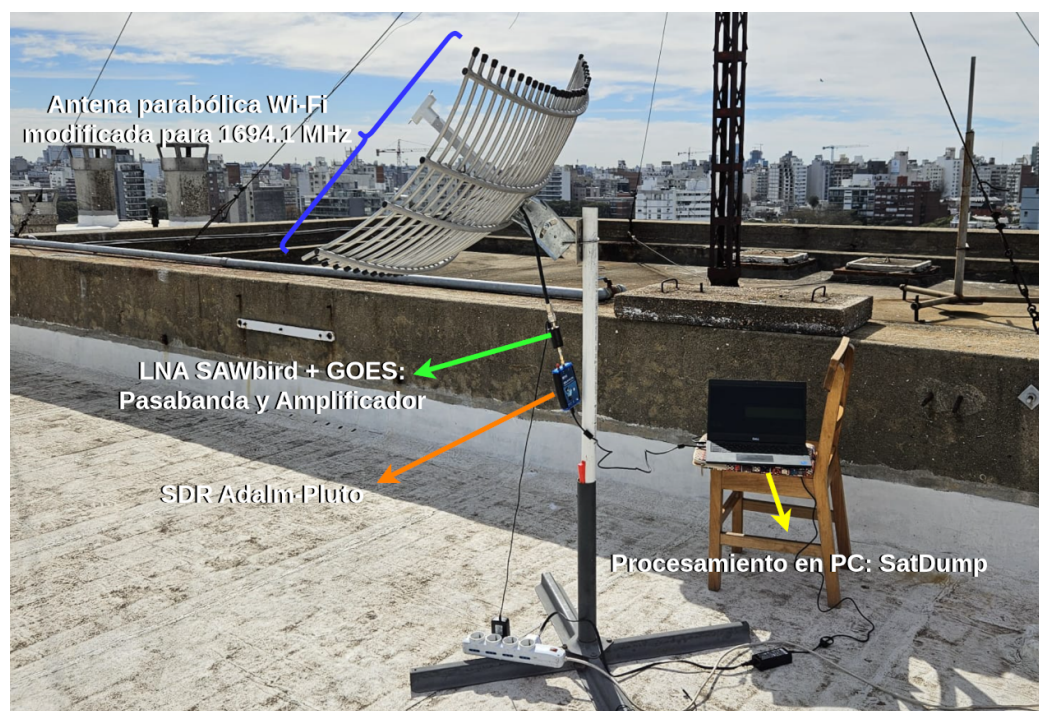


Figura 5.2: Sistema de recepción utilizado para HRIT en la azotea de la FING.

5.1.1. Estructura General del Sistema de Recepción

La implementación del sistema en la azotea de la facultad puede observarse en la Figura 5.2. Los componentes utilizados para cada función son los siguientes:

- **Antena:** Antena Parabólica de Wi-Fi modelo NPR08C240F de la empresa argentina NHC adaptada a la frecuencia central de HRIT (1694,1 MHz). La parábola es de 90 cm por 60 cm. Tiene una ganancia nominal de 24 dBi y originalmente su frecuencia de operación era de 2483,5 MHz. Se le realizaron modificaciones que disminuyeron su ganancia pero ajustaron su frecuencia, las cuáles serán explicadas más adelante.
- **Filtro + LNA:** Se utiliza el filtro LNA (pasabanda y amplificador) SAWbird + GOES de la marca Nooelec [58].
- **SDR:** Se utiliza el SDR Adalm Pluto de Analog Devices, el mismo modelo descrito en el Capítulo 3.
- **Procesamiento en PC:** Para ejecutar el software SatDump, responsable del procesamiento y decodificación de la señal, se emplea una computadora equipada con un procesador Intel i5-1145G7 de 8 núcleos, 8 GB de memoria RAM DDR4 y un disco NVMe de 256TB. Si bien estas son las características de la PC utilizada, el procesamiento de HRIT puede realizarse también en equipos con menor capacidad de cómputo.

5.1.2. Cálculo de Margen de Enlace

Un paso importante para poder evaluar la viabilidad del sistema a implementar es el cálculo del margen de enlace. El mismo permite estimar la calidad del desempeño del sistema. Un análisis completo de este asunto se detalla en el Apéndice 2.4. Los parámetros del sistema de HRIT son los siguientes:

- Potencia Irradiada Efectiva (EIRP): 56,7 dBm.¹
- Ganancia de la antena: Se estima en 19,5 dBi.
- Pérdida por propagación en espacio libre: 188,45 dB.²
- Pérdida por propagación en la atmósfera: 2 dB.³
- Potencia de ruido en el ancho de banda de la señal: -116,13 dBm.⁴

Por lo tanto, el cálculo del enlace puede realizarse de la forma que se ve en la siguiente ecuación:

$$C/N_{dB} = 56,7 \text{ dBm} - 188,45 \text{ dB} - 2 \text{ dB} + 19,5 \text{ dBi} + 116,13 \text{ dBm} = 1,89 \text{ dB}. \quad (5.1)$$

Para HRIT, el requerimiento mínimo de C/N es de 1,5 dB [2]. Por lo tanto, el margen de enlace para el sistema implementado puede estimarse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$C/N - C/N_{min} = 1,89 \text{ dB} - 1,5 \text{ dB} = 0,39 \text{ dB}. \quad (5.2)$$

El margen de enlace de 0,39 dB se considera razonable para el sistema implementado, dado que se trata de un sistema relativamente sencillo. Se utiliza una antena modificada para la recepción, por lo que su desempeño en términos de ganancia se ve reducido. Además, debe tenerse en cuenta que el alineamiento con el satélite no es perfecto, debido tanto a la ausencia de un sistema de fijación permanente como al factor humano involucrado en el apuntamiento de la antena.

5.1.3. Etapa de Recepción RF

Adaptación de Frecuencia

Dado que la antena que se utilizó estaba diseñada para operar en una frecuencia de Wi-Fi, 2843,5 MHz, resultó necesario modificarla para poder trabajar en la

¹Dato extraído del documento de la NOAA *Link Budget for GRB on GOES-R Series Satellites to User Stations* [59].

²Surge de aplicar la fórmula de Friis (Ecuación (2.11) del Apéndice 2.4) para $r = 37\,441 \text{ km}$ y $f = 1694,1 \text{ MHz}$.

³Valor estimado a partir de la información sobre la influencia de la atmósfera en la propagación, según el libro *Satellite Communication Systems: Systems, Techniques and Technology* [19]. Considera también el efecto de la lluvia mediante recomendaciones de la ITU (International Telecommunication Union) [60].

⁴El cálculo se detalla en el Apéndice 2.4.

Capítulo 5. Recepción de High Rate Information Transmission (HRIT)

frecuencia del servicio HRIT, que es de 1694,1 MHz. La antena utiliza un dipolo, el tipo de elemento que fue descrito en el Capítulo 2. Originalmente, el dipolo tenía una longitud total de 0,053 m. Esta longitud no permite un desempeño adecuado, ya que la antena no presenta resonancia en la frecuencia de interés. Debido a las características del dipolo, al ajustar su longitud a la frecuencia de operación, también se adapta su impedancia a un valor real (cercano a los $50\ \Omega$).

Para ajustar el dipolo a la frecuencia de HRIT, se debe alargar su longitud. Esta tarea se realiza midiendo el parámetro SWR (S_{11}) en la frecuencia central de HRIT, a la vez que se le sueldan segmentos de cobre al dipolo existente, hasta alcanzar un valor aceptable, que usualmente se considera entre 1 y 2. El largo final del dipolo es de 0,088 m. En la Figura 5.3 se pueden apreciar los resultados de las medidas tomadas con el VNA. En azul se muestran los resultados para el dipolo de la antena sin modificar y en verde luego de la modificación. En naranja se resalta la frecuencia de HRIT.

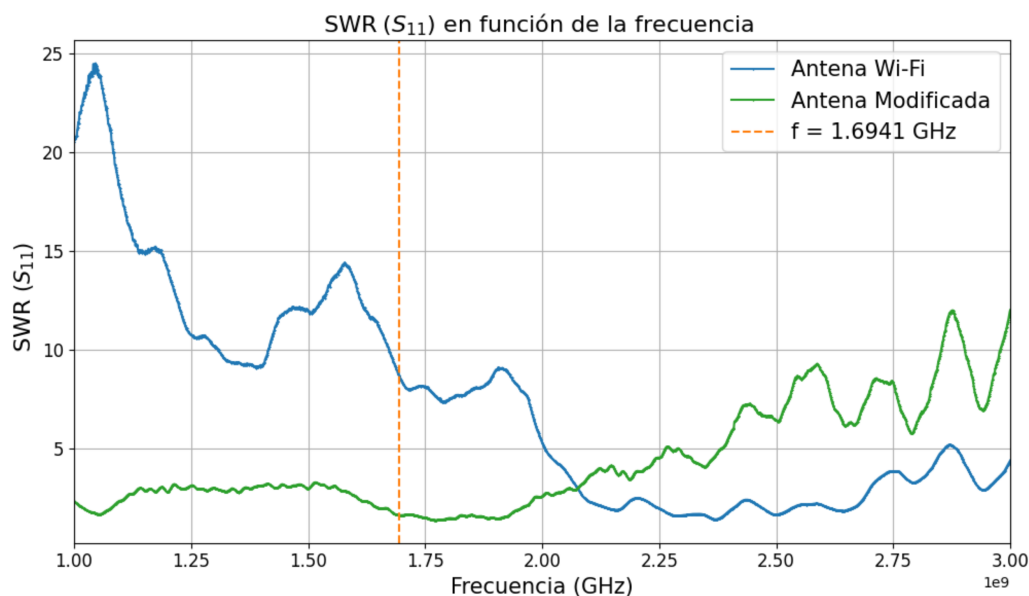


Figura 5.3: Medidas del SWR (S_{11}) del dipolo tomadas con el VNA.

La antena tenía originalmente un SWR (S_{11}) de 8,7. El ajuste de la longitud del dipolo permitió alcanzar un SWR (S_{11}) de 1,6.

Corriente de Modo Común

Un problema frecuente en este tipo de sistemas es el causado por la corriente de modo común [61]. Este fenómeno ocurre cuando la señal balanceada del dipolo, que se transmite a través del cable coaxial, no es correctamente adaptada para el SDR, el cual trabaja con señales desbalanceadas.⁵ Este problema se ejemplifica en

⁵Una señal balanceada es aquella donde ambos conductores llevan una señal con igual amplitud pero polaridad opuesta, como ocurre en un dipolo. Una señal desbalanceada es

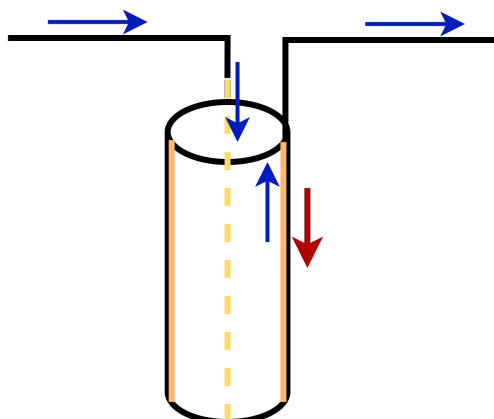


Figura 5.4: Efecto de la corriente de modo común, que se simboliza en rojo, en una antena dipolo.

la Figura 5.4, donde se aprecia cómo la corriente de modo común se está filtrando hacia la carga conectada al dipolo, en este caso el SDR. Como resultado, se generan interferencias y pérdida de rendimiento.

Este problema se manifestó a la hora de probar el sistema, notamos que en estas condiciones no se lograba decodificar la señal de HRIT, pero si sujetábamos el cable coaxial con la mano sí era capaz de hacerlo. Lo que estaba sucediendo es que nuestro cuerpo estaba actuando como una referencia de tierra adicional para el sistema, permitiendo el correcto funcionamiento del mismo. La solución a este problema consiste en utilizar un Pawsey Stub [62], que adapta la señal del dipolo al formato desbalanceado esperado por el SDR. Este elemento consiste en un segmento de cable coaxial de longitud $\lambda/4$ que, al introducir una impedancia alta en la frecuencia de trabajo, permite filtrar la corriente de modo común que circula hacia el SDR.⁶

Dipolo Modificado

En la Figura 5.5 se muestra el dipolo modificado del sistema de recepción de HRIT, instalado en la azotea de la FING.

Filtrado y Amplificación

Se utilizó el modelo SAWbird + GOES de Nooelec, el cual integra en cascada un filtro y un LNA. El mismo tiene una frecuencia central de 1688 MHz con un ancho de banda de 3 dB de 80 MHz [58]. Resulta entonces adecuado tanto para

aquella donde un conductor lleva la señal y el otro está conectado a tierra, como en un cable coaxial donde el conductor central porta la señal y la malla exterior actúa como referencia a tierra.

⁶La longitud se calcula considerando la longitud de onda en el vacío. No se aplica el factor de velocidad del cable coaxial ya que, en el stub, los campos electromagnéticos se propagan principalmente en el aire [62].

Capítulo 5. Recepción de High Rate Information Transmission (HRIT)



Figura 5.5: Dipolo utilizado para el sistema de recepción de HRIT, adaptado en frecuencia y con balun.

la recepción de GRB (cuya frecuencia central es 1686,6 MHz) como para la de HRIT (centrado en 1694,1 MHz). Dado que es un componente activo, requiere una fuente de alimentación externa que le pueda proveer 140 mA. En la instalación implementada se utilizó un cargador de celular con las siguientes características:

- Voltaje: 5 V.
- Corriente: Hasta 2,5 A.
- El transformador proporciona aislación galvánica.⁷

Orientación de la Antena

El satélite GOES-East se ubica en la posición orbital de $75,2^\circ$, para la tarea de apuntar la antena al satélite, se utilizó la aplicación de celular *Satellite Director* [63]. Este programa permite realizar la tarea de apuntar la antena al satélite considerando la ubicación del usuario. Por lo tanto, permite conocer los ángulos de elevación y posición de la antena. El procedimiento recomendado por los desarrolladores de la misma es el siguiente:

1. Calibrar el GPS del celular que se esté utilizando. Este punto resulta importante para que las indicaciones de direcciones que proporciona el programa sean válidas.
2. Posicionar el celular en paralelo con el feed de la antena y buscar el ángulo del satélite. En el caso de GOES-East, son los $75,2^\circ\text{W}$. Para el caso de Uruguay, este ángulo es de 329° , esta tarea puede verse en la Figura 5.6.⁸
3. Luego se debe levantar la antena hasta encontrar el ángulo de elevación. Para Uruguay, y el satélite GOES-East, el ángulo requerido es de $44,7^\circ$, lo que puede apreciarse en la Figura 5.7.

⁷La aislación galvánica consiste en la separación eléctrica entre dos circuitos, permitiendo la transferencia de energía o señales sin conexión eléctrica directa, proporcionando protección contra diferencias de potencial y ruido eléctrico.

⁸Esto considerando el norte como 0° .

5.1. Sistema de Recepción

4. Verificar la recepción con un analizador de espectro y realizar pequeños ajustes hasta encontrar la mayor amplitud de señal.

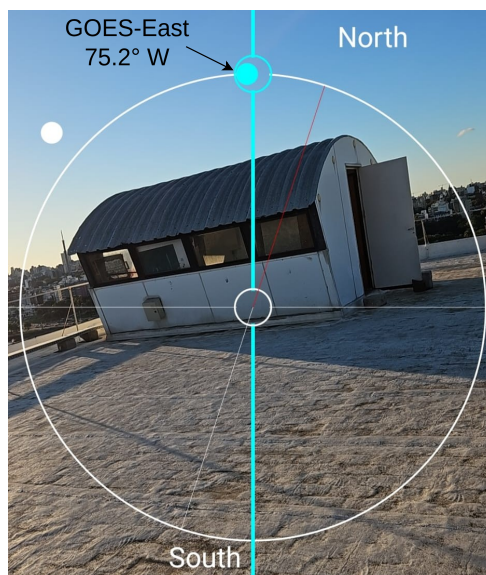


Figura 5.6: Foto desde el punto de vista de la antena empleada para HRIT en la azotea de la FING, indicando la ubicación del satélite GOES-East en el cielo, con el programa *Satellite Director*.

5.1.4. Digitalización y Procesamiento en Software

Considerando el ancho de banda de HRIT (1,205 MHz), la configuración empleada es la siguiente:

- **Resolución de las muestras:** Se utilizó el formato CF32, el cual utiliza 32 bits para representar muestras IQ.
- **Frecuencia de muestreo:** 3,5 Msps.
- **Frecuencia central (de HRIT):** 1694,1 MHz.

Esto significa que se están escribiendo la siguiente cantidad de muestras por segundo:

$$3,5 \text{ Msps} \times 32 \text{ bits por muestra} = 112 \text{ Mbps.} \quad (5.3)$$

Esta tasa no significa un problema, ni para la capacidad de comunicación del estándar USB 2.0, ni para la escritura en la PC. Por lo tanto, es posible obtener las muestras del espectro y realizar el procesamiento en SatDump en tiempo real.

El ajuste de ganancia del Adalm-Pluto más adecuado para esta situación es el modo *Slow Gain*, ya que la señal a recibir se mantiene estable en el tiempo y no presenta variaciones bruscas en su amplitud. El sistema de procesamiento y decodificación de HRIT que incluye SatDump admite las siguientes opciones:

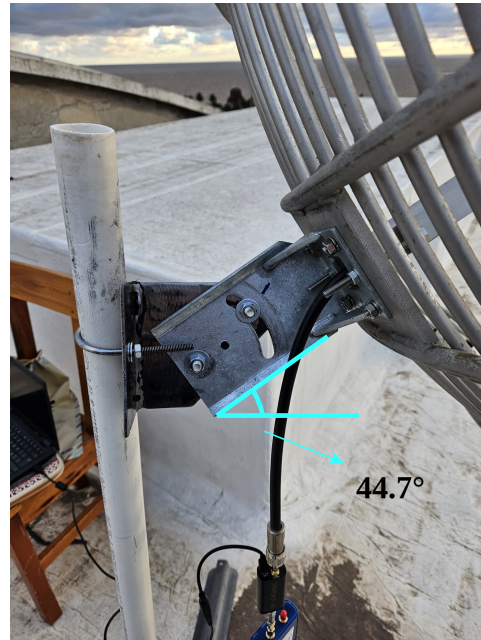


Figura 5.7: Montaje de la antena parabólica de Wi-Fi en el sistema de HRIT para alcanzar el ángulo de elevación del satélite, de $44,7^\circ$.

- **Fill missing data:** Corrige artefactos que se forman en las imágenes al tener interrupciones en la señal recibida.
- **Parse DCS:** Permite optar por decodificar los mensajes DCS, provistos por diversas estaciones meteorológicas en Norteamérica.
- **Tracked DCS Addresses:** Permite elegir decodificar ciertos mensajes DCS de algunas estaciones en particular.

El procesamiento que este sistema le hace a las muestras se puede apreciar en la Figura 5.8. En el diagrama se emplean los siguientes bloques:

- **Automatic Gain Control (AGC):** Permite realizar el control de ganancia de la señal recibida, de forma que tenga una amplitud constante.
- **Squared Root-Raised Cosine (SRRC):** Corresponde al pulso conformador de la señal. En el caso de HRIT se emplea un factor de desplazamiento, $\beta = 0,35$ y una tasa de datos de 0,927 Msps.
- **Carrier Sync:** Sincronización de frecuencia. En este caso se usa una implementación similar al Costas Loop [64]. Es un circuito realimentado que permite sincronizar la frecuencia de la señal recibida.
- **Clock Recovery:** Realiza la sincronización temporal. Es una implementación del método Mueller y Mueller [65].

5.1. Sistema de Recepción

- **CCSDS Convolutional Concatenated Decoder:** Se encarga de obtener los bits que representan la información a partir de la secuencia de símbolos enviada. El mismo emplea el algoritmo de Viterbi [66].⁹ Este bloque toma decisiones basadas en verosimilitud, lo que permite corregir errores sobre los bits recibidos.
- **HRIT Data Decoder:** Genera los productos que se transmiten con HRIT a partir de los bits decodificados.

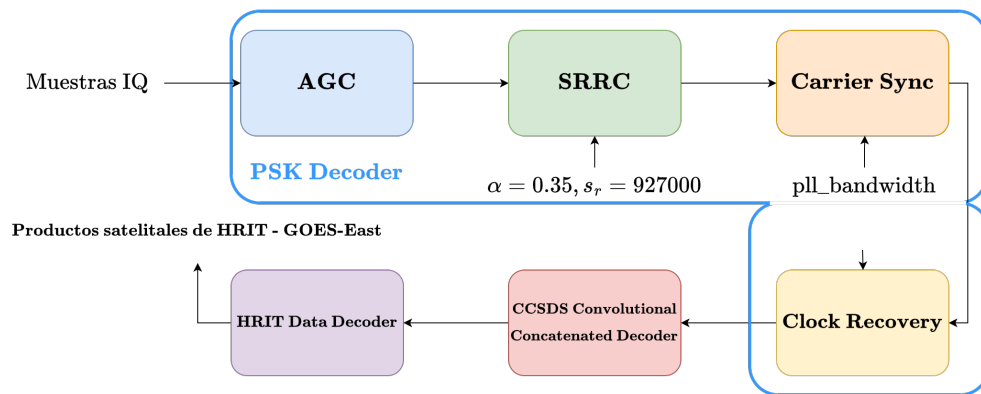


Figura 5.8: Diagrama del procesamiento que hace SatDump para la decodificación de los datos provistos por HRIT.

Los bloques AGC, SRRC, Carrier Sync y Clock Recovery conforman un único bloque de procesamiento denominado *PSK Decoder*. Esto se debe a que se trata de la misma implementación utilizada para otros sistemas PSK (QPSK, 8-PSK, 16-PSK) que tienen soporte en SatDump. Sin embargo, este bloque no es aplicable para la decodificación de GRB a pesar de que emplea QPSK, ya que utiliza una modulación basada en el estándar de transmisiones satelitales DVB-S2.

El parámetro configurable más relevante del sistema es:

- **Carrier Sync:** Por defecto, emplea un valor de `pll_bw` (ancho de banda de bucle) de 0,02, para la sincronización de frecuencia. Permite ajustar la capacidad del sistema para seguir los cambios en la frecuencia de la señal recibida. Un valor más pequeño otorga una respuesta más estable mientras que valores más grandes permiten seguir cambios más rápidos en la frecuencia. No fue necesario modificarlo para lograr una correcta recepción.

⁹Este bloque debe su nombre al formato de transmisión empleado por HIRT. Se utiliza el Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) Data Space Protocol para los datos transmitidos por HRIT.

5.2. Resultados Obtenidos de HRIT

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos con el sistema montado en la azotea de la FING para la recepción de HRIT. Asimismo, se analizará el desempeño del sistema comentando distintos parámetros relevantes para evaluarlo.

5.2.1. Desempeño General del Sistema

En términos generales, el sistema tiene un desempeño aceptable, capaz de recibir la señal con amplitud constante y una relación señal-ruido (SNR) así como una relación de Energía de Bit sobre potencial del ruido (E_B/N_0) suficiente como para sintonizar la portadora. Como calculamos antes, el sistema cuenta con un margen de enlace reducido, por lo que algunas variaciones en las condiciones del canal, como interferencias o desalineaciones menores en la antena, pueden afectar negativamente la estabilidad de la recepción. Aún así, si la antena se posiciona de manera correcta y se fija en su lugar, el sistema logra funcionar de manera adecuada.

En la Figura 5.9, se puede apreciar el espectro recibido con el sistema implementado. Considerando las distintas mejoras que se realizaron en el sistema, en estas condiciones, la recepción es estable en gran parte debido a la gran capacidad de corrección de errores de la señal. Recordemos que emplea una tasa de codificación de $\frac{1}{2}$, lo que equivale a que la mitad de los bits enviados son para la corrección de errores.

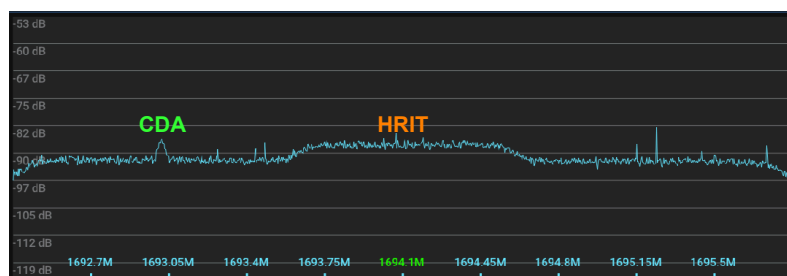


Figura 5.9: Espectro recibido con el sistema implementado para HRIT desde la azotea de la FING.

Con respecto al desempeño del sistema, SatDump reporta como métricas del desempeño valores de la estimación del (SNR) empleando el método del Segundo y Cuarto Momento. SatDump reporta el valor actual, el promedio y el pico de esta medida. En la Tabla 5.1, se pueden apreciar los valores de estas estimaciones obtenidos durante las distintas etapas de la recepción de HRIT junto a valores de E_B/N_0 . Información adicional sobre cómo SatDump estima el SNR se encuentra en el Apéndice C.

La constelación recibida puede apreciarse en la Figura 5.10, donde también se ven las medidas estimadas de SNR que computa SatDump.

5.2. Resultados Obtenidos de HRIT

Etapa	SNR Medio	SNR Pico	E_B/N_0 Medio
Inicial - Sin modificaciones	0,1 dB	0,9 dB	1,24 dB
Modificación dipolo	1,1 dB	2,9 dB	2,24 dB
Agregado del balun	2,1 dB	3,7 dB	3,24 dB

Tabla 5.1: Estimación del SNR y de E_B/N_0 de las muestras obtenidas con el sistema de HRIT durante sus distintas mejoras.

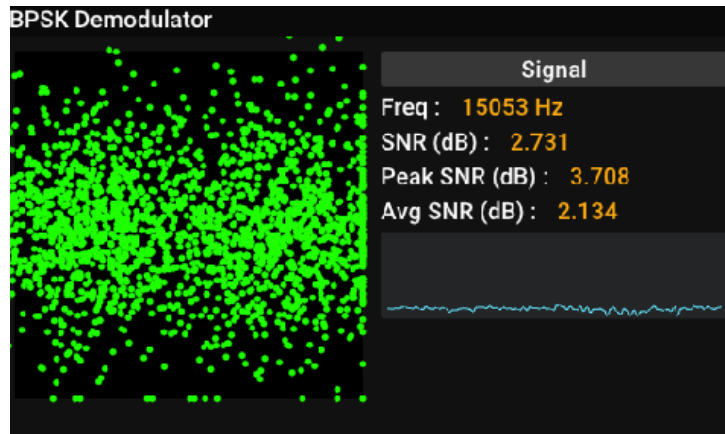


Figura 5.10: Constelación recibida con el sistema implementado para HRIT.

5.2.2. Imágenes de Disco Completo - GOES-East

Como se mencionó anteriormente, HRIT transmite varios productos además de imágenes de la superficie terrestre. En esta sección se presentan algunos ejemplos de productos de una transmisión completa de HRIT, con fecha 23 de diciembre de 2024 a las 10:22. La totalidad de los productos recibidos se muestra en el Apéndice D.

En la Figura 5.11, se presenta una composición en falso color generada por SatDump, que combina los canales 2, 7 y 13. Como se podrá ver en el Apéndice D, las imágenes de cada banda están en escala de grises, por lo que de esta forma se logra obtener una imagen a color, más fácilmente observable por el ojo humano. Además, la composición incorpora información de los canales 14 y 15 para mejorar el contraste en las zonas menos iluminadas. De esta forma es que se puede observar en la imagen las luces nocturnas en Norteamérica.¹⁰

5.2.3. Gráficos del EMWIN

En esta sección se presenta el otro tipo de información que se transmite a través del servicio HRIT, distinta de las imágenes de la superficie terrestre. En particular, se trata de información como la que se muestra en la Figura 5.12: un

¹⁰Recordemos que la foto es de las 10:00 AM de Uruguay, que corresponde a las 6:00 AM en la costa Oeste de EE.UU. y que la foto fue tomada en diciembre.

Capítulo 5. Recepción de High Rate Information Transmission (HRIT)



Figura 5.11: Composición falso color en base a imágenes de GOES-East.

mapa de radar para EE.UU. generado por el NWS, mostrando zonas de alertas de tormentas severas, posiblemente de nieve en la zona noreste del país. En ocasiones, también se incluyen otras regiones como Alaska, Puerto Rico o Hawái.

A continuación incluimos un fragmento de reporte del clima para la mañana del lunes 23 de diciembre de 2024 en la ciudad de Nueva York, EE.UU. transmitido también por HRIT:

Regional Weather Roundup

National Weather Service New York NY

900 AM EST MON DEC 23 2024

Note: "FAIR" indicates few or no clouds below 12,000 feet with no significant weather and/or obstructions to visibility.

NYZ071-072-176-178-NJZ106-104-231500-

5.2. Resultados Obtenidos de HRIT

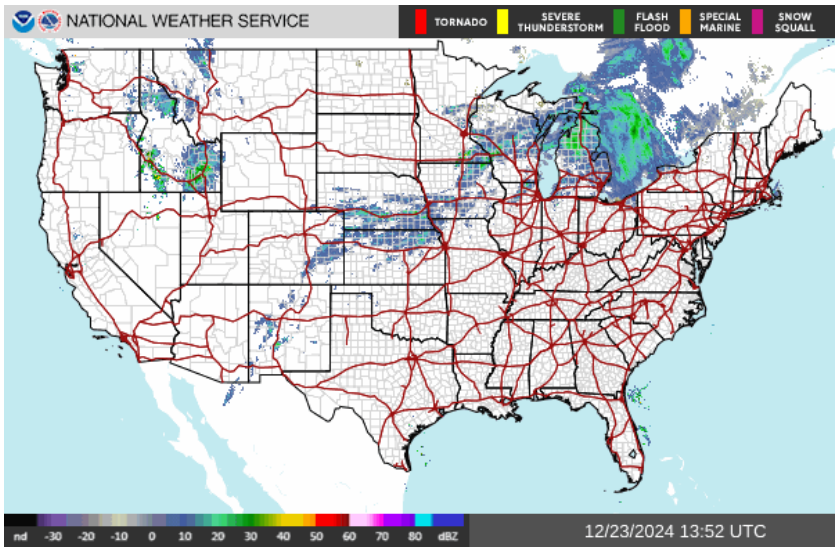


Figura 5.12: Mapa de radar para EE.UU. el 23 de diciembre de 2024 a las 10:52 de Uruguay.

New York City Metro Area

CITY	SKY/WX	TMP	DP	RH	WIND	PRES	REMARKS
Central Park	MOSUNNY	16	3	56	CALM	30.68R	
World Trd Ctr	NOT AVBL						
Bronx Lehman C	N/A	14	1	57	NE3	N/A	
LaGuardia Arpt	MOSUNNY	17	4	56	VRB3	30.67S	
Queens College	N/A	18	9	68	NE2	N/A	
Kennedy Intl	MOSUNNY	19	8	62	N5	30.68S	WCI 12
Breezy Point	N/A	N/A	N/A	N/A	N3	N/A	
Brooklyn Coll	N/A	18	5	57	N2	N/A	
Staten Island	N/A	16	7	67	N2	N/A	
Newark/Liberty	MOSUNNY	16	3	56	NE3	30.68R	
Teterboro	MOSUNNY	13	1	59	N6	30.67S	WCI 4

Capítulo 5. Recepción de High Rate Information Transmission (HRIT)

Notar que las temperaturas están en grados Fahrenheit, por ejemplo los 19 °F en *Kennedy Intl* (Aeropuerto Internacional John F. Kennedy) corresponden a aproximadamente $-7,2^{\circ}\text{C}$.¹¹

5.2.4. Gráficos del NWS

Finalmente, los últimos datos que se incluyen en la transmisión de HRIT son los gráficos del Servicio Meteorológico Nacional (NWS) de EE.UU. Algunos ejemplos son:

- Figura 5.13: Análisis de superficie meteorológica para la región del Pacífico, correspondiente al período 23-24 de diciembre de 2024. Se utiliza para analizar y pronosticar patrones de presión atmosférica [68].
- Figura 5.14: Pronóstico de período y dirección de olas a 48 horas para el Pacífico oriental, válido entre el 23 y el 25 de diciembre de 2024. Muestra el pronóstico del período dominante de las olas (en segundos) y su dirección de propagación, utilizada para análisis de condiciones marítimas y apoyo a operaciones navales y costeras [69].
- Figura 5.15: Pronóstico cromático de período y dirección de olas a 48 horas para el Atlántico Norte y Golfo de México, válido entre el 23 y el 25 de diciembre de 2024. Facilita la identificación de zonas con diferentes características de oleaje, donde los colores fríos (azules) representan períodos cortos y los colores cálidos (rojos/naranjas) indican períodos más largos de olas [69].

En resumen, en esta sección se presentó el sistema diseñado para la recepción de HRIT. Se describió el esquema básico del sistema y cada uno de los componentes empleados. Luego se realizó un análisis del margen de enlace, lo que permitió anticipar el desempeño esperado del sistema. Asimismo, se expusieron los problemas encontrados durante la recepción y se explicó cómo fueron solucionados. Finalmente, se mostraron los resultados obtenidos y se realizó un análisis detallado de su desempeño y del funcionamiento general del sistema.

El sistema desarrollado para la recepción de HRIT cumple adecuadamente con los objetivos planteados, logrando recibir el servicio de forma estable y confiable. Su carácter sencillo y funcional permitió una aproximación directa a los conceptos aprendidos en diversas materias de la carrera de ingeniería, integrándolos en una experiencia práctica que refuerza el aprendizaje teórico. Por ello, consideramos que este proyecto no solo resulta valioso para nuestra formación, sino que también puede constituir una instancia enriquecedora para otros estudiantes que se enfrenten a desafíos similares. En particular, podría ser de utilidad para el curso introductorio del Taller de Introducción a la Ingeniería Eléctrica [8].

¹¹Estas temperaturas son inusualmente bajas para Nueva York (23 de diciembre), y se debieron al ingreso de una masa de aire frío a la región en ese momento [67].

5.2. Resultados Obtenidos de HRIT

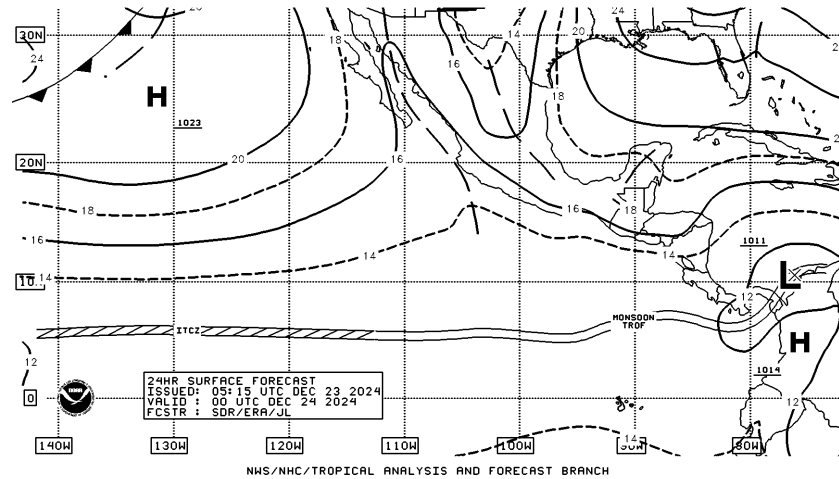


Figura 5.13: Gráfico del NWS: análisis de superficie meteorológica para la región del Pacífico, correspondiente al período 23-24 de diciembre de 2024.

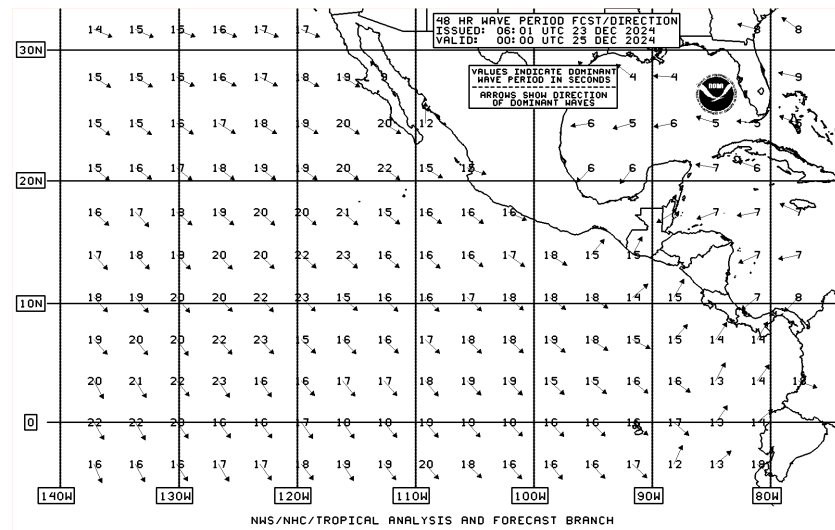


Figura 5.14: Gráfico del NWS: pronóstico de período y dirección de olas a 48 horas para el Pacífico oriental, válido entre el 23 y el 25 de diciembre de 2024.

Capítulo 5. Recepción de High Rate Information Transmission (HRIT)

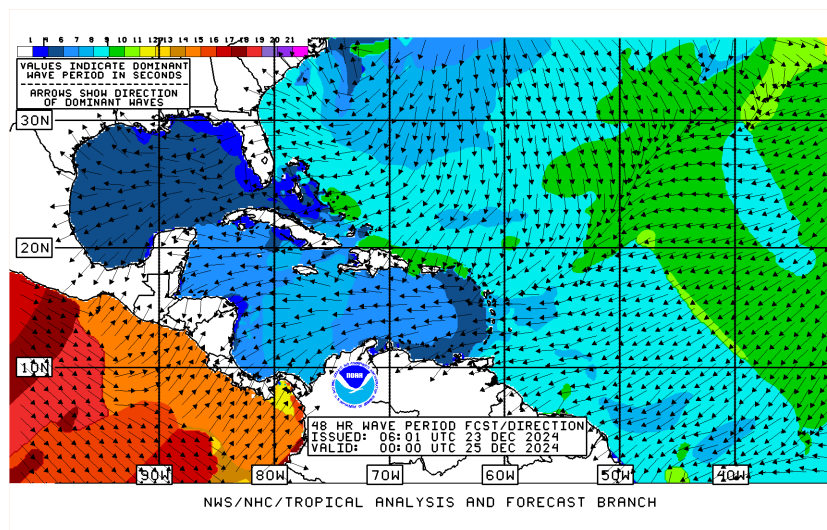


Figura 5.15: Gráfico del NWS: pronóstico cromático de período y dirección de olas a 48 horas para el Atlántico Norte y Golfo de México, válido entre el 23 y el 25 de diciembre de 2024.

Capítulo 6

Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

Con respecto a los requerimientos de equipamiento, la recepción de GRB es la más compleja de los servicios proporcionados por el satélite GOES-East. El mismo retransmite la totalidad de la información de acceso público capturada por el satélite, lo que implica un volumen de datos considerablemente superior comparado con HRIT. Esta mayor cantidad de información se traduce en un incremento de la complejidad de la señal, exigiendo un sistema de recepción notablemente más sofisticado que el empleado para el servicio HRIT.

En este capítulo se comienza por presentar el diseño general de un sistema de recepción de GRB. Luego, se describe en detalle la implementación realizada, destacando los componentes clave de cada parte del sistema. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos con el sistema desarrollado, resaltando los parámetros y condiciones más importantes para su correcto funcionamiento.

6.1. Diseño del Sistema de Recepción de GRB

Antes de presentar el diseño del sistema GRB implementado, se describirá un sistema de recepción general para GRB. La Figura 6.1 muestra un diagrama de bloques. Este sistema es capaz de recibir las polarizaciones circulares derecha e izquierda en simultáneo, obteniendo así la totalidad de la información transmitida por el servicio. En caso de no necesitarse ambas polarizaciones en simultáneo, se podría emplear el mismo sistema pero recibiendo solamente una polarización. Para ambos casos es importante recordar que, como se mencionó en el Capítulo 4, la aislación cruzada entre puertos del feed debe ser suficiente para poder separar ambas polarizaciones de manera exitosa.

El sistema de recepción de GRB se separa en cuatro etapas. A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

- **Antena con Feed para Polarización Circular:** Se debe utilizar una antena parabólica con suficiente ganancia para recibir GRB. Además, como

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

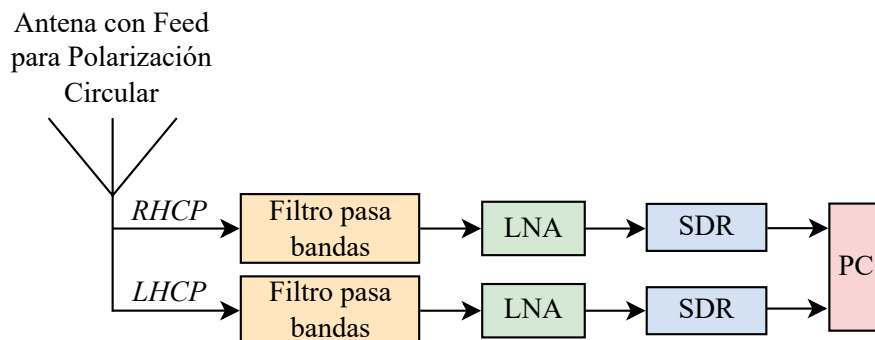


Figura 6.1: Diagrama de un sistema de recepción de GRB general para ambas polarizaciones basado en SDR.

se mencionó en el Capítulo 4, se debe contar con un feed para polarización doble circular, el cual tenga la suficiente aislación cruzada entre puertos para recibir GRB.

- **Filtro Pasabanda:** Es un filtro pre-selector, se encarga de bloquear señales fuera de la banda útil antes de que pase al amplificador, evitando posibles interferencias.
- **LNA:** Para lograr recibir GRB con un SNR adecuado, la señal es amplificada con un LNA. Debido a la gran distancia entre la antena y el satélite, la señal recibida tiene una potencia muy baja, por lo que requiere una amplificación considerable. Esto puede llevar al amplificador a operar en régimen no-lineal, lo que hace fundamental el uso de un filtro que evite la generación de productos de intermodulación en la frecuencia de interés.
- **SDR:** La señal es digitalizada y llevada a bandabase por el SDR. El SDR debe ser capaz de sintonizar la frecuencia 1686,6 MHz y cubrir un ancho de banda igual o mayor a 10,9 MHz [11]. Además, la interfaz de red o comunicación serial del SDR debe ser capaz de transmitir a una tasa de datos suficiente; en este sentido, una conexión USB 3.0 o de mayor velocidad es suficiente para que no se pierdan datos durante la transferencia.
- **PC:** La señal, digitalizada por el SDR, es transmitida a una computadora. Esta computadora se encarga de procesar y generar los distintos datos satelitales de la señal recibida. Debido a la gran cantidad de información recibida, la computadora debe ser capaz de manejar altas tasas de transmisión de datos; de lo contrario, pueden producirse pérdidas por desbordamiento de muestras durante la recepción. Se empleó un equipo con mayores prestaciones que el usado para HRIT. El mismo está equipado con un procesador Intel i7-1355U de 12 núcleos, 32 GB de memoria RAM DDR5 y un disco NVMe de 1 TB. Para evitar perder muestras, es recomendable contar con un disco de estado sólido (SSD), los cuales tienen una mayor velocidad de

escritura que los discos duros (HDD). GRB transmite de 1,5 TB a 2 TB de datos por día [56], por lo que es recomendable contar con un amplio espacio de almacenamiento si se desea grabar o guardar los datos recibidos de la señal.

6.2. Feed de Polarización Doble Circular

GRB utiliza una polarización circular doble (RHCP y LHCP) para su transmisión. Ambas polarizaciones están superpuestas en el mismo espectro, por lo que es necesario contar con un alimentador capaz de recibir y separar estas polarizaciones. Las dos polarizaciones de GRB son independientes y transmiten información distinta. De esta manera, si no se necesita toda la información transmitida por GRB, no es necesario recibir ambas polarizaciones en simultáneo.

Para recibir la totalidad de la información de GRB, se decidió trabajar con un feed capaz de recibir ambas polarizaciones. Asimismo, tal como se comentó en la Sección 4.4, debe tener un Cross-Polarization Discrimination (Discriminación de polarización cruzada) (XPD) mayor o igual a 27 dB. La NOAA tiene una amplia lista de fabricantes recomendados, entre los que se encuentran disponibles feeds de polarización doble circular [70]. Sin embargo, esto presenta un problema: la mayoría de estos feeds son costosos o no se fabrican de forma constante.

Los alimentadores de polarización doble circular, especialmente en la banda en la que opera GRB (la banda L), no son muy comunes.¹ Debido a sus elevados costos, comprar un alimentador profesional, no era una opción viable. Al inicio, se evaluó la posibilidad de pedir prestado un feed con estas características. Para ello, se tomó contacto con Inumet, organismo que ha contado anteriormente con equipos para la recepción de satélites meteorológicos. También se contactó con Antel, en particular con los técnicos de la Estación Terrena ubicada en Manga, quienes reciben diariamente diversos servicios satelitales, sobre todo de televisión. En ambos casos, no fue posible conseguir un alimentador con las características requeridas. Inumet disponía de equipamiento para montar un sistema de recepción, pero orientado a otro satélite que opera en una frecuencia lejana a la de GRB. En el caso de la Estación Terrena de Antel, al estar enfocada principalmente en servicios de televisión, no contaban con alimentadores de polarización circular que operaran cerca de la frecuencia de la señal.

De este modo, la única alternativa viable fue construir nuestro propio alimentador de polarización circular, diseñado específicamente para operar en la frecuencia del GRB. En esta sección se presenta el septum feed, el alimentador utilizado para la recepción de dicha señal. Se explica su principio de funcionamiento y se detalla el diseño. Además, se incluyen simulaciones que respaldan su desempeño, junto con el modelo construido y los distintos ajustes aplicados para mejorar su funcionamiento. Finalmente, se analizan otras dos alternativas consideradas, explicando

¹Para aplicaciones de comunicaciones satelitales, como se detalló en el Capítulo 4, las frecuencias más comunes suelen ser en la banda C o Ku (especialmente en satélites de televisión).

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

por qué fueron descartadas en favor del septum feed.

6.2.1. Septum Feed

El septum feed es un alimentador de polarización doble circular diseñado en el año 1973 por M. Wi Chen y G. N. Tsandoulas [71]. Está compuesto por un radiador cuadrado, al cual le sigue una guía de onda rectangular. Luego, dicha guía de onda es partida verticalmente en dos partes iguales por un polarizador, quedando dos guías de onda rectangulares más pequeñas. Finalmente, se ubican dos conectores, uno en cada guía de onda, los cuales se encargan de adaptar la señal a un cable coaxial. A la salida de estos dos cables tenemos las señales RHCP y LHCP.

La parte más importante del septum feed es el polarizador, pues es el encargado de separar las polarizaciones RHCP y LHCP, permitiendo así su recepción. Como se ve en las ecuaciones (2.3) y (2.4), las señales con polarización circular, ya sea RHCP o LHCP, pueden descomponerse en dos componentes lineales superpuestas: una vertical y otra horizontal. Por ejemplo, una señal RHCP se puede descomponer en dos componentes lineales desfasadas 90° . En la Figura 6.2 se presenta dicha descomposición para una señal RHCP (siendo E_h el componente horizontal y E_v el vertical), indicando también los nombres de cada puerto. Tradicionalmente, considerando una vista frontal del alimentador, se le llama Rx al puerto del lado derecho y Tx el del izquierdo.

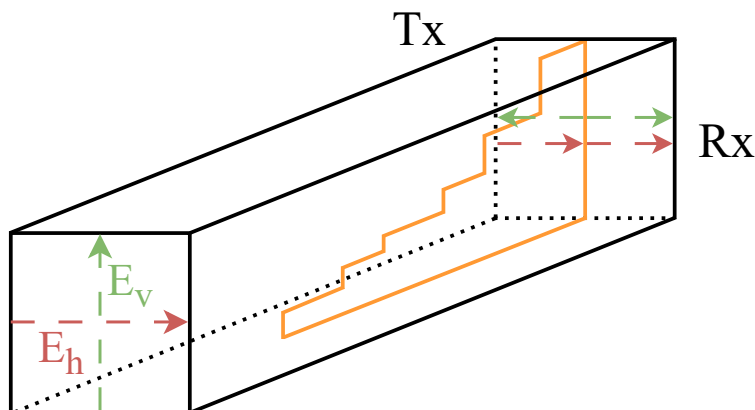


Figura 6.2: Funcionamiento del polarizador del septum feed para una señal con polarización RHCP. E_h representa el componente horizontal del campo eléctrico y E_v el componente vertical.

La componente horizontal es dividida en ganancia a la mitad por el polarizador, manteniendo la misma fase. De igual manera, la componente vertical es modificada por el polarizador y partida en dos partes iguales, pero su fase es modificada. Ambas componentes sufren atrasos distintos. La componente que va hacia el puerto Rx sufre un atraso de 90° , mientras que la componente que va hacia el puerto Tx

6.2. Feed de Polarización Doble Circular

sufre un adelanto de 90° [72]. Entonces, en un puerto tendremos la suma de ambas componentes, recuperando la señal, y en el otro la resta, aislándolo de ella. Para una señal RHCP, las componentes se suman en el puerto Rx y se cancelan en el Tx. Para una señal LHCP las componentes se suman en el puerto Tx y se cancelan en el Rx [72].

A diferencia de otros dispositivos de polarización circular, el septum feed permite recibir simultáneamente ambas polarizaciones circulares, a través de los dos conectores. Existen múltiples variantes del alimentador, cada una con sus diferentes ventajas y desventajas. Con la que se trabajará en este proyecto es la del radioaficionado OK1DFC, la cual tiene un polarizador en forma de escalera y una guía de onda rectangular [73]. Este diseño cuenta con un buen valor de XPD, siendo al mismo tiempo de las variantes menos complejas de construir. La Figura 6.3 muestra el diseño de la variante OK1DFC del septum feed, destacando las diferentes partes del alimentador.

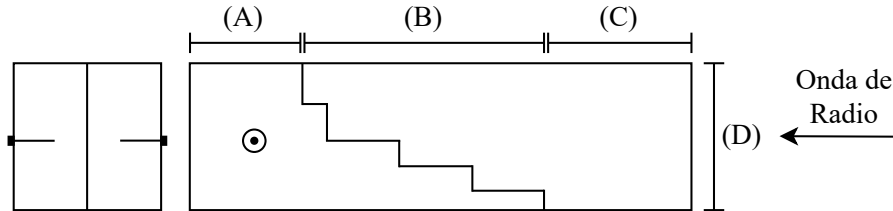


Figura 6.3: Representación esquemática de la variante de OK1DFC del septum feed, indicando sus componentes principales. Se presenta la vista frontal (izquierda) y lateral (derecha).

Aunque su construcción no es sencilla, los materiales necesarios para fabricar el septum feed son fáciles de conseguir, lo que lo convierte en una opción más accesible que otros diseños de feeds para polarización circular. Sus dimensiones también favorecen el proceso de fabricación, especialmente en banda L, donde las medidas son lo suficientemente grandes para permitir pequeñas imprecisiones, pero lo suficientemente pequeñas como para no requerir herramientas especializadas. El septum feed está compuesto por cuatro partes, las cuales se describen a continuación.

- (A) **Conectores guía de onda-coaxial:** Adapta las ondas electromagnéticas que viajan en la guía de onda al cable coaxial. Hay dos conectores a los laterales del feed, uno para cada polarización circular.
- (B) **Polarizador:** Separa las dos polarizaciones (RHCP y LHCP) de la señal y las dirige a los conectores del septum feed, permitiendo el posterior procesamiento independiente de ambas.
- (C) **Guía de onda:** Dirige las ondas electromagnéticas hacia el polarizador.
- (D) **Radiador:** Define el patrón de radiación del feed.

6.2.2. Alternativas al Septum Feed

Existen otras alternativas que son usadas comúnmente por radioaficionados para recibir señales con polarización circular. Entre ellas se destacan dos: el cantenna y la antena helicoidal.

El cantenna es un tipo de feed para antenas parabólicas, generalmente fabricada a partir de una lata o recipiente cilíndrico metálico. Puede usarse para una señal con polarización doble circular agregando un combinador de fases de 90° , el cual es capaz de separar las dos polarizaciones. Es comúnmente utilizado en aplicaciones de banda L que necesiten soportar polarización circular (LHCP y RHCP). Aunque su ancho de banda es moderado, es una solución simple y funcional para la recepción de señales satelitales. Surge como una alternativa barata y sencilla al septum feed, a coste de presentar una menor ganancia y XPD. A diferencia del septum feed, el cual implementa su polarizador de manera física, la separación entre polarizaciones se hace mediante un componente externo, el cual presenta un costo adicional.

Al igual que para el septum feed, el cantenna se compone de cuatro partes: el radiador (A), la guía de onda (B), la transición de guía de onda a coaxial (C) y el polarizador (D). Un diagrama, indicando los distintos componentes del alimentador se encuentra en la Figura 6.4.

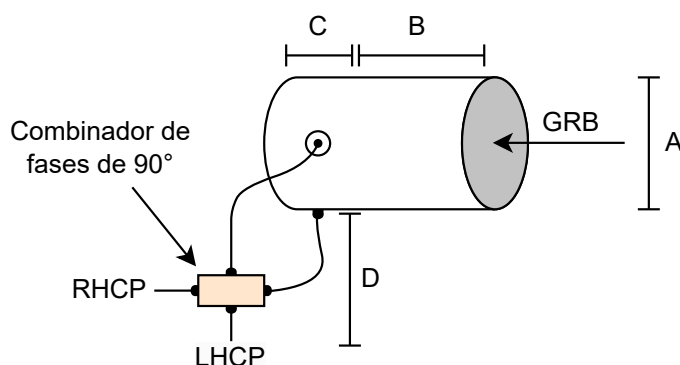


Figura 6.4: Diagrama de un cantenna capaz de recibir polarización doble circular.

La antena helicoidal es una opción bastante común al trabajar en la recepción y transmisión de señales con polarización circular. Su tamaño compacto facilita su construcción para operar en la frecuencia del GRB. De todas formas, puede presentar problemas en el XPD si no se fabrica con precisión. Otra ventaja es su capacidad de ser modificada, pues una vez construida, es posible ajustarla si no se obtiene el desempeño esperado. A diferencia del septum feed o el cantenna, la antena helicoidal solamente puede recibir una polarización circular. La misma depende del sentido de giro de la hélice, por lo que una vez construida no se puede cambiar.

La antena helicoidal está compuesta por 5 partes: conductor helicoidal (A), soporte de la helicoide (B), soporte central (C), plano reflector (D) y el conector

6.2. Feed de Polarización Doble Circular

coaxial (E). Un diagrama, indicando las distintas partes de la antenna se encuentra en la Figura 6.5.

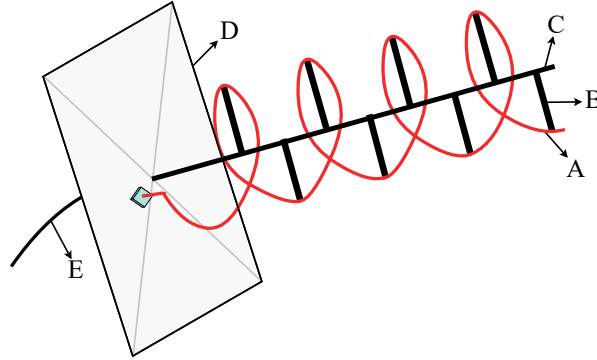


Figura 6.5: Diagrama de una antena helicoidal capaz de recibir una polarización circular.

Considerando estas alternativas, el septum feed continúa destacándose como la mejor opción para la recepción de GRB. Este tipo de alimentador no solo es sencillo de construir, sino que también ofrece una buena ganancia en recepción, es fácil de modificar y adaptar, permite la recepción simultánea de ambas polarizaciones y cuenta con un XPD adecuado para recibir correctamente la señal. Así, el septum feed se presenta como una excelente alternativa frente a los alimentadores de polarización circular profesionales, los cuales, además de ser difíciles de conseguir con las especificaciones necesarias, suelen tener un costo muy elevado.²

6.2.3. Simulaciones del Septum Feed

Simular una antena es un paso clave en el diseño de antenas. Permite predecir y optimizar su comportamiento electromagnético antes de fabricarla. A través de la simulación se pueden analizar parámetros clave como el patrón de radiación, la impedancia y la eficiencia, lo que permite identificar posibles problemas de diseño y realizar ajustes. Para esta tarea existen varias herramientas de software, la utilizada fue ANSYS HFSS (High Frequency Structure Simulator) [75]. Estas herramientas suelen requerir el pago de una licencia de uso anual con un costo muy elevado. Sin embargo, suelen ofrecer versiones de prueba gratuitas que permiten emplear algunas de sus capacidades. En concreto, ANSYS HFSS cuenta con una versión gratuita para estudiantes.

ANSYS HFSS es una herramienta de simulación electromagnética por elementos finitos, diseñada para modelar y analizar dispositivos de alta frecuencia, como antenas, filtros y guías de onda. Haciendo uso de esta herramienta, se realizaron simulaciones del septum feed diseñado para la recepción de GRB.

²El único alimentador recomendado por la NOAA que estuvo disponible durante el transcurso del proyecto fue el modelo GRBF-1 de Challenger Communications [74]. Sin embargo, al momento de realizar esta documentación ya no se vende de forma individual.

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

En la Figura 6.6, se pueden apreciar los resultados de estas simulaciones. Se muestra la intensidad del campo eléctrico (E) se observa a la izquierda la simulación con una onda incidente con polarización circular derecha (RHCP), observándose que la gran mayoría de la potencia de la señal se concentra en el puerto Rx. Mientras que en el caso de que incida una onda con polarización circular izquierda (LHCP), la potencia se concentra en el puerto Tx.

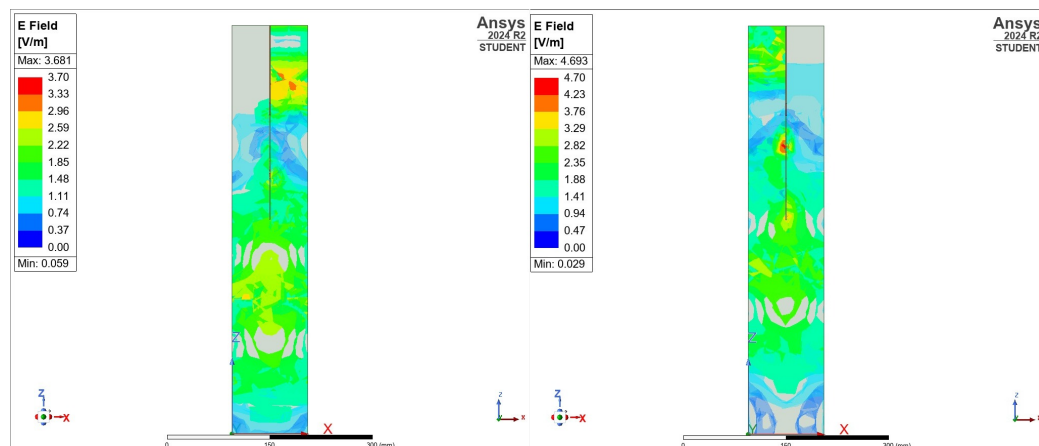


Figura 6.6: Simulación en ANSYS HFSS para el diseño del septum feed. Se puede observar el desempeño del mismo cuando es excitado con una onda de polarización RHCP (simulación a la izquierda) y LHCP (simulación a la derecha).

Dado que incluso en estas condiciones, vemos que la separación entre polarizaciones es razonable pero no ideal, una posible solución es agregar un *choke* (también llamado *horn*), un elemento que se agrega en la boca del alimentador para mejorar su desempeño. Un diseño de horn es simulado en la Figura 6.7. En la misma se muestra que el desempeño del feed es mejor en términos de aislación de polarizaciones entre puertos.

En la práctica, se comenzó construyendo el alimentador sin el horn, reservando su diseño en caso de que el septum feed no fuera capaz de recibir GRB. Como se verá más adelante, el diseño original del septum feed (sin el horn) mostró un desempeño satisfactorio en la separación de polarizaciones. De esta forma, no fue necesario construir el horn, pues el alimentador ya contaba con el XPD suficiente para recibir GRB de forma correcta y estable.

6.2.4. Construcción del Septum Feed

Considerando la gran capacidad del septum feed para separar ambas polarizaciones, se decidió diseñar y construir uno para el sistema de recepción GRB. Las dimensiones del alimentador dependen de la frecuencia de operación [71]. Para la variante del septum feed presentada por OK1DFC, las dimensiones se presentan en la Figura 6.8.

En nuestro caso, queremos que el septum feed opere en la frecuencia de GRB, o sea 1686,6 MHz. De esta forma, la longitud de onda es de 177,7 mm. Con las

6.2. Feed de Polarización Doble Circular

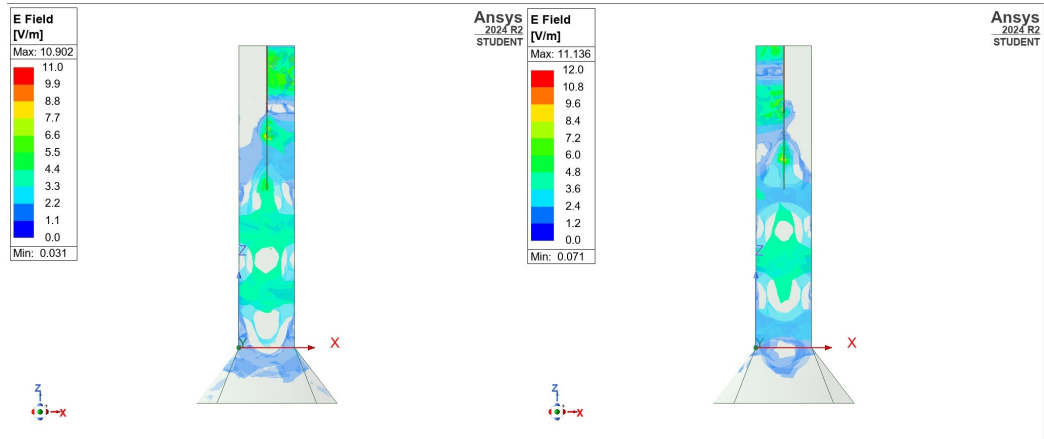


Figura 6.7: Simulación en ANSYS HFSS para el diseño del septum feed con un horn que mejora su desempeño. Se puede observar el desempeño del mismo cuando es excitado con una onda de polarización RHCP (simulación a la izquierda) y LHCP (simulación a la derecha).

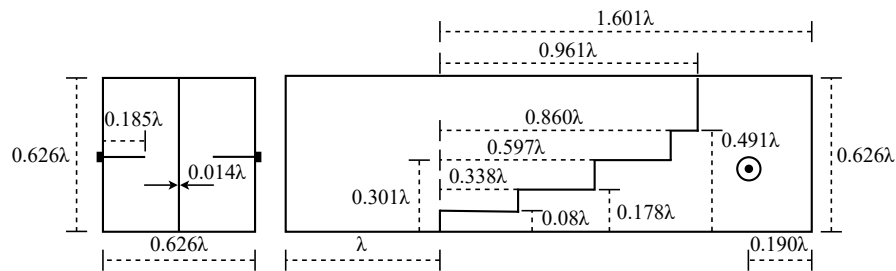


Figura 6.8: Dimensiones de la variante OK1DFC del septum feed según la longitud de onda de la frecuencia de operación.

medidas de cada parte del feed, podemos comenzar con la construcción. La Figura 6.9 muestra un plano con las medidas del alimentador, presentando una vista frontal y lateral del septum feed.

La construcción del alimentador se basa en un diseño compuesto por cuatro partes: el polarizador, la tapa trasera y las dos paredes de la guía de onda. Estas últimas, junto con el polarizador, se unen por presión utilizando una serie de tornillos. Para ello, cada pieza tiene una pequeña aleta que sobresale en la parte superior e inferior. Luego de realizar varios agujeros en esas aletas, es posible fijar las piezas con tornillos. La tapa trasera puede unirse también por presión, aunque es preferible soldarla a la guía de onda y al polarizador para tener mayor robustez. Es necesario que el material utilizado para la construcción del alimentador sea conductor. En este sentido, el aluminio representa una excelente opción debido a su buena maleabilidad y bajo costo.

Al momento de construir el alimentador, es importante considerar qué tan relevante es la precisión en cada medida para su correcto funcionamiento. De esta forma, les podemos dedicar especial cuidado para lograr la mayor precisión posible.

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

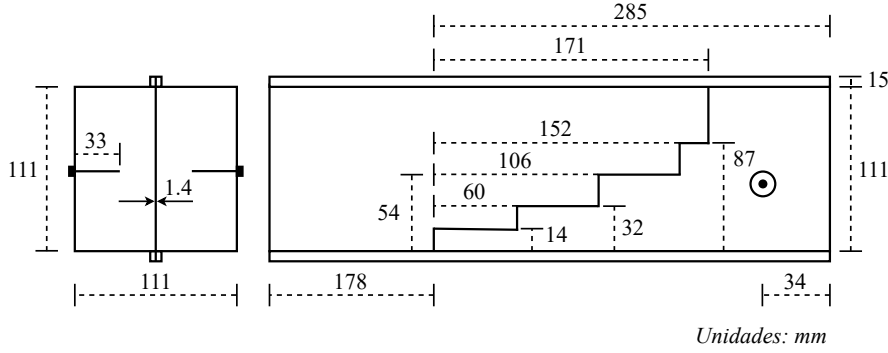


Figura 6.9: Dimensiones de la variante OK1DFC del septum feed para la frecuencia de GRB.

La medida más significativa es la simetría de la guía de onda, especialmente en la boca del alimentador, seguido de los escalones del polarizador [76]. Ambas medidas influyen de gran manera en la relación axial (o *axial ratio* en inglés), el cual está relacionado al XPD con la siguiente fórmula [77]:

$$XPD = 20 \cdot \log \left(\frac{AR + 1}{AR - 1} \right) \text{ dB.}$$

Donde AR es la relación axial, que se define como la relación entre la elipse mayor y la menor de la polarización circular. En un alimentador circular ideal, se tendría $AR = 1$, lo que implicaría una aislación infinita. Sin embargo, en la práctica esto no se cumple debido a las imperfecciones del sistema real. En cuanto a la medida menos importante, está el grosor, para el cual hay bastante libertad al momento de definirlo sin afectar la relación axial.

Una vez construido el alimentador, se deben agregar los conectores de panel. El largo de los conectores teórico es de 33 mm. De todas formas, es recomendable ajustar este valor usando un VNA. De forma similar a como se realizó el ajuste del dipolo para HRIT, se puede afinar el valor del largo minimizando el SWR (S_{11}). De esta manera, se maximiza la señal recibida y se reducen las pérdidas de retorno.

En nuestro caso, decidimos construir el alimentador con aluminio de 3,5 mm de espesor. Para tener el mejor desempeño posible, el cortado y ensamblado se lo encargamos a un especialista. De todas formas, es importante aclarar que es posible construir el alimentador con herramientas sencillas, sin necesitar mucha experiencia en el manejo de aluminio. A pesar de que las simulaciones indicaban un mejor desempeño con el horn, como se mencionó anteriormente, optamos por no construirlo e implementar la versión más sencilla del alimentador. La Figura 6.10 y 6.11 presenta una vista frontal y lateral de la primera versión del septum feed construido.

El largo de ambos conectores fue ajustado utilizando un VNA, obteniéndose un SWR (S_{11}) de 1.993 para el puerto Rx y de 2.341 para el puerto Tx. Las Figuras 6.12 y 6.13 muestran el SWR (S_{11}) de los puertos Rx y Tx del septum feed. Es

6.2. Feed de Polarización Doble Circular



Figura 6.10: Vista frontal de la primera versión del septum feed construido.



Figura 6.11: Vista lateral de la primera versión del septum feed construido.

importante destacar que el ajuste de largo de los conectores no afecta el XPD, sino únicamente el nivel de la señal recibida.

6.2.5. Ajustes al Septum Feed

La flexibilidad que presenta este diseño de feed para polarización doble circular es una de sus grandes ventajas. Es posible armar y desarmar el feed de manera sencilla, permitiendo ajustes y modificaciones al mismo. La primera versión del septum feed no tuvo un desempeño adecuado a la hora de separar las polarizaciones circulares que transmite GRB. Para solucionar este problema, se decidió ajustar las dos partes más importantes para el desempeño del alimentador: las dimensiones del polarizador y la simetría de la guía de onda [76].

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

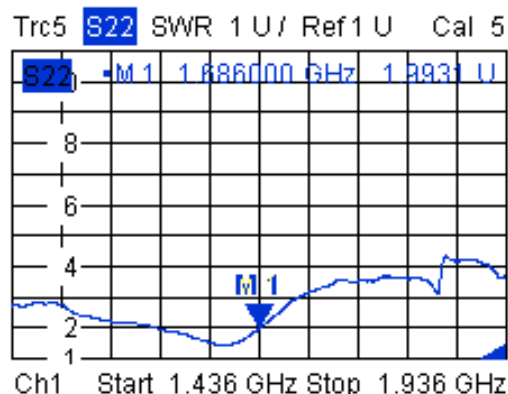


Figura 6.12: SWR (S_{11}) del puerto Rx del septum feed.

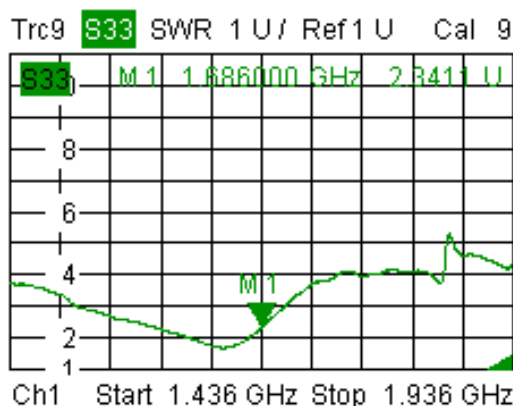


Figura 6.13: SWR (S_{11}) del puerto Tx del septum feed.

En primer lugar, se mejoró la simetría de la guía de onda. El aluminio, al ser maleable, es propenso a deformarse frente a distintas fuerzas. El septum feed está unido a presión mediante una serie de tornillos en dos aletas que sobresalen de la guía de onda. Debido a esto, la forma cuadrada de la guía de onda se vio deformada en la boca del alimentador, afectando negativamente la relación axial y por consecuente el XPD. Para mejorar la simetría se diseñó, de otro metal más resistente, una nueva boca la cual se coloca por fuera de la boca del alimentador, manteniendo la forma esperada y mejorando la simetría.

Además, se ajustaron las dimensiones del polarizador. Debido a que el polarizador es mantenido por los mismos tornillos que fijan la guía de onda, si no se tiene cuidado al poner los tornillos puede ocurrir que el polarizador quede torcido dentro del alimentador. Este es un problema importante, pues es difícil de detectar una vez construido el septum feed y puede afectar de manera negativa el XPD. Esto fue precisamente lo que ocurrió con el primer feed construido. Por lo tanto, se rediseñó un polarizador nuevo prestando especial cuidado a la posición de los tornillos que lo sujetan. Finalmente, para mejorar la rigidez del alimentador, se soldó la tapa trasera a la guía de onda y al polarizador.

6.3. Implementación del Sistema de Recepción de GRB

De esta manera, se obtuvo el septum feed mostrado en las Figuras 6.14 y 6.15. A diferencia de la primera versión, este alimentador presenta un XPD suficiente para separar ambas polarizaciones, lo que permite recibir exitosamente las dos componentes de GRB. En ambas figuras, sobre las aletas del alimentador, se pueden observar los soportes del septum feed, encargados de fijarlo firmemente a la antena. Estos soportes están asegurados usando los tornillos que mantienen unida la guía de onda. Además, en los laterales del alimentador se pueden observar los dos conectores de panel, responsables de recibir las polarizaciones RHCP y LHCP. Los mismos están compuestos por un trozo de cobre, cuya longitud fue optimizada usando un VNA, y por un conector SMA.



Figura 6.14: Vista frontal de la última versión del septum feed construido.

6.3. Implementación del Sistema de Recepción de GRB

Considerando los requisitos para la correcta recepción de la señal indicados por la NOAA [11], el sistema de recepción GRB fue implementado con los siguientes componentes:

- **Antena:** Se utiliza una antena parabólica de 3,9 m de diámetro, fabricada por la antigua marca estadounidense Prodelin. Si bien no alcanza los 4,5 m recomendados por la NOAA para Uruguay [56], dicha recomendación está basada en criterios que buscan garantizar una recepción confiable del servicio. No obstante, una antena ligeramente más pequeña no debería representar un problema. Esto se justificará más adelante en la Sección 6.3.1, donde se realiza el cálculo de enlace para este sistema.



Figura 6.15: Vista lateral de la última versión del septum feed construido.

- **Septum feed:** Alimentador de polarización circular, adaptado a la frecuencia de operación del GRB, con capacidad para recibir simultáneamente las polarizaciones RHCP y LHCP. Al recibir un único puerto a la vez, se le agrega una impedancia de $50\ \Omega$ en el puerto que queda sin utilizar, de forma de evitar que se introduzcan reflexiones indeseadas en el sistema.
- **Filtro + LNA:** Se emplea el filtro LNA (amplificador y filtro pasabanda) SAWbird+GOES de la marca Nooelec. El mismo ofrece una ganancia mínima de 30 dB y cubre un ancho de banda de 70 MHz centrado en 1688 MHz [58]. Gracias a este ancho de banda, es posible usar el mismo filtro tanto para HRIT como para GRB.
- **SDR:** Se utiliza un USRP B200mini de la marca Ettus Research, el cual admite una conexión USB 3.0, así como también un puerto de recepción, uno de transmisión y uno que puede operar de ambas formas. El SDR ofrece un ancho de banda de hasta 56 MHz y es capaz de sintonizar frecuencias en el rango de 70 MHz a 6 GHz [12]. Estas características permiten cubrir sin problemas el ancho de banda de 10,9 MHz de GRB, así como sintonizar su frecuencia de 1686,6 MHz [11].
- **Procesamiento en PC:** Se utiliza una computadora para recibir, procesar y decodificar las muestras capturadas por el SDR. El procesamiento y decodificación se hace usando el programa SatDump, que incluye un sistema específico para el procesamiento de GRB, además de permitir la generación de diversas imágenes meteorológicas [6]. La computadora debe contar con las prestaciones suficientes para almacenar, sin pérdidas por desbordamientos, todas las muestras transmitidas. Esto último representa un desafío significativo debido al amplio ancho de banda de 10,9 MHz de la señal [11]. Además, el procesamiento en SatDump incluye la decodificación de una señal DVB-S2, una tarea que, dependiendo de la configuración seleccionada, puede demandar un uso intensivo de CPU. Las imágenes y datos resultantes

6.3. Implementación del Sistema de Recepción de GRB

también demandan un considerable espacio de almacenamiento, por lo que es necesario contar con suficiente capacidad para guardar tanto los datos procesados, como las grabaciones originales de la señal.

El sistema de recepción se diseñó en la *Estación Terrena Rastreadora de Satélites* de Antel, ubicada en el barrio de Manga en Montevideo. La antena utilizada en este sistema es una de las que están disponibles en la Estación Terrena que actualmente no se encuentran en uso. La estación fue construida en 1986 con el objetivo de brindar autonomía en materia de comunicaciones vía satélite, en telefonía y televisión al país [13].

En la Figura 6.16 se puede apreciar el sistema implementado para la recepción de GRB. En concreto, la antena empleada solía formar parte de la recepción de señales de televisión para la red de IPTV de Antel.

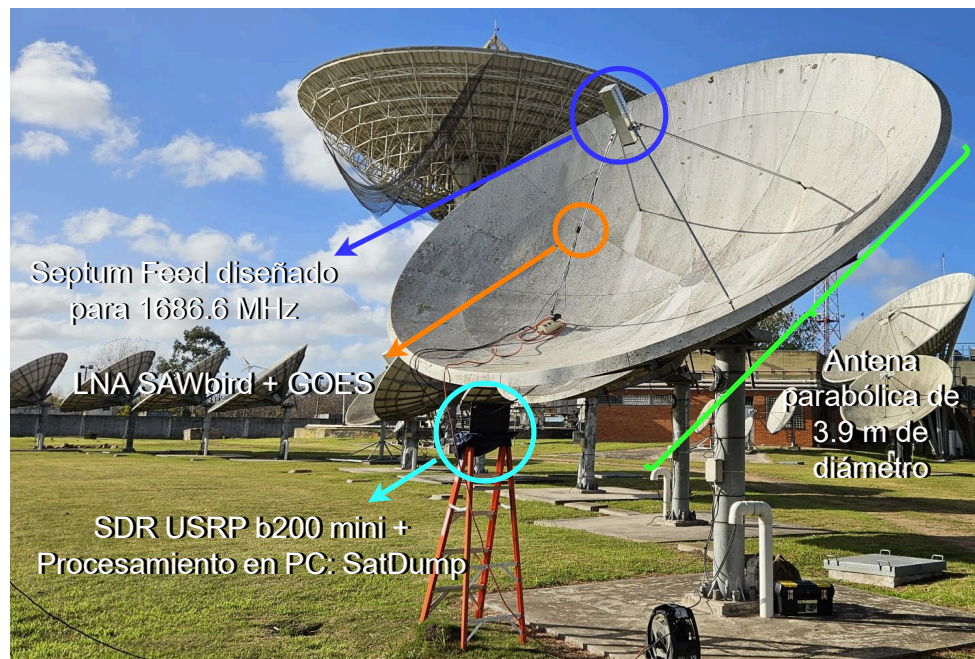


Figura 6.16: Sistema montado en la Estación Terrena de Antel en Manga, Montevideo. Se puede observar en el fondo de la imagen la Antena Standard-A de 32 m de diámetro.

La señal del satélite GOES es reflejada en la antena de 3,9m de diámetro, para luego ser concentrada en el punto focal de la antena, donde se ubica el septum feed. La señal de GRB, al ser de polarización circular, cambia de sentido luego de reflejarse en la antena. De esta forma, el puerto Rx del septum feed recibe la señal LHCP de GRB, mientras que el puerto Tx recibe la RHCP. A continuación, la señal es amplificada y filtrada por el SAWbird+GOES, y digitalizada en bandabase por el SDR USRP B200mini, que envía las muestras mediante un cable USB 3.0 a una laptop. Finalmente, la señal es procesada y decodificada en la computadora usando SatDump, permitiendo la obtención de toda la información de la señal y la generación de imágenes meteorológicas.

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

Como se mencionó anteriormente, la elección de la computadora y el SDR es importante para garantizar la obtención completa de todas las muestras de la señal, sin desbordamientos. Para ello, se utilizó una laptop facilitada por la empresa TCC, la cual cuenta con las siguientes características:

- Procesador (CPU): Intel i7-1355U con 12 cores.
- Memoria RAM: 32 GB DDR5.
- Disco: NVMe de 1 TB.

A pesar de usar una laptop de alto rendimiento, sus capacidades no son suficientes para recibir y decodificar la señal en vivo. Por ello, se optó por grabar previamente las muestras del espectro utilizando la API del Controlador de Hardware USRP (UHD) de Ettus Research [26], que permite controlar el USRP B200mini.

Posteriormente, las muestras grabadas se procesan con SatDump. Este enfoque, junto con el ajuste de ciertos parámetros disponibles en los drivers del SDR, permite una recepción estable de la señal sin perder muestras.

6.3.1. Cálculo del Margen de Enlace

Los parámetros del sistema de GRB son los siguientes:

- Potencia Isotrópica Radiada Equivalente, (EIRP): 63,5 dBm.³
- Ganancia de la antena receptora: 34 dBi. Se estimó en función de su diámetro, que es de 3,9 m [19].
- Pérdida por propagación en espacio libre: 188,41 dB. Surge de aplicar la fórmula de Friis para $r = 37\,441$ km y $f = 1686,6$ MHz (la Ecuación 2.11 del Apéndice 2.4).
- Pérdida por propagación en la atmósfera: 2 dB. Dato estimado en base a los datos de influencia de la atmósfera en la propagación [19].
- Potencia de ruido en el ancho de banda de la señal: $-104,2$ dBm. El cálculo se detalla en el Apéndice 2.4.

Por lo tanto, el cálculo del enlace puede realizarse de la forma que se ve en la siguiente ecuación:

$$C/N_{dB} = 63,5 \text{ dBm} - 188,41 \text{ dB} - 2 \text{ dB} + 34 \text{ dBi} + 104,2 \text{ dBm} = 11,27 \text{ dB}. \quad (6.1)$$

Para GRB, el mínimo de requerimiento de C/N es de 6,5 dB.⁴ Por lo tanto, el margen de enlace para el sistema implementado puede estimarse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$C/N - C/N_{min} = 11,27 \text{ dB} - 6,5 \text{ dB} = 4,77 \text{ dB}. \quad (6.2)$$

³Dato extraído del documento de la NOAA *Link Budget for GRB on GOES-R Series Satellites to User Stations* [59].

⁴Se considera en base al estándar DVB-S2 para modulación QPSK y tasa de FEC de $9/10$, que son las empleadas por GRB.

6.3. Implementación del Sistema de Recepción de GRB

El margen de enlace de 4,77 dB se considera razonable para el sistema implementado. Esta antena permanece fija en su posición, por lo que las pérdidas por desalineamiento se pueden considerar despreciables. Por otro lado, queda evidenciado el requerimiento de utilizar una antena de mayor tamaño, ya que la ganancia de la antena utilizada para HRIT no sería suficiente para alcanzar el umbral mínimo de recepción necesario para GRB. El margen obtenido proporciona un umbral adecuado para compensar las variaciones del enlace y garantizaría una recepción estable del servicio.

6.3.2. Puesta en Marcha del Sistema

En comparación con el sistema de HRIT, la puesta en marcha del sistema de GRB involucró un trabajo adicional considerable. En este sentido, la configuración del sistema resulta ser tan importante como su propio diseño, e incluso puede llegar a ser más determinante. Hasta los detalles más pequeños pueden marcar la diferencia entre una recepción exitosa y una fallida. A continuación, se presentan los pasos más relevantes de este proceso, destacando los aspectos clave a considerar en cada etapa.

Dado que la señal a recibir proviene de un satélite geoestacionario, la antena debe ser apuntada a este, de la misma forma que se hizo para la recepción de HRIT. Sin embargo, la antena empleada no es móvil, por lo tanto debe apuntarse de forma manual. Como se mencionó anteriormente, la antena utilizada era empleada para la recepción de señales de televisión. Las señales de televisión que se transmiten en forma satelital suelen distribuirse en la banda C, que comprende desde los 3,7 GHz hasta los 4,2 GHz.

Para esta tarea se siguió el siguiente procedimiento:

1. Primero, para facilitar la búsqueda del satélite GOES-East, se comenzó por apuntar la antena al satélite de televisión brasileño Star One C3, cuya ubicación es muy próxima a GOES-East. Esta situación puede observarse en la Figura 6.17. Para esto, usando el equipamiento disponible en la Estación Terrena, se montó un sistema capaz de recibir dicho satélite. La búsqueda se realizó moviendo la antena y visualizando la señal recibida en el analizador de espectro PSA-2500C de la marca AVCOM, disponible en la Estación Terrena de Antel.
2. Una vez que se recibieron correctamente los servicios del satélite Star One C3, se montó el sistema para GRB. Visualizando el analizador de espectro, se realizaron los ajustes manuales hasta identificar el espectro que transmite GOES-East.
3. Una vez visualizado el espectro, se realizan ajustes menores a la antena para maximizar la potencia recibida. Cuando se logra encontrar el mayor nivel de señal, se ajusta la antena para que permanezca en su lugar. El espectro recibido se puede visualizar en la Figura 6.18.

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

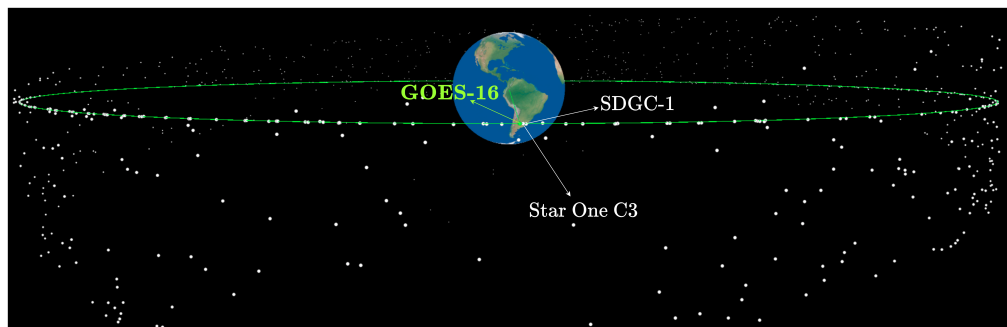


Figura 6.17: Ubicación del satélite GOES-16, muy próximo al satélite Star One C3. Se muestra con puntos blancos otros satélites en la órbita geostacionaria. SDGC-1 es un satélite militar brasileño [78].

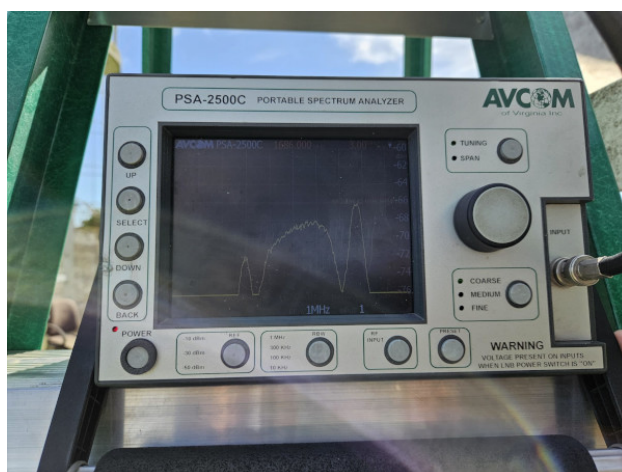


Figura 6.18: Analizador de espectro PSA-2500C de AVCOM. Se puede apreciar el espectro recibido por el septum feed durante las etapas iniciales del montaje del sistema.

La recepción del espectro puede observarse en la Figura 6.19. En la misma, se pueden identificar las cuatro señales que transmite el satélite: DCPR, CDA, el ya recibido HRIT y, finalmente, GRB. La señal CDA resulta de gran utilidad para estudiar el desempeño del septum feed en términos de aislación entre polarizaciones, ya que se transmite con polarización circular derecha (RHCP) y, por lo tanto, con un septum feed ideal, no debería recibirse en el puerto que recibe la polarización circular izquierda (LHCP).

Inicialmente, se identificaron ciertos problemas en el sistema montado. Un requerimiento indispensable es que el feed empleado presente una separación entre polarizaciones suficiente para discriminar el componente circular izquierdo (LHCP) de GRB del componente circular derecho (RHCP) de GRB. Como se describió anteriormente, la primera versión del feed mostraba limitaciones en este aspecto, por lo que fue necesario realizar las modificaciones descritas en la sección anterior para mejorar su desempeño y lograr un XPD mayor.

6.3. Implementación del Sistema de Recepción de GRB

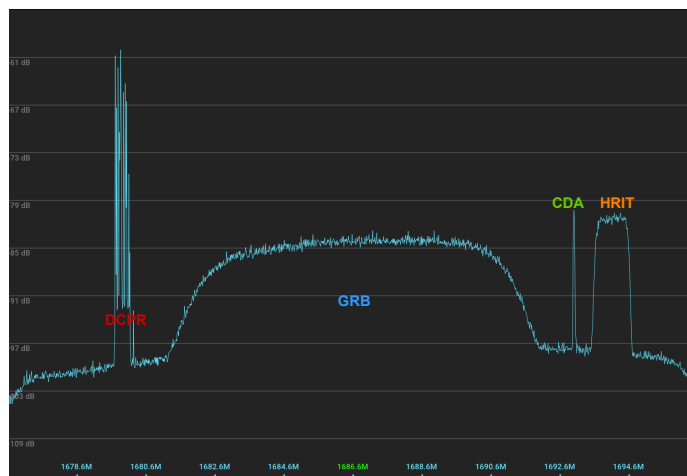


Figura 6.19: Espectro del satélite GOES-East recibido con el sistema implementado en la Estación Terrena de Antel, puerto Tx del septum feed.

Tras implementar estos cambios, el feed era capaz de separar de manera adecuada las polarizaciones, tomando como referencia que la señal CDA, que se transmite con polarización RHCP, no era visible en el puerto Rx del feed. Sin embargo, todavía no era posible la decodificación de la información, debido a que la relación señal a ruido en la recepción era demasiado baja. Analizando este problema, se notó una deformación en el espectro recibido. La misma puede observarse en la Figura 6.20, donde el piso de ruido del espectro en las frecuencias superiores presenta una clara diferencia con respecto a las frecuencias inferiores.

Este problema podía deberse a interferencias introducidas al sistema por alguno de sus componentes. Por ejemplo, el LNA interno del USRP B200mini podría estar saturado, pero esto fue descartado luego de verificar el nivel de potencia en la entrada del LNA, que era menor al máximo tolerado por el SDR.⁵ Otra posible causa, que ya se había identificado como problemática con el sistema de HRIT radica en los cables coaxiales utilizados. Si un cable no tiene aislación suficiente o es defectuoso, puede introducir ruido y distorsionar el espectro recibido, pero este problema fue evitado mediante el uso de cables de baja atenuación y blindaje adecuado, disponibles en la Estación Terrena en Manga. El problema que causaba el mal funcionamiento del sistema radicaba en el mecanismo empleado para el suministro de corriente al LNA. El cargador utilizado no estaba teniendo el comportamiento adecuado, causando distorsiones en el espectro recibido, así como una variación en el nivel de señal recibido.⁶

En la Figura 6.20 se puede apreciar el espectro recibido cuando se estaba usando la configuración original del sistema de GRB. Como ya mencionamos antes,

⁵Para el USRP B200mini, este umbral es de -15 dBm.

⁶Como detalle, el cargador utilizado en última instancia fue el mismo que en el sistema de HRIT. Inicialmente optamos por utilizar otro cuya conexión resultaba más sencilla, dado que la tarea se desarrolló en forma directa sobre la antena parabólica.

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

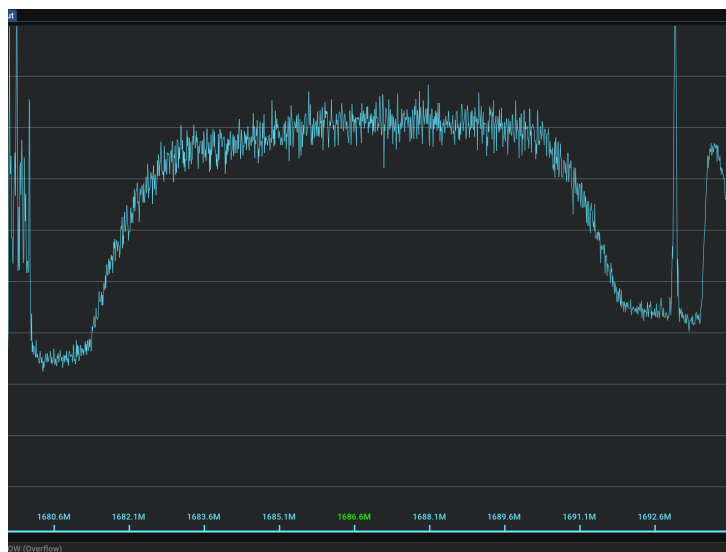


Figura 6.20: Captura del espectro recibido con el sistema de recepción de GRB, cuando se empleaba la fuente de alimentación del LNA defectuosa.

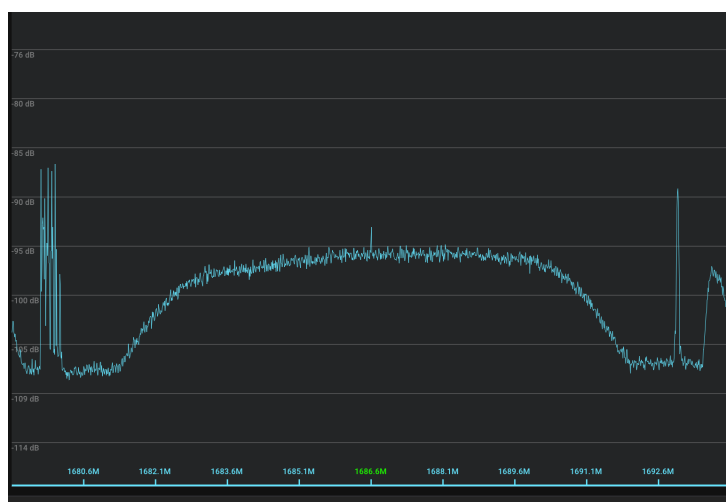


Figura 6.21: Captura del espectro recibido con el sistema de recepción de GRB, cuando se empleaba una fuente de alimentación del LNA adecuada.

sobre el lado derecho del espectro (entre las señales CDA y HRIT) la amplitud del piso de ruido es mayor a la presente en el extremo izquierdo del mismo.

Esta situación se normaliza, y se obtiene el espectro esperado, al cambiar la fuente que se estaba utilizando. Estos resultados pueden apreciarse en la Figura 6.21, donde el piso de ruido permanece constante a lo largo de todo el espectro.

Teniendo en cuenta que la señal CDA se transmite únicamente con polarización circular derecha (RHCP), es coherente con que la misma esté presente en la Figura 6.19. Por otro lado, cuando se analiza el espectro en el otro puerto (Rx), se obtiene lo que se aprecia en la Figura 6.22, en donde se destaca la ausencia de la señal CDA,

6.3. Implementación del Sistema de Recepción de GRB

ya que corresponde al espectro transmitido con polarización circular izquierda (LHCP) por el satélite GOES-East.

Con respecto al uso de SDR, se empleó la utilidad `rx.samples_to_file` de la librería UHD del USRP B200mini, ejecutándola de la siguiente manera:

```
./rx_samples_to_file --args "recv_frame_size=12300,num_recv_frames=1024"
--rate 13e6 --freq 1686.6e6 --file GRB_LHCP_506_2_larga.dat
--duration 1500 --type short --spb 64000 --ref internal --gain 40
--wirefmt sc16
```

De esta forma, estamos empleando:

- 1024 frames de 12300 bytes de buffer, esto permite evitar pérdidas de datos por diferencia entre la tasa de escritura del SDR y la capacidad de escritura del disco de la computadora.
- Una tasa de muestreo de 13 Msps, con una frecuencia central de 1686,6 MHz.
- Una duración de grabación de 1500 s, o sea, 25 minutos.
- Una resolución de bits de 16 bits (`short cs16`).
- Y una ganancia de 40 dB para el USRP B200mini.

Considerando la configuración utilizada, la cantidad de muestras a escribir puede calcularse de la siguiente manera:

$$13 \text{ Msps} \cdot 16 \text{ bits por muestra} = 208 \text{ Mbps.} \quad (6.3)$$

Esta tasa de escritura es casi el doble de la requerida en el caso de HRIT, y en principio, al utilizar una interfaz USB 3.0, no debería haber problemas de rendimiento. Sin embargo, en las laptops los buses de conexión suelen ser compartidos entre múltiples puertos y dispositivos, lo que implica que el ancho de banda efectivo disponible puede verse reducido. Por ello, esta tasa se acerca, e incluso podría superar ocasionalmente el límite práctico de la interfaz. Para evitar desbordes o pérdidas de muestras, es necesario emplear una configuración adicional que optimice la escritura de las muestras del SDR al disco.

El campo más importante de esta configuración es el correspondiente a la parte de `--args`, ya que los valores por defecto causarían muy probablemente pérdidas de muestras, debido a que la computadora no está siendo capaz de escribir los datos que recibe a la tasa que los recibe y, por lo tanto, descarta algunos de ellos. Con los valores mencionados, es posible grabar durante 25 minutos sin que se pierdan muestras.⁷

⁷El tamaño total de la grabación de las muestras de 25 minutos de duración es de 78,0 GB.

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

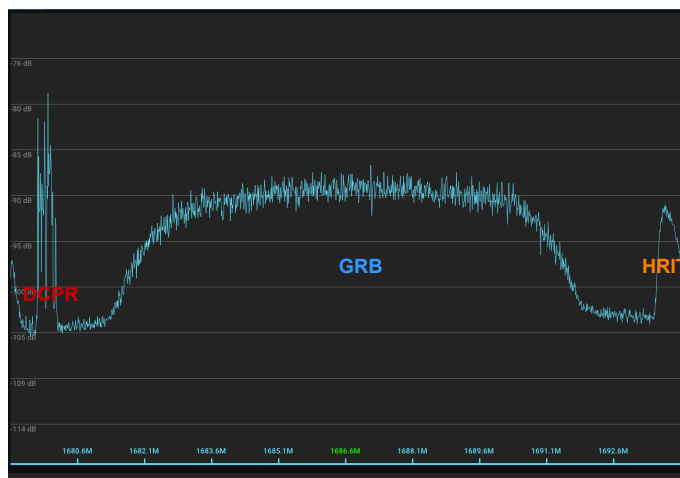


Figura 6.22: Espectro del satélite GOES-East recibido con el sistema implementado en la Estación Terrena de Antel, puerto Rx del septum feed.

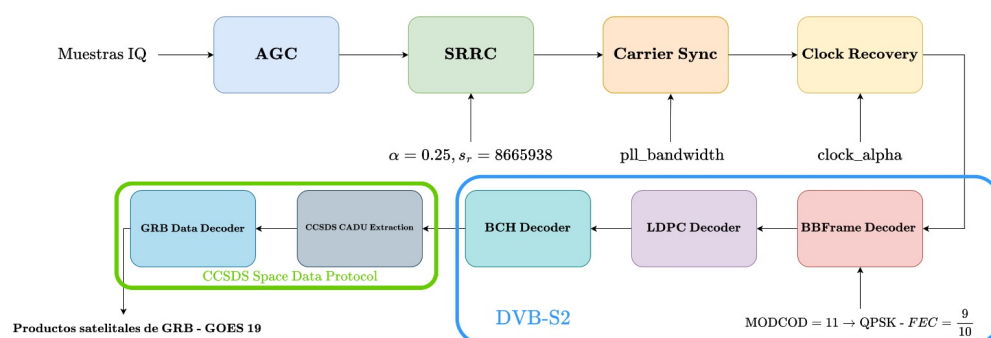


Figura 6.23: Diagrama de bloques del flujo de procesamiento de GRB que utiliza SatDump.

6.3.3. Sistema de Procesamiento de SatDump

Como se mencionó en capítulos anteriores, GRB se transmite utilizando el estándar DVB-S2, un estándar satelital ampliamente utilizado. Los datos, luego se organizan de acuerdo al protocolo de datos espaciales CCSDS Space Data Protocol en las denominadas Channel Access Data Units (CADUs), y posteriormente pueden ser decodificados en imágenes y medidas del satélite GOES-East. Por lo tanto, el flujo de procesamiento de SatDump es responsable de llevar a cabo estas tareas. Un diagrama del mismo puede observarse en la Figura 6.23.

Los parámetros que SatDump establece por defecto para GRB no funcionaban correctamente en el sistema implementado, por lo que fue necesario ajustarlos. Con la configuración original, al procesar la señal se logra reconocer la constelación QPSK, aunque esta se muestra inestable y tiende a distorsionarse por breves instantes. Así, a pesar de mantener un QPSK la mayor parte del tiempo, esas breves alteraciones introducen una gran cantidad de errores, lo que se traduce en

6.4. Resultados obtenidos de GRB

imágenes con múltiples huecos debido a los paquetes descartados por exceso de errores. Teniendo esto en cuenta, y luego de varias iteraciones, la configuración final utilizada para la recepción de los componentes RHCP y LHCP de GRB fue:

- `clock_alpha` = $3,5 \cdot 10^{-4}$, el valor por defecto en SatDump es de $2,5 \cdot 10^{-3}$.
- `pll_bandwidth` = $2,0 \cdot 10^{-3}$, el valor por defecto en SatDump es de $5,0 \cdot 10^{-3}$.

Con respecto a la inestabilidad de la constelación recibida, la misma se debe a problemas en la sincronización de fase y frecuencia. Reducir el valor del parámetro `pll_bandwidth` permite estimar la fase y la frecuencia con mayor precisión. Esto resulta en una constelación más estable, que no pierde la forma ni muestra rotaciones. Además, al disminuir el parámetro `clock_alpha`, que controla el bloque **Clock Recovery**, se logra tener una respuesta más estable en la sincronización temporal, lo que se traduce en una menor dispersión de los puntos de la constelación.

Los parámetros ajustados refieren únicamente a la decodificación de DVB-S2. Los parámetros de los bloques `CCSDS CADU Extraction` y `GRB Data Decoder` no fueron modificados.

6.4. Resultados obtenidos de GRB

En esta sección, presentaremos los resultados obtenidos en la Estación Terrena de Manga del servicio GOES Rebroadcast (GRB). Una primera observación es que el desempeño de este sistema es mucho más estable que en el caso de HRIT. Esto se debe a que se está utilizando una antena profesional, diseñada para soportar incluso condiciones climáticas extremas, por lo que difícilmente se altere su alineación con el satélite, algo que sí ocurría en la recepción de HRIT. Además, el nivel de señal recibido es ampliamente superior, como se mencionó anteriormente. Más allá de la comparación, los resultados obtenidos en términos de señal recibida y espectro indican que el sistema tiene un desempeño suficiente como para poder utilizarse de forma profesional en futuras aplicaciones para obtención de datos y productos satelitales de GOES-East para ser suministrados a partes interesadas.

Con respecto a los resultados obtenidos, en la Figura 6.24 puede observarse la constelación recibida para la polarización LHCP de GRB, mientras que en la Figura 6.25 puede observarse la constelación para la polarización RHCP.

De forma resumida, el desempeño del sistema, a través de la métrica de SNR de SatDump (estimación con el Método del Segundo y Cuarto momento) junto a una estimación de la relación E_B/N_0 es la que se observa en la Tabla 6.1.

Se puede observar un mejor desempeño en la recepción de la polarización circular derecha (RHCP), que se recibe con un SNR mayor, por 0,6 dB en promedio, que el de la polarización circular izquierda (LHCP). Sin embargo, esta diferencia no tiene ningún efecto negativo en el desempeño del sistema. Se alcanza un nivel de SNR más que suficiente para la correcta recepción de los servicios de GRB en ambas polarizaciones. Con respecto a la corrección de errores, se puede observar en la Figura 6.24 y en la Figura 6.25, que en los gráficos de **LDPC Trials** y **BCH Corrections**, los valores permanecen en 1,0 y 0, respectivamente. Esto indica que

Capítulo 6. Recepción de GOES Rebroadcast (GRB)

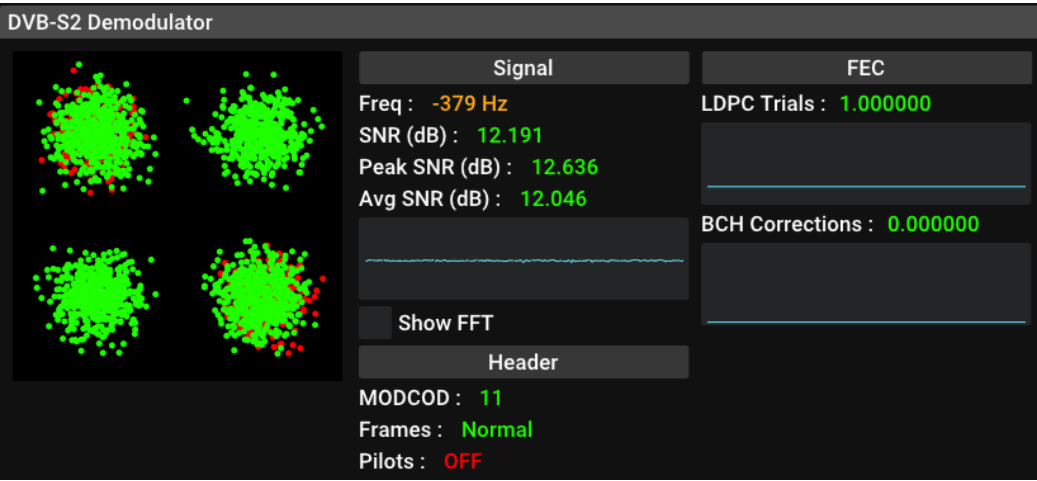


Figura 6.24: Constelación recibida para la señal LHCP de GRB. Se muestra también el status de la etapa de corrección de errores en la decodificación.

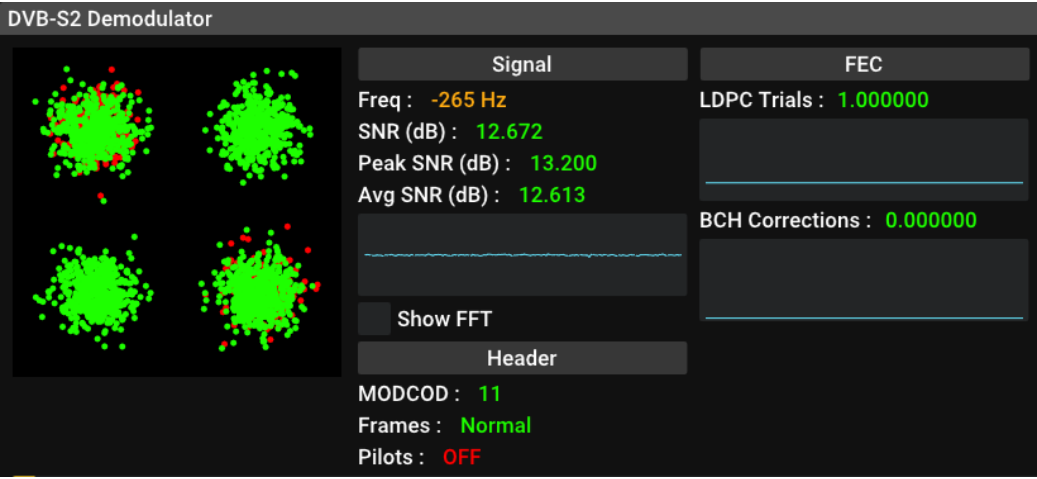


Figura 6.25: Constelación recibida para la señal RHCP de GRB. Se muestra también el status de la etapa de corrección de errores en la decodificación.

se está realizando una corrección de errores mínima sobre la señal recibida, en ambos casos.

Finalmente, presentamos ejemplos de imágenes y datos recibidos del servicio GRB. Como observación general, estos datos tienen un nivel de procesamiento menor al de HRIT, ya que se reciben en su mayoría como datos crudos, es decir, con menor compresión, calibración y agregado de información por parte de la NOAA. Los resultados que se presentan en esta sección fueron obtenidos el jueves 5 de junio de 2025, a las 9:26 de la mañana en el caso de los productos de RHCP y a las 10:50 en el caso de los productos de LHCP y se pueden apreciar en su totalidad en el Apéndice E. Además, a diferencia de HRIT, no es posible editar y combinar las imágenes recibidas para formar productos meteorológicos en SatDump, ya que en la versión utilizada durante el proyecto, la 1.2.2, no se contaba con soporte

6.4. Resultados obtenidos de GRB

Polarización	SNR Medio	SNR Pico	E_B/N_0 Medio
LHCP	12,0 dB	12,6 dB	9,96 dB
RHCP	12,6 dB	13,2 dB	10,56 dB

Tabla 6.1: Estimación del SNR y de E_B/N_0 de las muestras obtenidas con el sistema de GRB para las dos polarizaciones recibidas, LHCP y RHCP.



Figura 6.26: Composición a color formada a partir de las imágenes de los canales 2 y 14.

para estas tareas con productos de GRB. Más información sobre esta función se detalla en el Apéndice A.

6.4.1. Productos de la Polarización Circular Izquierda (LHCP)

En la Figura 6.26, se presenta una composición a color realizada a partir de las imágenes de los canales 2 y 14, recibidas en la polarización LHCP.

6.4.2. Productos de la Polarización Circular Derecha (RHCP)

En esta sección se presentan los resultados de los datos provistos en la polarización RHCP. Adicionalmente, SatDump permite la generación de una composición a color, en base a los canales 1, 3 y 5. Esta composición, cuyo contraste fue ajustado, se muestra en la Figura 6.27.



Figura 6.27: Composición a color formada a partir de los canales 1, 3 y 5.

Finalmente, aprovechando la gran resolución espacial de estas imágenes, generamos un recorte de la imagen Full Disk, la de la Figura 6.27, para comprender la superficie de Uruguay. Esta imagen se puede observar en la Figura 6.28.

6.4.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)

Una diferencia con respecto a HRIT es el hecho de que GRB incorpora, en su polarización RHCP, la transmisión de imágenes de la corona solar en distintas longitudes de onda ultravioletas, típicamente del orden de 10^{-10} m.⁸ SatDump tiene soporte para la decodificación de las mismas, y en esta sección se presentan estas imágenes.

Estos datos son una gran novedad, y su uso se encuentra en fases iniciales por parte de la NOAA, por lo que es posible recibir imágenes cuya calidad no es aceptable, debiéndose a errores de calibración desde el procesamiento realizado por la propia NOAA [79].

Las imágenes incluidas son:

- Banda de 94 Å.
- Banda de 132 Å.
- Banda de 171 Å en la Figura 6.29.

⁸Esto es equivalente a una unidad conocida como Ángstrom (Å).

6.4. Resultados obtenidos de GRB

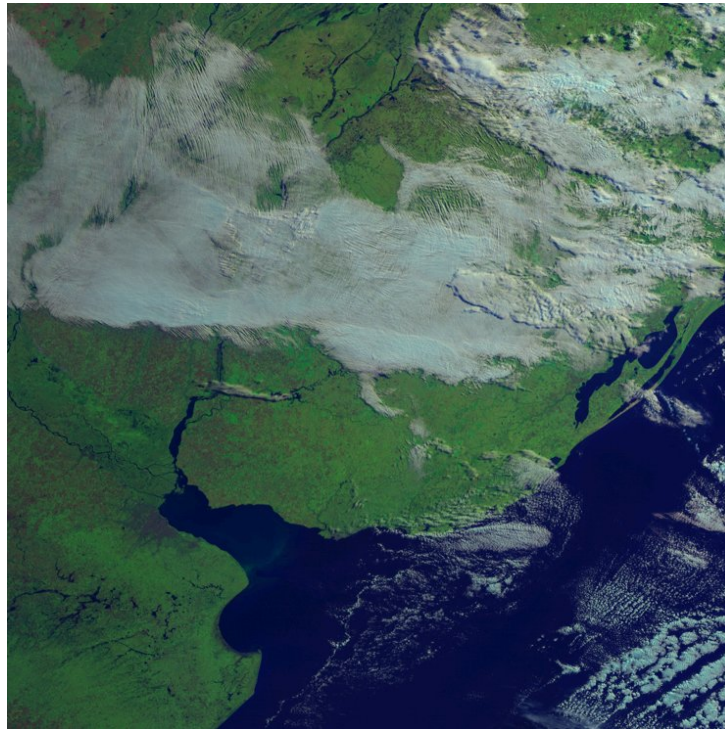


Figura 6.28: Imagen del territorio de Uruguay, formada como composición a color de los canales 1, 3 y 5.

- Banda de 195 Å.
- Banda de 284 Å.
- Banda de 304 Å.

6.4.4. Productos del Geostationary Lightning Mapper (GLM)

Otros de los instrumentos a bordo del satélite GOES-East es el denominado Geostationary Lightning Mapper. Este instrumento es capaz de detectar cambios en la escena óptica, y por lo tanto, registrar la ocurrencia de rayos. Cada detección de este instrumento es registrada como un evento (*event*). Cuando varios eventos se detectan en instantes de tiempo próximos se agrupan en grupos (*groups*). Un rayo completo puede estar formado por varios eventos distribuidos en varios grupos, por lo que su información se agrupa en rayos (*flashes*). El satélite registra la ubicación geográfica donde ocurre el rayo, así como el tiempo en el que ocurre, su duración y la energía emitida por el mismo en el espectro visible, y retransmite toda esa información [80]. Un ejemplo de un *flash* se detalla a continuación:

```
"flash_id": 59920,  
"flash_time_offset_of_first_event": 60952,
```

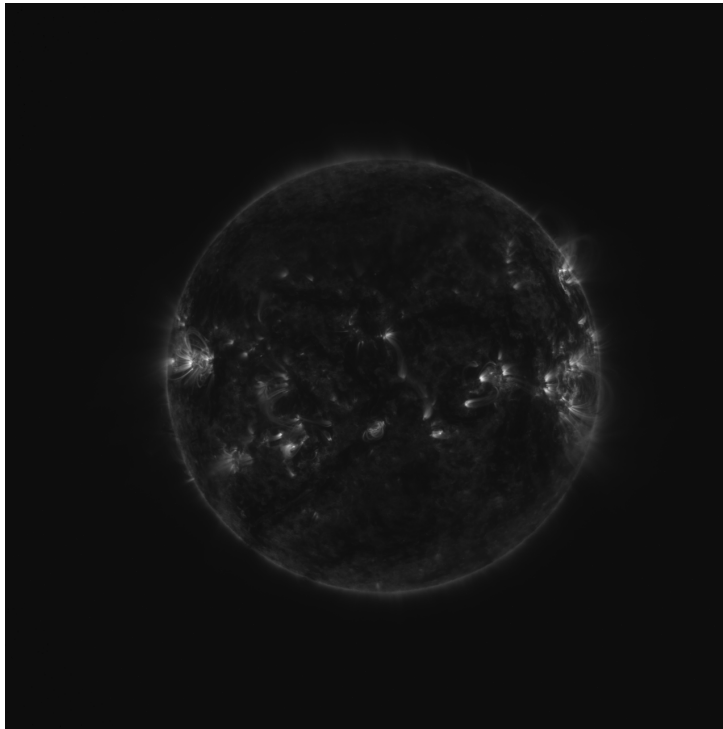



Figura 6.29: Imagen **SUVI** de la banda de 171 Å.

```
"flash_time_offset_of_last_event": 63954,  
"flash_frame_time_offset_of_first_event": 61278,  
"flash_frame_time_offset_of_last_event": 64280,  
"flash_lat": -24.494226455688477,  
"flash_lon": -52.29722595214844,  
"flash_area": 6524,  
"flash_energy": 1026,  
"flash_quality_flag": 0
```

Estos datos refieren a un rayo que ocurrió en las coordenadas (-24.49°, -52.29°) el 5 de junio de 2025 a las 9:17 en el estado de Paraná en Brasil. Las referencias temporales (**time_offset**) se refieren a la cantidad de segundos desde que se comienza a registrar la observación. Luego, el campo **quality_flag** indica la calidad de la observación, en valores desde 0 a 5. En este caso, una calidad de 0 indica que la calidad de la observación es buena, mientras que una de 5 indica que la observación registrada resulta imprecisa. Finalmente, los campos de **area** y **energy** refieren al área donde fue detectado el evento y a la energía medida del evento, expresada en Joules (J).

Capítulo 7

Conclusiones

Tras un largo recorrido que incluyó distintas etapas de desarrollo, análisis e implementación, es momento de mirar en retrospectiva y considerar si se han cumplido los objetivos y las metas que guiaron este proyecto. En este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos, valorando si se lograron alcanzar los objetivos del proyecto. Asimismo, se hace un análisis de las principales lecciones aprendidas a lo largo del trabajo, junto con una reflexión sobre las experiencias vividas y las dificultades enfrentadas en el transcurso del mismo. Finalmente, y a partir de las bases establecidas por este proyecto, se plantea un análisis de las tareas a futuro, haciendo especial énfasis en el desarrollo de un sistema permanente y funcional para las instituciones interesadas.

7.1. Evaluación de Resultados

El proyecto se dividió en dos grandes etapas, cada una con sus limitantes y dificultades. En la primera se trabajó en la recepción de HRIT, un servicio de emergencia meteorológica pensado para ser recibido con un sistema sencillo. Esta etapa sirvió como un acercamiento a la recepción satelital, introduciendo conceptos clave, la metodología y los problemas más comunes. Esta experiencia previa fue fundamental para afrontar la segunda etapa del proyecto: la recepción de GRB. A diferencia de HRIT, este servicio tiene un enfoque más técnico, orientado a científicos y meteorólogos, ya que transmite una gran cantidad de información y requiere un sistema de recepción considerablemente más complejo.

La recepción de HRIT fue exitosa, logrando validar el funcionamiento del diseño al recibir sin errores todos los productos transmitidos por el servicio, incluidas las siete bandas de disco completo de la Tierra. Esto demuestra la solidez de la implementación, pudiendo recibir información por largos periodos sin ninguna pérdida. El sistema soporta la decodificación en tiempo real de la señal, lo que posibilita observar cómo se generan las imágenes en vivo, sin necesidad de procesarlas de forma *offline*.

Teniendo en cuenta el bajo costo de implementación y las características de la señal, la recepción de HRIT representa una excelente oportunidad para iniciarse

Capítulo 7. Conclusiones

en el mundo de las comunicaciones digitales y la recepción de servicios satelitales. La sencillez del sistema lo convierte en una herramienta especialmente útil para introducir a estudiantes de ingeniería en estos campos.

El tamaño de la antena, junto con su estructura de soporte móvil, facilita el proceso de apuntado. Además, al contar con tres grados de libertad, permite abordar conceptos importantes como el acimut, la elevación y la inclinación. Asimismo, al tratarse de un satélite geoestacionario, se asegura su disponibilidad continua en una posición fija del cielo, lo que simplifica el proceso de apuntado.

El sistema también introduce la tecnología SDR, así como el valor de las herramientas de código abierto, destacando especialmente el papel de SatDump. Esta aplicación permite configurar de manera sencilla los parámetros de recepción y, además, ofrece funcionalidades para generar y modificar productos meteorológicos. Esto ayuda a introducir conceptos clave en el procesamiento de imágenes y en el monitoreo de fenómenos meteorológicos.

Gracias a las lecciones aprendidas durante la recepción de HRIT, fue posible dar el siguiente paso hacia la recepción de GRB. La recepción resultó exitosa, logrando obtener sin errores toda la información transmitida por ambas polarizaciones circulares del servicio. Este resultado es especialmente destacable, considerando tanto el alto volumen de datos que transmite GRB como la elevada resolución de sus imágenes. Por ejemplo, la imagen compuesta correspondiente a la polarización LHCP, que integra los canales 2 y 14, supera los 450 MB. Este logro adquiere aún más relevancia si se tiene en cuenta que GRB cuenta con una menor capacidad de corrección de errores que HRIT, con un FEC de $\frac{9}{10}$ frente a $\frac{1}{2}$. La posibilidad de generar imágenes compuestas de alta resolución de manera consistente para ambas polarizaciones representa un hito significativo, especialmente considerando el bajo costo, la simplicidad del diseño y la facilidad de implementación del sistema.

Cabe destacar que, debido a la capacidad de procesamiento de la computadora utilizada, la decodificación de la señal no puede realizarse en tiempo real, por lo que el procesamiento debe efectuarse de forma *offline*. No obstante, esta no es una limitación intrínseca del sistema diseñado, sino una restricción impuesta por el hardware disponible. Con un equipo de mayor capacidad, sería perfectamente viable realizar la recepción y el procesamiento de manera simultánea.

Considerando el costo y la sencillez de la implementación, el sistema diseñado para GRB surge como una gran alternativa a los sistemas de recepción tradicionales. Facilitando, de esta forma, la recepción de este servicio a agencias o instituciones con fondos limitados, brindando mayor autonomía para acceder a información crítica de observaciones de la Tierra.

Es cierto que muchos de los datos de GRB están disponibles en Internet; de hecho, la propia NOAA los distribuye a través de un repositorio público en Amazon Web Services (AWS). Esto plantea una pregunta: ¿Vale realmente la pena diseñar, construir y mantener una estación para recibir GRB, cuando estos datos ya están accesibles en línea? El futuro es incierto, especialmente para instituciones fuera de Uruguay, y muchas de las cosas que hoy damos por sentadas pueden cambiar repentinamente. No es prudente depender exclusivamente de la disponibilidad de Amazon ni de la buena voluntad de la NOAA en mantener estos datos accesibles

en servidores públicos, sobre todo al tratarse de información tan crítica para la predicción meteorológica. La posibilidad de construir un sistema sencillo y económico para recibir GRB ofrece una valiosa alternativa: una recepción local a los datos que normalmente se obtienen por Internet.

Este trabajo no buscó inventar algo nuevo, sino validar en la práctica y documentar dos sistemas de recepción de bajo costo basados en SDR. Poder recibir todos los servicios del satélite GOES-East de forma tan accesible y sencilla no es menor, especialmente considerando que los satélites GOES son probablemente los más importantes en Sudamérica en términos meteorológicos. En vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que los objetivos planteados fueron cumplidos con éxito.

7.2. Reflexiones

A lo largo del desarrollo de este proyecto, se adquirió conocimiento y experiencia en un amplio espectro de conceptos. Algunos de ellos son habituales en los cursos de la Facultad, mientras que otros fueron específicos del proyecto o incluso ajenos al mismo. Durante un año y cuatro meses, accedimos por primera vez a la azotea de la Facultad de Ingeniería, aprendimos a apuntar una antena hacia un satélite geoestacionario, a trabajar en profundidad con equipos de SDR y a ver la Tierra desde el espacio. También conocimos la Estación Terrena de Antel en Manga y a su equipo, aprendimos a trabajar sobre una antena parabólica de 3,9 m de diámetro y, fundamentalmente, a analizar y ajustar el sistema implementado, posiblemente la tarea más compleja de todo este proyecto.

Por otro lado, pudimos experimentar de forma directa el valor de los datos que nuestros sistemas pueden obtener, al presentar nuestro trabajo en la Tercera Edición de las Jornadas Meteorológicas del Uruguay, organizadas por Inumet, el 8 de noviembre de 2024. Durante el evento, tuvimos la oportunidad conocer el trabajo de los integrantes de Inumet y el LES en base a imágenes del satélite GOES-East.

Aprendimos a definir los lineamientos de un proyecto y a desarrollarlo por primera vez, desde la formulación de objetivos hasta su implementación práctica. En el proceso, enfrentamos desafíos tanto técnicos como organizativos, tomamos decisiones clave y mantuvimos una coordinación activa con nuestros tutores para llevarlo adelante. Además, experimentamos de primera mano la importancia de una correcta planificación, especialmente en trabajos de largo plazo. Cabe destacar que habría sido muy difícil, por no considerarla imposible, recibir GRB sin haber comenzado antes con HRIT, el cual nos permitió introducirnos en la recepción de señales satelitales.

Sin lugar a dudas, los conocimientos adquiridos y experiencias vividas superaron ampliamente cualquier expectativa que teníamos antes de comenzar a trabajar en el proyecto. A medida que surgieron dificultades durante el desarrollo del proyecto, fuimos capaces de identificar las causas, buscar soluciones y trabajar con perseverancia hasta resolver los problemas. Aprendimos que, en definitiva, *“el camino es la recompensa”*.

7.3. Trabajo a Futuro

Al tomar como base el trabajo realizado en este proyecto, surgen varias ideas para poder darle mayor valor al mismo. Algunas de ellas se detallan a continuación.

En primer lugar, el sistema diseñado por HRIT, podría emplearse como una opción para el Taller de Introducción a la Ingeniería en su opción de Comunicaciones Inalámbricas. Su implementación es sencilla, y el procedimiento seguido, incluyendo la adaptación de la longitud del dipolo y la incorporación del balun a la antena de Wi-Fi, permitirían dar conocimiento a los estudiantes sobre el funcionamiento de sistemas de comunicaciones inalámbricos. El estudio e implementación de un sistema de recepción de HRIT no es tampoco meramente una tarea educativa, ya que sus servicios proveen información en tiempo real con un nivel de procesamiento mayor que la de GRB, alertas y pronósticos del tiempo.

En segundo lugar, el sistema de GRB está a pocos pasos de poder estar funcionando en forma fija desde la Estación Terrena en Manga, considerando su etapa de radiofrecuencia (antena, Septum Feed, LNA y SDR). Resultaría muy valioso poder montar el sistema para poder operarlo de forma permanente estando al aire libre, dotándolo de protección frente a eventos climáticos como tormentas o lluvia. Todas las antenas de la Estación tienen conexión hacia una sala de servidores en el interior de la misma, durante el trabajo de recepción de GRB no se hizo uso de esta posibilidad, por lo que sería necesario calcular el nivel de señal que se tiene desde la sala de servidores para poder determinar el nivel necesario de amplificación del sistema. También se debería resolver la forma en la que se suministra corriente al LNA, típicamente esta función en sistemas de uso profesional se resuelve suministrando corriente usando el propio cable coaxial del sistema (denominado *bias tee*) desde el receptor. Esta función es implementada por algunos equipos SDR, pero el USRP B200mini no dispone de esta posibilidad, por lo que se podría considerar el uso de un insertor de corriente. Adicionalmente, el sistema debería acondicionarse para recibir simultáneamente ambas polarizaciones del satélite (LHCP y RHCP). Esto permitiría acceder a la totalidad de los datos meteorológicos transmitidos por el satélite, lo cual resulta indispensable para su aplicación en meteorología.

Finalmente, posiblemente el problema más complejo de resolver, es el de disponer de los medios para poder escribir las muestras capturadas por el SDR, procesarlas en vivo para decodificar los productos de GRB, poseer suficiente espacio de almacenamiento para guardarlos y crear una plataforma que permita el acceso a esta información a las partes interesadas, por ejemplo Inumet y el LES. Con respecto a la decodificación en vivo, un servidor de propósito general que tenga interfaces USB 3.0 dedicadas, es decir que no comparta los buses con otros puertos, alcanzaría los requerimientos para escribir las muestras de GRB sin problema. Resultarían necesarios recursos de procesamiento (CPU) y de memoria RAM suficientes para poder tener una decodificación funcional de los datos, que no introduzca un retardo elevado. En este punto, también podría analizarse el comportamiento de SatDump como herramienta de decodificación. SatDump, en su módulo de procesamiento para GRB, hace uso de únicamente un hilo del procesador, por lo que explorar la posibilidad de un procesamiento multithilo mejoraría el

7.3. Trabajo a Futuro

desempeño del sistema de forma considerable. También de la mano de este punto, se podría expandir el soporte de visualización de SatDump para también incluir la posibilidad de hacerlo con datos de GRB. Asimismo, considerando que GRB transmite de 1,5 TB a 2 TB, se debería analizar cuanta información es de interés almacenar y por cuanto tiempo, para permitir la reescritura de datos viejos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice A

Instalación y Uso de SatDump

Un punto fundamental del proyecto radica en el uso del software de código abierto para el procesamiento de datos satelitales **SatDump** [6]. Este programa tiene versiones disponibles para diversas distribuciones de Linux, Windows, MAC e incluso Android. En este proyecto se hizo uso exclusivo de las versiones para Linux de SatDump, principalmente con los sistemas operativos Debian 12, Ubuntu 24.04 y Zorin OS 17 Pro. El objetivo de este apéndice es presentar el procedimiento para la instalación, configuración y uso de SatDump

A.1. Instalación

A continuación se dará una guía para compilar desde el código fuente de SatDump en un sistema operativo basado en Debian.

1. Instalar dependencias para SatDump. Los comandos para hacer esto son:

```
sudo apt install git build-essential cmake g++ pkgconf  
libfftw3-dev libpng-dev libtiff-dev libjemalloc-dev  
libcurl4-openssl-dev  
sudo apt install libvolk-dev  
sudo apt install libnng-dev
```

2. Instalar dependencias opcionales:

```
sudo apt install libglfw3-dev zenity  
sudo apt install portaudio19-dev  
sudo apt install libzstd-dev  
sudo apt install libhdf5-dev  
sudo apt install librtlsdr-dev libhackrf-dev  
libairspy-dev libairspyhf-dev  
sudo apt install libad9361-dev libiio-dev  
sudo apt install libbladerf-dev
```


Apéndice A. Instalación y Uso de SatDump

```
sudo apt install libomp-dev
sudo apt install ocl-icd-opencl-dev
sudo apt install intel-opencl-icd
sudo apt install mesa-opencl-icd
```

3. Compilar el programa. Primero, clonar el repositorio desde GitHub:

```
git clone https://github.com/SatDump/SatDump.git
cd SatDump
mkdir build && cd build
```

4. Generar los archivos necesarios para compilar SatDump y compilarlo:

```
cmake -DCMAKE_BUILD_TYPE=Release -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr ..
make -j`nproc`
```

5. Instalar SatDump:

```
sudo make install
```

Una vez finalizado este proceso, disponemos de dos herramientas par usar SatDump: su versión interfaz gráfica (**satdump-ui**) y su versión de terminal (**satdump**). Durante el proyecto se utilizó principalmente la versión gráfica de SatDump, que luce como se ve en la Figura A.1.

A.2. Uso

El procedimiento que se debe seguir para utilizar SatDump para realizar la decodificación en vivo de un servicio es la siguiente:

1. Abrir SatDump y elegir la ventana **Recorder**.
2. En la opción **Device** elegir el SDR que estemos utilizando. Si se está utilizando un SDR conectado por red, elegir la opción Network Source.
3. Luego, elegir la frecuencia de muestreo (que determinará el ancho de banda a recibir). Como regla general, se debe al menos superar el ancho de banda de la señal a recibir. En este proyecto se usaron 3,5 Msps para HRIT, que tiene 1,2 MHz de ancho de banda y 13 Msps para GRB, que tiene 9,8 MHz de ancho de banda. También elegir el modo de ganancia o el valor de la misma para el SDR. Seleccionar la opción **Start**. Este valor también se puede ajustar luego, pero es importante determinar un valor óptimo para el correcto funcionamiento del sistema.

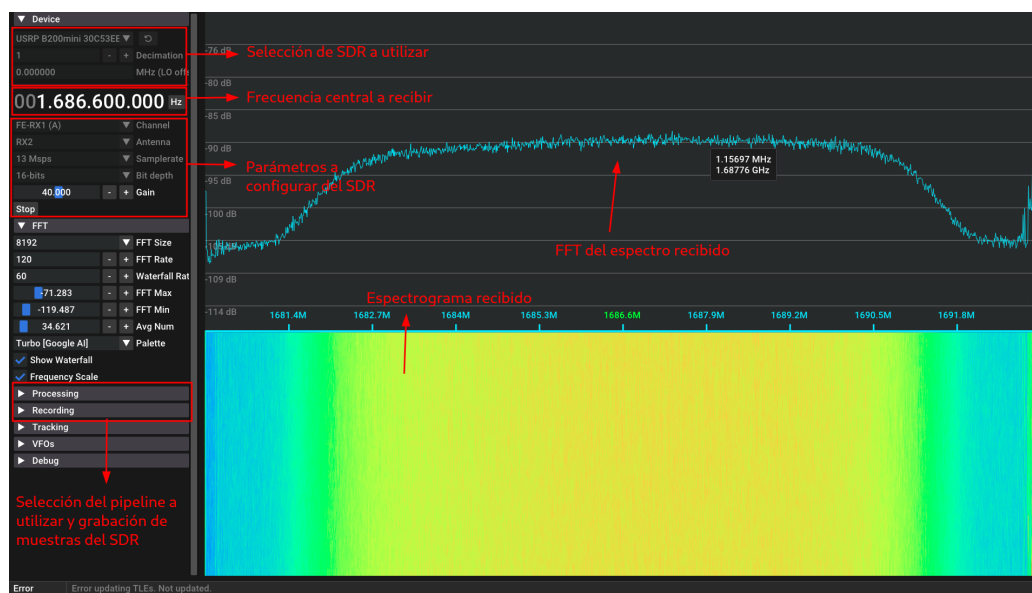


Figura A.1: Interfaz gráfica de SatDump, resaltando sus principales componentes

4. Luego en la opción **Processing**, elegir el pipeline a recibir (por ejemplo GOES-R: HRIT o GOES-R: GRB). Y configurar sus parámetros relevantes. Seleccionar la opción **Start**.
5. En este momento, se comenzará con la decodificación en tiempo real de la señal. Esto presenta una alta demanda de recursos en la computadora que se esté utilizando (escribir muestras del SDR y procesarla a la vez).
6. (Opcional) Para alivianar la carga en la computadora, podemos optar por dividir el trabajo en dos etapas. Primero, grabar las muestras bandabase en un archivo y luego decodificarlas. Para decodificarlas usando SatDump, elegimos la ventana **Offline processing** y allí se procede de manera similar a los pasos anteriores, elegimos el pipeline, lo configuramos y seleccionamos **Start**. Ahora, veremos una barra de progreso (0 a 100 %) que muestra el progreso de decodificación sobre la grabación bandabase.

En la Figura A.2 puede apreciarse el funcionamiento de SatDump decodificando una grabación bandabase de HRIT. En la misma se destacan los componentes principales de la interfaz. Los mismos son:

- Gráfico de la constelación de la muestras, junto a un gráfico del cálculo del SNR de la recepción, junto a los valores actuales, promedio y pico.
- Barra de progreso en la grabación.
- Estadísticas de la decodificación: Se muestra como se procesa la señal, con su corrección de errores y estadísticas para ver la calidad de la recepción: BER, estadísticas de la FEC, entre otros.

Apéndice A. Instalación y Uso de SatDump

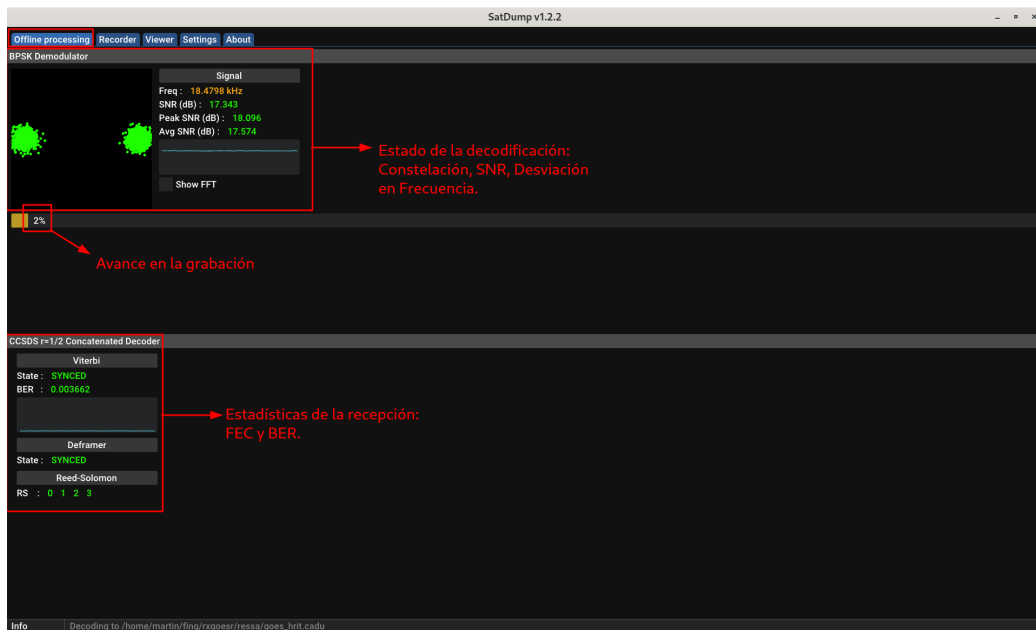


Figura A.2: Interfaz gráfica de SatDump, decodificando en forma offline una grabación bandabase de HRIT, tomada con el sistema de recepción en la Estación Terrena de ANTEL en Manga.

Por otro lado, en la Figura A.3, se muestra el funcionamiento de SatDump cuando se procesan las muestras en vivo. En la imagen se está usando una grabación de GRB, ya que la decodificación en vivo para este servicio requiere recursos de procesamiento muy elevados para realizar las tareas de muestreo del espectro y procesamiento en forma conjunta.

Los productos que se obtengan del procesamiento en SatDump son guardados en una estructura de carpetas, que sigue la siguiente forma para el caso de HRIT:

```
Recepcion_HRIT_231224/
|-- Admin Messages/
|-- DCS/
|-- EMWIN/
|-- IMAGES/
|   |-- GOES-16/
|   |   |-- Full Disk/
|   |   |-- Mesoscale 1/
|   |   '-- Mesoscale 2/
|   |-- GOES-18/
|   |   '-- Full Disk/
|   '-- NWS
|-- L2/
|   '-- GOES-16/
'-- LRIT/
```

A.2. Uso

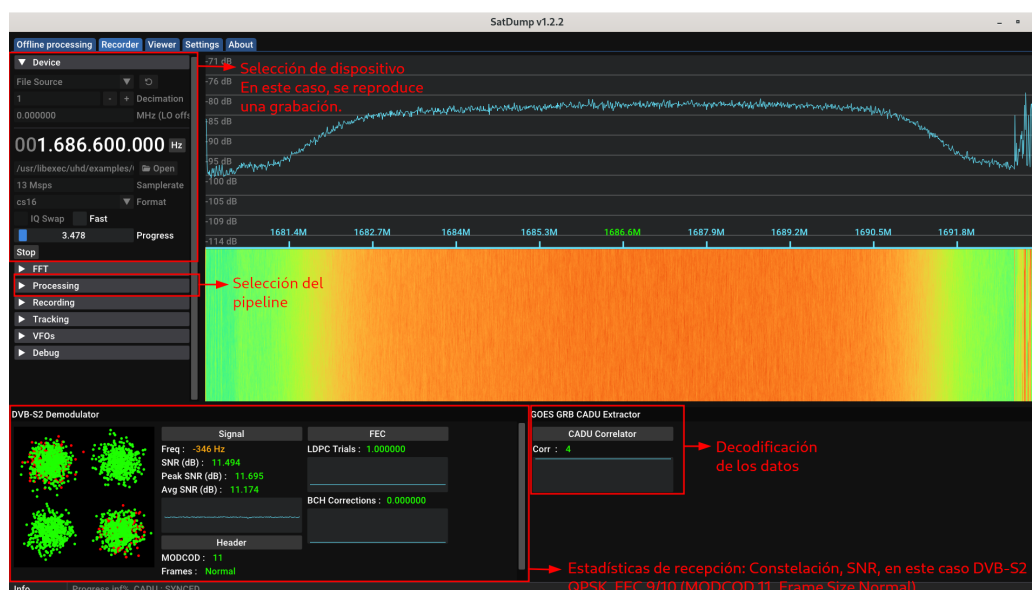


Figura A.3: Interfaz gráfica de SatDump, decodificando en forma live una grabación bandbase de GRB, tomada con el sistema de recepción en la Estación Terrena de ANTEL en Manga.

Para GRB, en su polarización circular derecha (RHCP), se sigue la siguiente estructura:

```
Recepcion_GRB_050625_RHCP/
|-- ABI/
|   |-- CONUS/
|   |-- FULLDISK/
|   |-- MES01/
|   '-- MES02/
|-- GLM/
|   |-- Event/
|   |-- Flash/
|   |-- Group/
|   '-- Meta/
|-- Information/
|-- goes_grb.cadu
'-- SUVI/
    |-- Fe094/
    |-- Fe132/
    |-- Fe171/
    |-- Fe195/
    |-- Fe284/
    '-- Fe304/
```

En el caso de la polarización circular izquierda (LCHP), que solo transmite imágenes del instrumento ABI, las carpeta SUVI y GLM no se crearán.

Apéndice A. Instalación y Uso de SatDump

Finalmente, SatDump tiene una opción de visualización y generación de productos a partir de los datos recibidos. Esta función, en los servicios trabajados en este proyecto, solo está implementada para HRIT. Para acceder a la misma, en SatDump, se elige la ventana **Viewer**. Allí, se debe cargar un producto con la opción **Open**, se debe buscar un archivo de nombre `product.cbor` dentro de una carpeta con imágenes, por ejemplo `../IMAGES/GOES-16/Full Disk/`, el cual contiene los metadatos para conocer los archivos que se pueden visualizar.

Una vez cargado el conjunto de productos, es posible:

- Editar la imagen de cada canal recibido.
- Agregarle un mapa del continente, agregarle capitales o ciudades.
- Crear composiciones con otros canales para generar productos meteorológicos.

En la Figura A.4 se puede apreciar esta herramienta de SatDump, siendo utilizada para generar un producto satelital a partir de imágenes recibidas de HRIT.

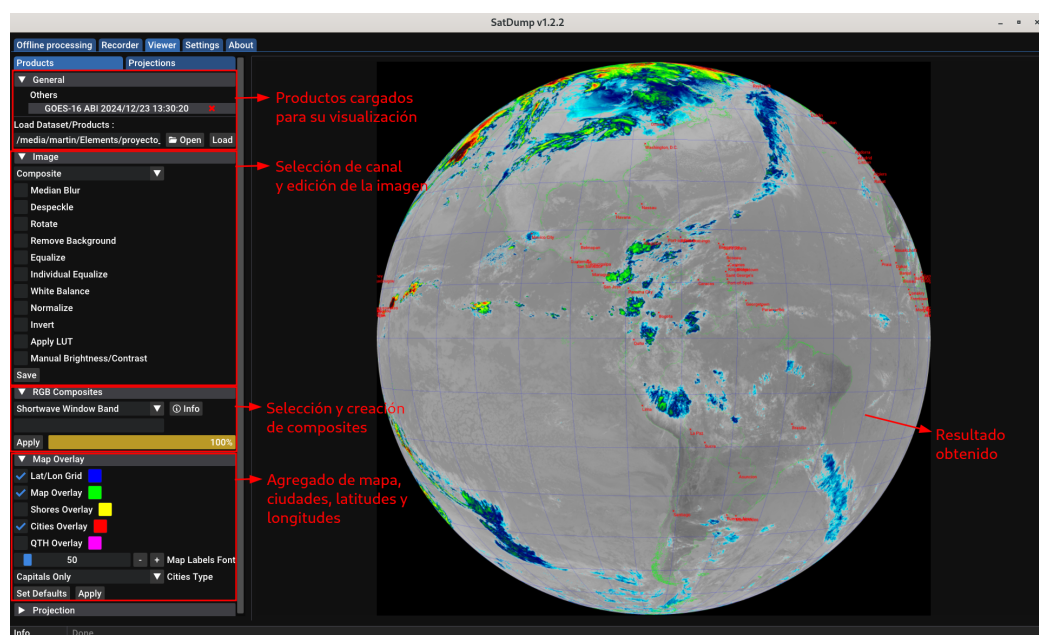


Figura A.4: Interfaz gráfica de SatDump, mostrando la visualización y generación de productos satelitales a partir de las imágenes recibidas de HRIT.

A.3. Configuración para el Uso con Parámetros Avanzados

Durante el uso de SatDump puede resultar necesario ajustar parámetros internos al pipeline que se esté utilizando. SatDump fija valores estables por defecto,

A.3. Configuración para el Uso con Parámetros Avanzados

pero puede ser necesario ajustarlos para lograr un funcionamiento adecuado o mejorar el desempeño de la decodificación.

Es posible ajustar estos valores desde la interfaz gráfica de la siguiente forma:¹

1. En SatDump elegir la ventana **Settings**.
2. Luego, dentro de la opción **Core Settings**, elegir **User Interface**.
3. Allí, habilitar la opción **Advanced Mode**. Guardar los cambios, en **Save**.

Para conocer la totalidad de parámetros que admite cada módulo, resulta necesario inspeccionar el código fuente de los mismos en el repositorio de SatDump, esta tarea no es necesariamente sencilla, pero si es necesaria para situaciones donde resulte necesario un ajuste extensivo de parámetros de recepción de un pipeline.

¹Esta posibilidad fue introducida en la versión 1.2.0 de SatDump.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice B

GEONETCast

Durante el transcurso del proyecto, se consideró la posibilidad de no poder concretar la recepción del servicio GOES Rebroadcast (GRB) de forma exitosa, en mayor parte debido al requerimiento de un feed que opere en la banda L y sea capaz de separar las polarizaciones circulares derecha (RHCP) e izquierda (LHCP) de forma adecuada. Por lo tanto, se decidió explorar la posibilidad de recibir servicios satelitales de características similares a GRB. En concreto, GEONETCast Americas (**GNC-A**) supone una excelente alternativa para poder recibir datos e imágenes del satélite GOES-East.

B.1. Introducción

GEONETCast es un servicio que contribuye al Sistema Global de Sistemas de Observación Terrestre (GEOSS) [81]. Este servicio utiliza información recabada por distintas organizaciones meteorológicas para generar productos y datos que son luego redistribuidos a los usuarios en diversas comunidades científicas y meteorológicas. Su objetivo es proporcionar información global que sirva como base para la elaboración de pronósticos del tiempo así como para la toma de decisiones en distintas áreas críticas, como la sostenibilidad de los ecosistemas, la resiliencia ante desastres, el desarrollo urbano sostenible, la gestión de los recursos hídricos, entre otros.

El servicio GEONETCast se compone por los esfuerzos de:

- La Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (**NOAA**), que utiliza su flota de satélites en el hemisferio occidental para contribuir con datos de esta región.
- La Administración Meteorológica de China (**CMA**) que provee datos de la región de Asia y el Océano Pacífico.
- La Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (**EUMETSAT**) que contribuye la información de Europa y África.

Apéndice B. GEONETCast

En la Figura B.1 se presenta el área de cobertura de los distintos componentes de GEONETCast, ubicados en América, Europa, África y Asia y Oceanía. En particular, es de nuestro interés el componente GEONETCast Americas (GNC-A).

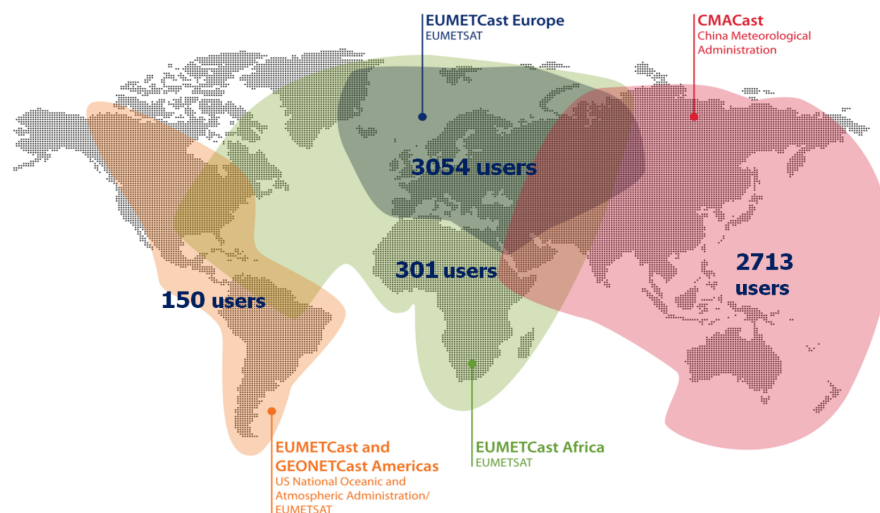


Figura B.1: Área de cobertura de los distintos componentes de GEONETCast [82].

GEONETCast Americas cuenta con varios productos, entre los cuales se encuentran las imágenes del instrumento ABI de los satélites GOES-East y GOES-West [83]. Para GOES-East se disponen de las 16 bandas del instrumento, al igual que en el servicio GRB.

Dado que los productos de GEONETCast Americas incluyen la información transmitida por GRB, se presenta como una alternativa viable para obtener dicha información.

B.2. Funcionamiento

Para la transmisión del servicio GEONETCast Americas (GNC-A) se utiliza el satélite comercial Intelsat-21 (IS-21), cuya ubicación es 58,0° W. Este satélite es operado por la empresa Intelsat y su área de cobertura comprende gran parte del continente americano y también parte de Europa. La misma puede ser apreciada en la B.2.

El servicio GNC-A es transmitido mediante el transpondedor 19C del satélite, como parte de un transporte gestionado por Intelsat. El mismo incluye además varios servicios de televisión y algunos de radio.

Los parámetros de recepción del servicio se detallan en la Tabla B.1.

La transmisión del servicio GNC-A se realiza como parte del flujo de Transport Stream (MPEG-TS), utilizando un identificador de paquete (PID) específico, 4201, para identificar y separar dicho servicio del resto del flujo multiplexado.

La tasa de datos del servicio es de 20 Mbps, lo que corresponde a la cuarta parte de la carga útil del transporte satelital. La resolución espacial de las imágenes es

B.2. Funcionamiento

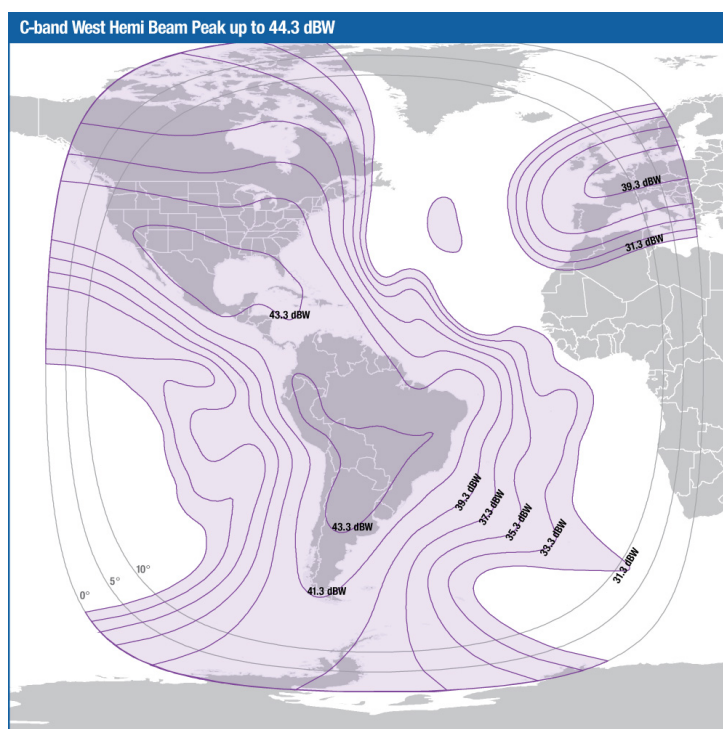


Figura B.2: Huella del satélite Intelsat-21 [84].

Parámetro	Valor
Frecuencia	4080 MHz
Polarización	Lineal - Vertical
Modulación	DVB-S2
Constelación	8-PSK
Tasa de símbolos	30 Msps
FEC	$5/6$

Tabla B.1: Parámetros de recepción del transporte en el que se encuentra GNC-A [85].

idéntica a las distribuidas por GRB, que tiene una tasa de datos de 30 Mbps, quitando la banda 2, que tiene una resolución de 1 km en lugar de 0,5 km. GNC-A no incluye las imágenes capturadas por el ABI correspondientes a los Estados Unidos contiguos (CONUS) y las imágenes de las dos regiones de Mesoescala.

La diferencia entre la transmisión de GRB y la de GNC-A radica en la frecuencia con la que se transmiten las imágenes satelitales de disco completo, en la B.2 se pueden las frecuencias de transmisión de las distintas imágenes provistas por los servicios GNC-A y GRB. Mientras que GRB retransmite las imágenes del instrumento ABI con una frecuencia de entre 5 y 15 minutos dependiendo del modo de operación [57], GNC-A lo hace con una frecuencia de entre 10 y 30 minutos según

Apéndice B. GEONETCast

que banda del instrumento ABI se esté transmitiendo.

Servicio	Frecuencia de transmisión	Bandas
GNC-A	Cada 10 minutos 00 – 10 – 40 – 50 (minutos, cada hora)	2, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15 1, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 16
GRB	Modo 3: cada 15 minutos Modo 4: cada 5 minutos Modo 6: cada 10 minutos	Todas las bandas Todas las bandas Todas las bandas

Tabla B.2: Frecuencias de transmisión de imágenes Full Disk del instrumento ABI del satélite GOES-East según los servicios GNC-A y GRB.

Esto se debe a que GNC-A está diseñado para facilitar el acceso a imágenes y productos de observación terrestre al mayor número de usuarios posible. Por su parte, GRB está orientado a proporcionar un acceso más cercano al tiempo real de las observaciones terrestres.

B.3. Recepción

La principal limitante para la recepción de productos satelitales suele ser el costo asociado al sistema de recepción. GEONETCast Americas busca abordar este desafío, proporcionando un servicio “orientado al usuario, fácil de utilizar y de bajo costo” [86]. Esta iniciativa proporciona una guía detallada con los requerimientos necesarios para implementar un sistema de recepción [85]. Un esquema del sistema de recepción recomendado se puede apreciar en la Figura B.3.

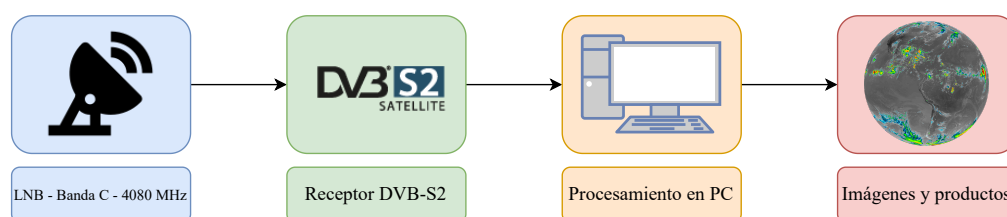


Figura B.3: Diagrama de recepción del servicio GNC-A.

El sistema está formado por una antena capaz de operar en la banda de frecuencia de trabajo, banda C, que para los satélites comerciales de televisión comprende el rango de 3625 MHz a 4200 MHz. Esta antena debe estar equipada con un Low-Noise Block Downconverter (LNB) el cuál actúa como filtro pasabanda y amplificador de la señal, además de trasladar la señal recibida a una frecuencia menor (*downconversion*), para minimizar las pérdidas. Este sistema podría ser montado en la estación terrena de Antel en Manga con el equipamiento allí disponible.

El siguiente paso corresponde a la demodulación de la señal recibida. El estándar de transmisión utilizado es DVB-S2, por lo que se necesita emplear un receptor

B.3. Recepción

capaz de trabajar con señales de este formato. La recomendación de la NOAA es utilizar un receptor DVB-S2 comercial de la marca Novra S400 Pro, el cual puede observarse en la Figura B.4. Novra es la empresa asociada con la NOAA para trabajar en la recepción de sus servicios satelitales.



Figura B.4: Receptor satelital DVB-S2 Novra S400 Pro [87].

Una vez recibida la señal, se debe procesar para obtener las imágenes y productos. La NOAA recomienda utilizar el programa *Fazst Professional Client* de KenCast [88], empresa con la que está también asociada la NOAA. Hasta setiembre de 2023, este software era la única alternativa para poder recibir GEONETCast Americas.

El receptor satelital DVB-S2 Novra S400 Pro y el software de KenCast implican un costo considerable. Debido a este motivo, se decidió explorar la posibilidad de implementar la recepción del servicio sustituyendo estos elementos por otros que puedan desempeñar su función.

En primer lugar, la recomendación sobre el modelo de receptor satelital DVB-S2 no imposibilita utilizar otro modelo de receptor satelital DVB-S2, una ventaja de que la transmisión del servicio se realice con un estándar ampliamente utilizado en la industria. También es posible realizar esta tarea utilizando la tecnología SDR.

En segundo lugar, en lo que respecta al procesamiento del servicio en PC, en setiembre de 2023 la versión 1.1.0 de SatDump incorporó un flujo de procesamiento para el servicio GEONETCast. Esto lo convierte en una alternativa gratuita al software recomendado por la NOAA, que hasta entonces era la única opción disponible para acceder a la información de GNC-A.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice C

Método del Segundo y el Cuarto Momento para la Estimación del SNR

Para dar una estimación de la calidad de la recepción que se tiene, SatDump utiliza el método del Segundo y Cuarto momento para computar un valor estimativo del SNR de la señal recibida. Este método también es utilizado por GNU Radio [89]

C.1. Estimación del SNR

Este método analiza las muestras complejas (I/Q) antes de la demodulación, calculando el segundo momento como la potencia total de la señal y el cuarto momento como una medida de la dispersión de la constelación causada por el ruido. A partir de estas dos métricas, SatDump estima el SNR como una relación entre la energía de la señal útil y la energía del ruido, lo que permite evaluar la calidad del enlace de recepción en tiempo real.

Considerando muestras complejas de la forma:

$$r[n] = I[n] + j \cdot Q[n] \quad (\text{C.1})$$

Donde $I[n]$ representa el componente en Fase y $Q[n]$ el componente en cuadratura, se calcula el Momento de Segundo orden (M_2) de la siguiente manera:

$$M_2 = \mathbb{E}\{|r[n]|^2\} \quad (\text{C.2})$$

Y el Momento de Cuarto orden (M_4) se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_4 = \mathbb{E}\{|r[n]|^4\} \quad (\text{C.3})$$

De esta manera, la estimación del SNR a partir de M_2 y M_4 se realiza a través de la siguiente ecuación:

Apéndice C. Método del Segundo y el Cuarto Momento para la Estimación del SNR

$$\text{SNR (dB)} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{M_2^2 - \frac{1}{2}M_4}{\frac{1}{2}M_4 - M_2^2} \right) \quad (\text{C.4})$$

En resumen, la estimación del SNR mediante el método de los momentos de Segundo y Cuarto orden proporciona una forma eficiente, de bajo costo computacional y no supervisada de evaluar la calidad de una señal digital directamente a partir de las muestras complejas recibidas.

C.2. Cálculo de E_B/N_0 a Partir del SNR

A partir de la estimación del SNR, es posible calcular la relación entre la energía de bit (E_B) y la potencia del ruido (N_0). La relación entre estas magnitudes cuantifica la energía disponible para transmitir cada bit de información en relación al nivel de ruido presente, lo que proporciona una estimación del desempeño del sistema.

La explicación de esta sección se basa en el material de Leslie A. Rusch [90]. En primer lugar, la razón E_B/N_0 puede expresarse de acuerdo a la Ecuación C.5, expresada en decibels.

$$E_B/N_0 = \text{SNR} + \frac{B}{R_b} \quad (\text{C.5})$$

En esta ecuación, SNR representa la relación señal a ruido, que en nuestro caso consideramos la estimación del método descrito antes. B es el ancho de banda de la señal y R_b es la tasa de bits empleada. Consideramos sistemas digitales que utilizan como pulso conformador el pulso Squared Root-Raised Cosine (SRRC), por lo que B puede expresarse de la forma que se detalla en la Ecuación C.6.

$$B = R_s \cdot (1 + \beta) \quad (\text{C.6})$$

R_s es la tasa de símbolo utilizada, que se relaciona con R_b mediante la Ecuación C.7. En la ecuación, M representa la cantidad de puntos en la constelación utilizada.

$$R_b = R_s \cdot \log_2(M) \quad (\text{C.7})$$

Aplicando las Ecuaciones C.7 y C.6 en la Ecuación C.5, obtenemos la Ecuación C.8.

$$E_B/N_0 = \text{SNR} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1 + \beta}{\log_2(M)} \right) \quad (\text{C.8})$$

Los sistemas trabajados en este proyecto tienen las siguientes características:

- HRIT:
 - β : 0.30.
 - $M = 2$.

C.2. Cálculo de E_B/N_0 a Partir del SNR

- GRB:

- β : 0.25.
- $M = 4$.

Por lo tanto, las estimaciones de E_B/N_0 para cada servicio son las siguientes:

- HRIT: $E_B/N_0 = SNR + 1,14$ dB.
- GRB: $E_B/N_0 = SNR - 2,04$ dB.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice D

Productos Obtenidos de High Rate Information Transmission (HRIT)

Como se mencionó anteriormente, HRIT transmite varios productos además de imágenes de la superficie terrestre. En este apéndice se presentan los productos de una transmisión completa de HRIT, con fecha 23 de diciembre de 2024 a las 10:22.

D.1. Imágenes de Disco Completo - GOES-East

Para comenzar, presentamos las imágenes capturadas por el propio GOES-East, en siete bandas espectrales. Para facilitar su visualización, les agregamos un mapa con los países del continente americano, una función propia de la sección de Visualización de SatDump.

- Banda 2 en la Figura D.2.
- Banda 7 en la Figura D.3.
- Banda 8 en la Figura D.4.
- Banda 9 en la Figura D.5.
- Banda 13 en la Figura D.6.
- Banda 14 en la Figura D.7.
- Banda 15 en la Figura D.8.

En la Figura D.1, se presenta una composición de falso color, que combina los canales 1, 2 y 5 para los canales Rojo, Verde y Azul, e incorpora información de los canales 13, 14 y 15 para mejorar el contraste en las zonas menos iluminadas. De esta forma es que se puede observar en la imagen las luces nocturnas en Norteamérica; recordemos que la foto es de las 10:00 AM de Uruguay, que corresponde a las 6:00 AM en la costa Oeste de EE.UU. y que la foto fue tomada en diciembre.

Apéndice D. Productos Obtenidos de High Rate Information Transmission (HRIT)



Figura D.1: Composición falso color en base a imágenes de GOES-East.

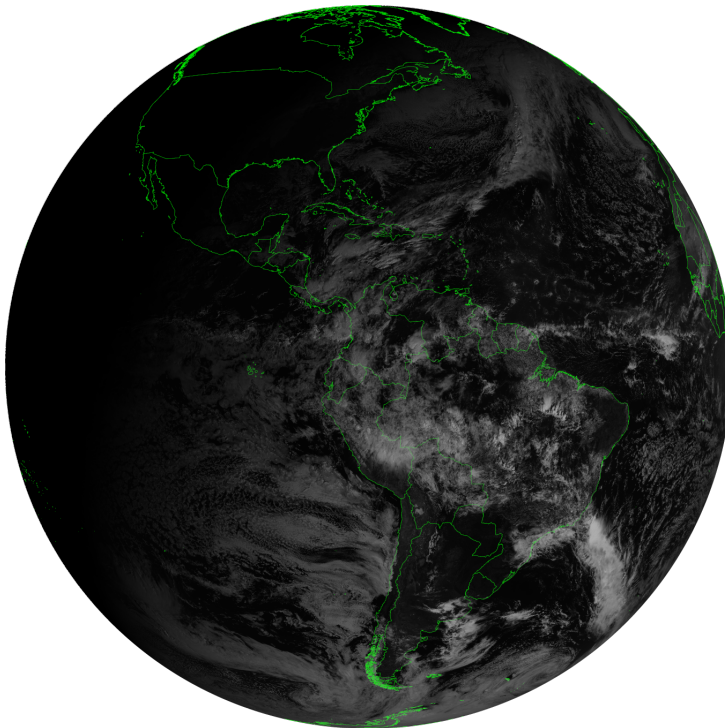


Figura D.2: Banda 2 de GOES-East, corresponde al rango de longitudes de onda visibles.

D.1. Imágenes de Disco Completo - GOES-East

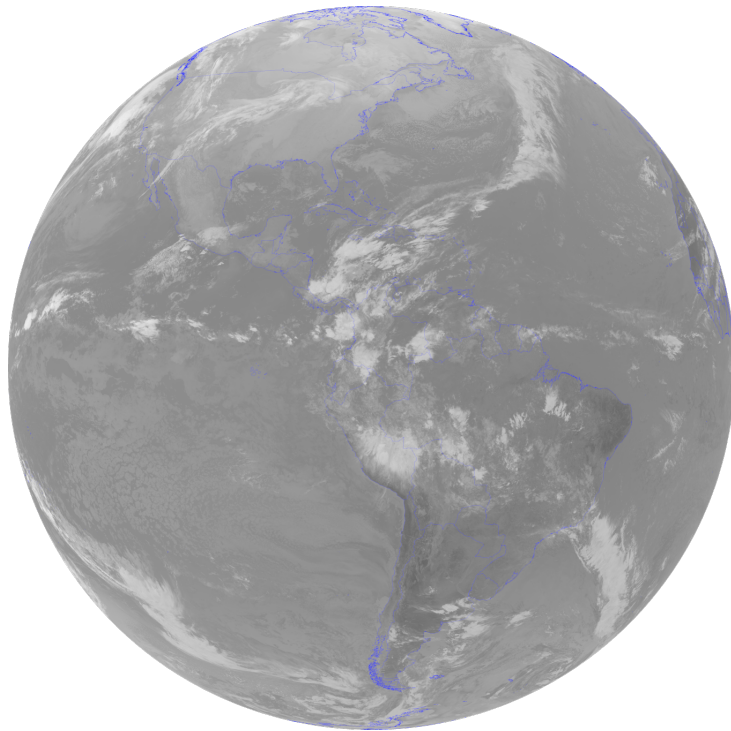


Figura D.3: Banda 7 de GOES-East, corresponde al rango de bandas infrarrojas.

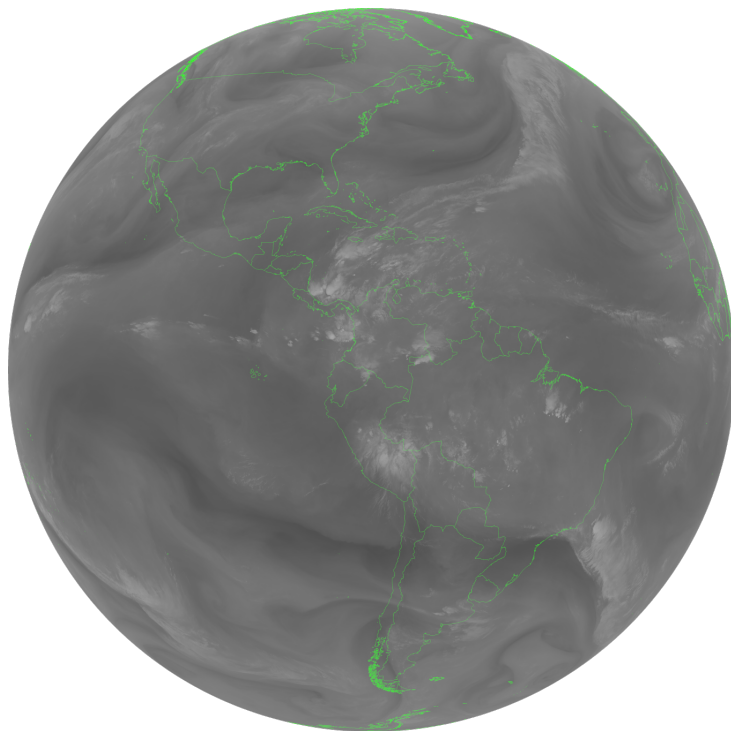


Figura D.4: Banda 8 de GOES-East, corresponde también al rango de bandas infrarrojas.

Apéndice D. Productos Obtenidos de High Rate Information Transmission (HRIT)

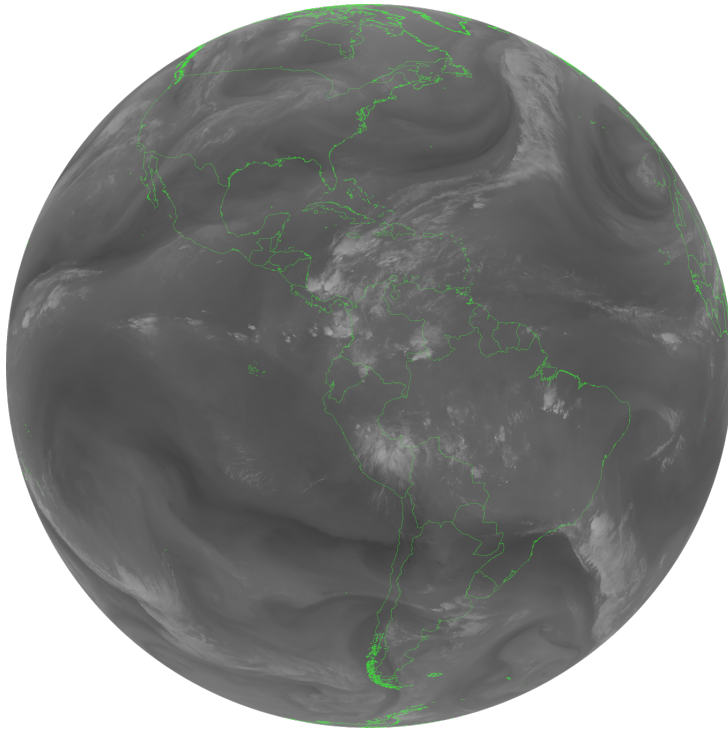


Figura D.5: Banda 9 de GOES-East, dentro del rango de bandas infrarrojas.

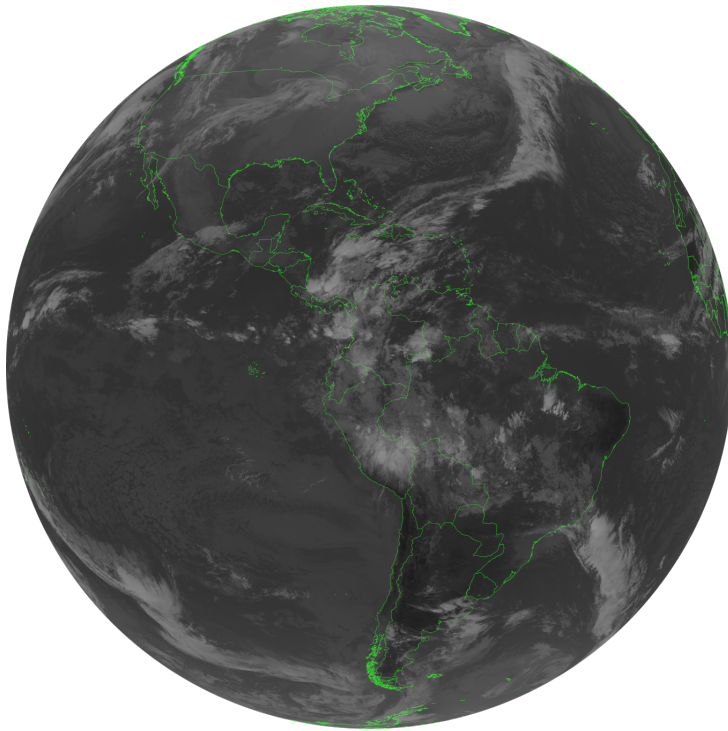


Figura D.6: Banda 13 de GOES-East, dentro del rango de bandas infrarrojas.

D.1. Imágenes de Disco Completo - GOES-East

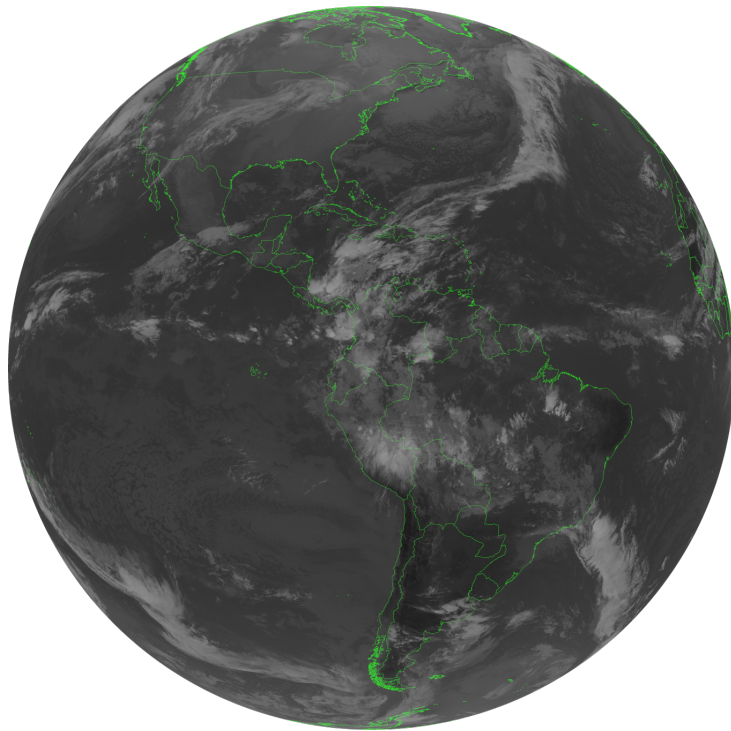


Figura D.7: Banda 14 de GOES-East, dentro del rango de bandas infrarrojas.

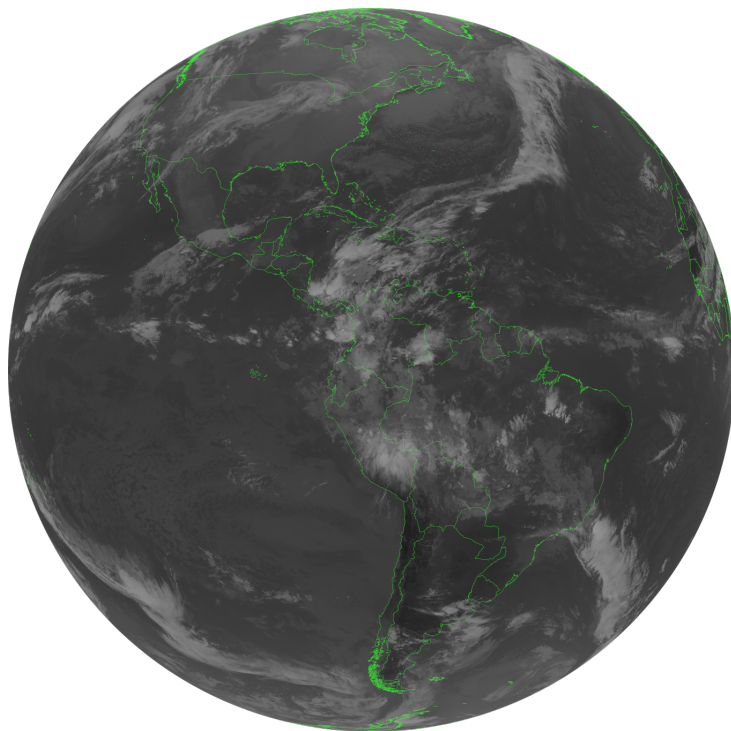


Figura D.8: Banda 15, dentro del rango de bandas infrarrojas.

Apéndice D. Productos Obtenidos de High Rate Information Transmission (HRIT)

D.1.1. Imágenes de Disco Completo - GOES-West

En la Figura D.9 se presenta la única imagen que retransmite HRIT capturada por el satélite GOES-West. Este satélite está ubicado en 137 °W, por lo que cubre principalmente el área del Océano Pacífico.

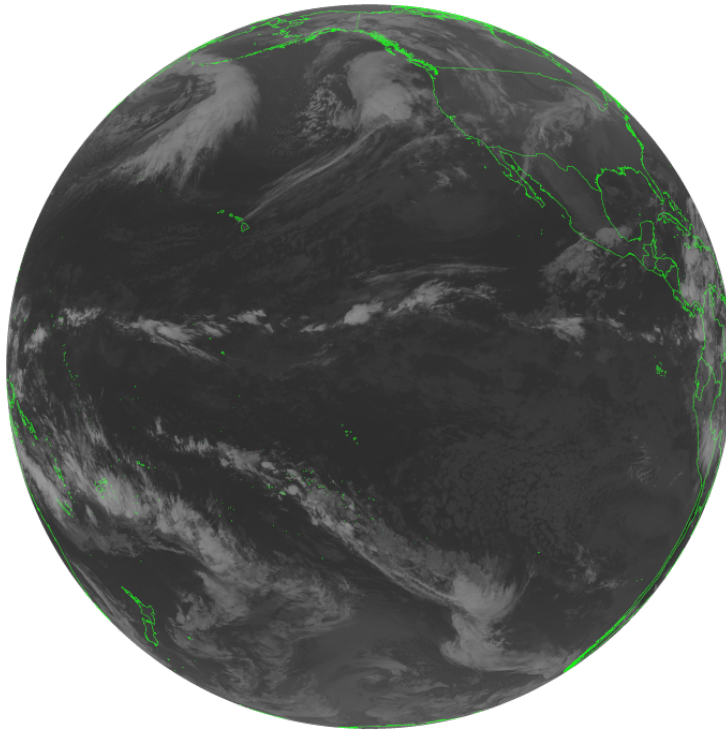


Figura D.9: Banda 13 del GOES-West.

D.1.2. Imágenes de Mesoescala - GOES-East

Como se explicó anteriormente, el instrumento ABI también es capaz de capturar imágenes que cubren una superficie menor que todo el disco, las imágenes de mesoescala. En concreto, se transmiten imágenes de 2 regiones. En la Figura D.10 se muestra una composición RGB de la primera región. Se le agregaron nombres de las ciudades que abarca para facilitar la identificación de la misma.

D.1. Imágenes de Disco Completo - GOES-East

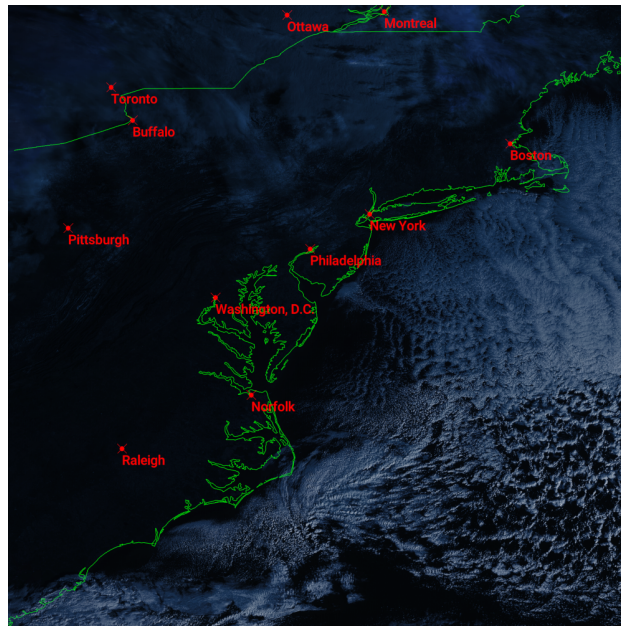


Figura D.10: Composición a color de Mesoescala 1.

Por otro lado, en la Figura D.11 se muestra una composición RGB de la segunda región. Se le agregaron nombres de las ciudades que abarca para facilitar la identificación de la misma.

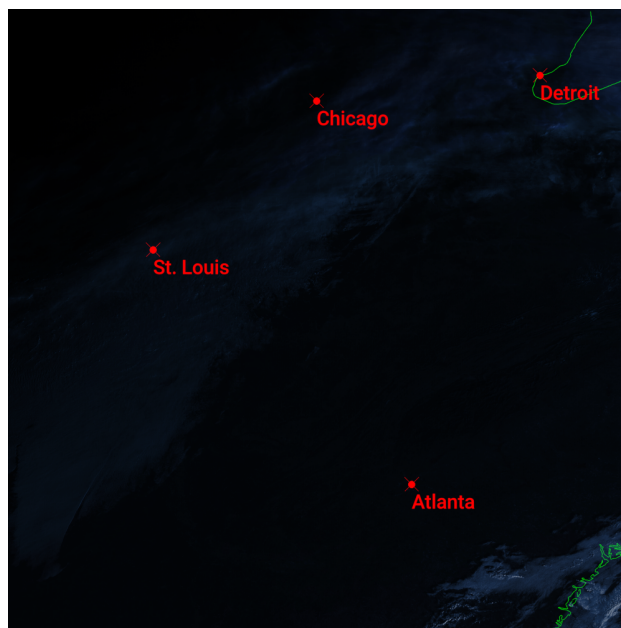


Figura D.11: Composición a color de Mesoescala 2.

Apéndice D. Productos Obtenidos de High Rate Information Transmission (HRIT)

D.1.3. Imágenes de Himawari y EUMETSAT

En la Figura D.12 se puede apreciar una retransmisión de una imagen capturada por el satélite METEOSAT-9, operado por la agencia europea de satélites meteorológicos EUMETSAT. Esta imagen corresponde a la banda de $10,8\text{ }\mu\text{m}$, que en términos de las bandas capturadas por el ABI de los satélites GOES se ubicaría entre las bandas 13 ($10,3\text{ }\mu\text{m}$) y 14 ($11,2\text{ }\mu\text{m}$).

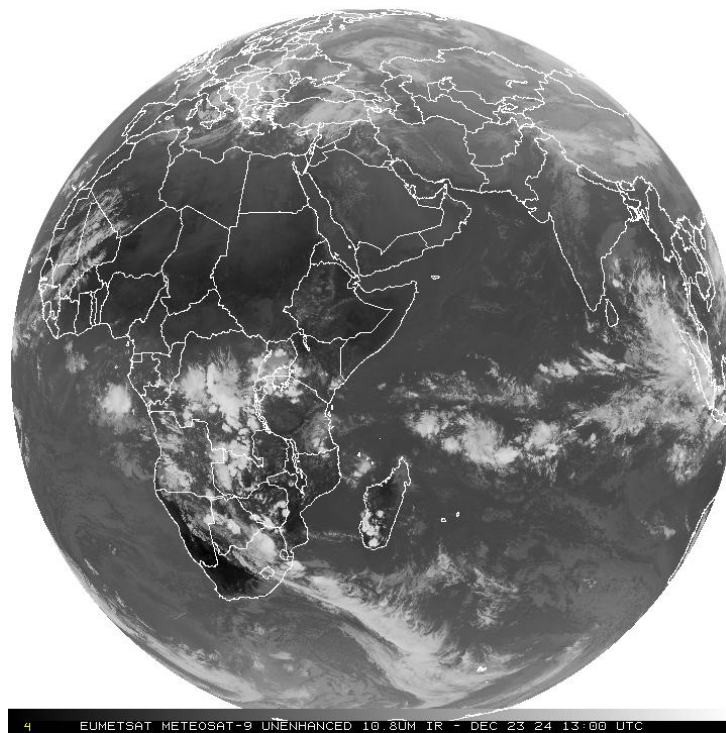


Figura D.12: Imagen de la banda de $10,8\text{ }\mu\text{m}$ de satélite METEOSAT-9, ubicado en $45,5^{\circ}\text{E}$.

Además, en la Figura D.13 se muestra una retransmisión de una imagen capturada por el satélite Himawari, operado por la Agencia Meteorológica de Japón. La imagen corresponde a la banda 4 del instrumento Advanced Himawari Imager (AHI, basado en el ABI de los satélites GOES) que tiene una longitud de onda de $0,86\text{ }\mu\text{m}$, lo que corresponde a la banda 3 de los satélites GOES.

D.1. Imágenes de Disco Completo - GOES-East

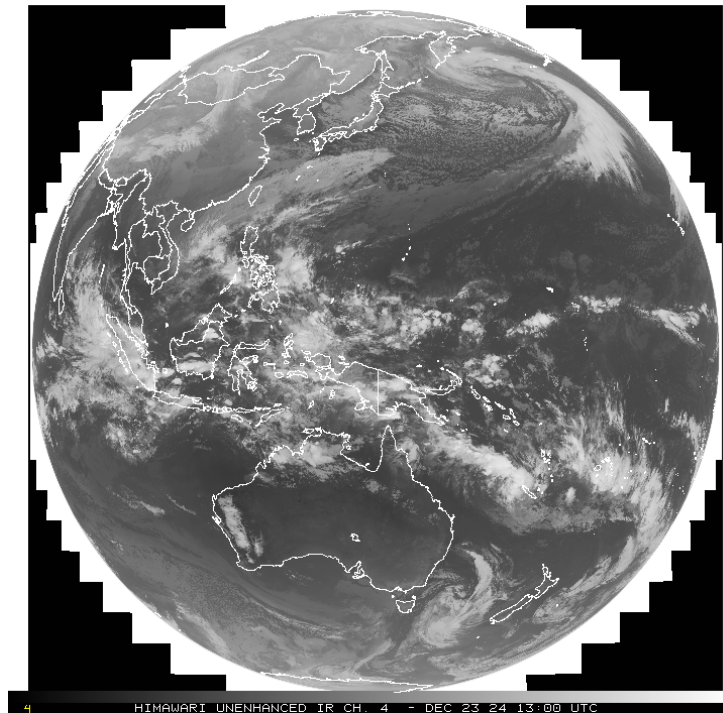


Figura D.13: Imagen de la banda 4 del satélite Japonés Himawari, ubicado en 140,7°E.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice E

Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)

En este apéndice presentamos ejemplos de imágenes y datos recibidos de GOES Rebroadcast (GRB). Como observación general, estos datos tienen un nivel de procesamiento menor al de HRIT, ya que se reciben en su mayoría datos crudos.

Los resultados que se presentan en esta sección fueron obtenidos el jueves 5 de junio de 2025, a las 9:26 de la mañana en el caso de los productos de RHCP y a las 10:50 en el caso de los productos de LHCP.

Además, a diferencia de HRIT, no es posible editar y combinar las imágenes recibidas para formar productos meteorológicos en SatDump, ya que en la versión utilizada durante el proyecto, la 1.2.2, no se contaba con soporte para estas tareas con productos de GRB.

E.1. Productos de la Polarización Circular Izquierda (LHCP)

En esta sección se presentan los resultados de los datos provistos en la polarización LHCP. Estos son:

- Banda 2 en la Figura E.2.
- Banda 7 en la Figura E.3.
- Banda 8 en la Figura E.4.
- Banda 10 en la Figura E.5.
- Banda 14 en la Figura E.6.
- Banda 15 en la Figura E.7.
- Banda 16 en la Figura E.8.

Apéndice E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)



Figura E.1: Composición a color formada a partir de las Figuras E.2 y E.6.



Figura E.2: Canal 2 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.

E.1. Productos de la Polarización Circular Izquierda (LHCP)



Figura E.3: Canal 7 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.



Figura E.4: Canal 8 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.

Apéndice E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)

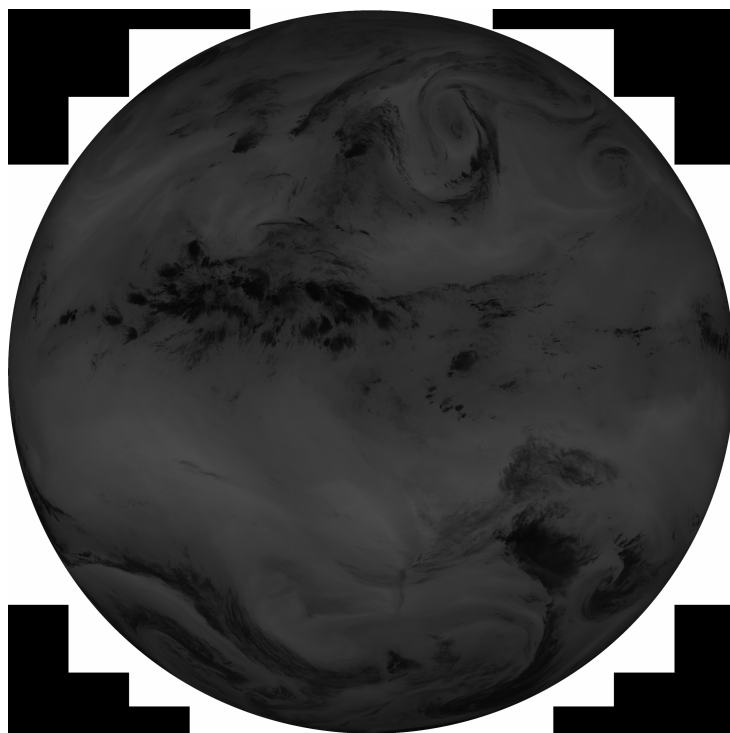


Figura E.5: Canal 10 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.

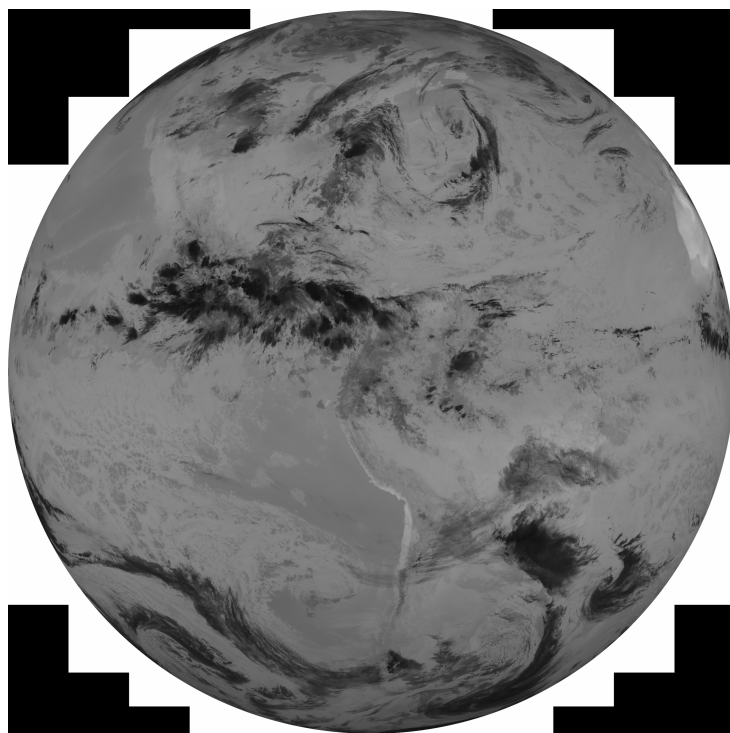


Figura E.6: Canal 14 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.

E.1. Productos de la Polarización Circular Izquierda (LHCP)

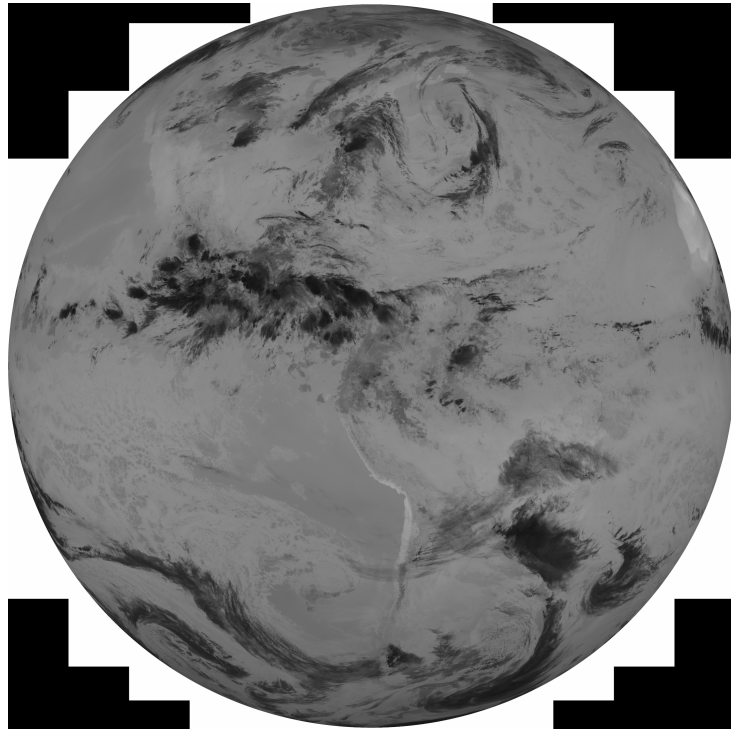


Figura E.7: Canal 15 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.

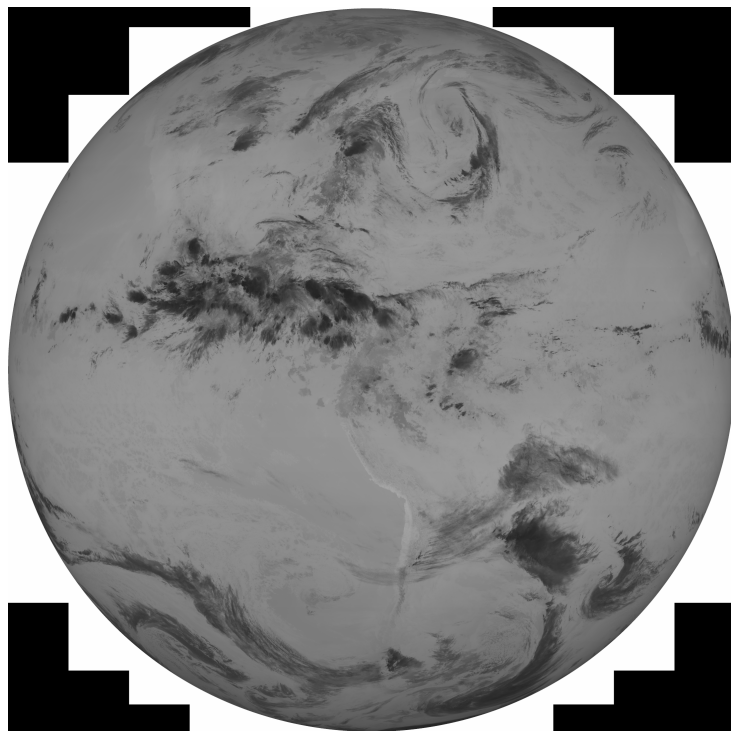


Figura E.8: Canal 16 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.

Apéndice E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)

Además, en la Figura E.1, se presenta una composición a color realizada a partir de las imágenes de los canales 2 y 14, recibidos en la polarización LHCP.

En esta polarización también se incluyen las dos imágenes de Mesoescala que transmite el satélite. Dado que tienen características similares a las que transmite HRIT, no fueron incluidas en esta sección.

Una diferencia con HRIT es la presencia de las imágenes **CONUS** (*Contiguous United States*) imágenes que muestran un plano de América del Norte, comprendiendo el territorio contiguo de EE.UU. (excluyendo Alaska, Hawái y las demás posesiones de ultramar del país). Una imagen de este grupo puede apreciarse en la Figura E.9.

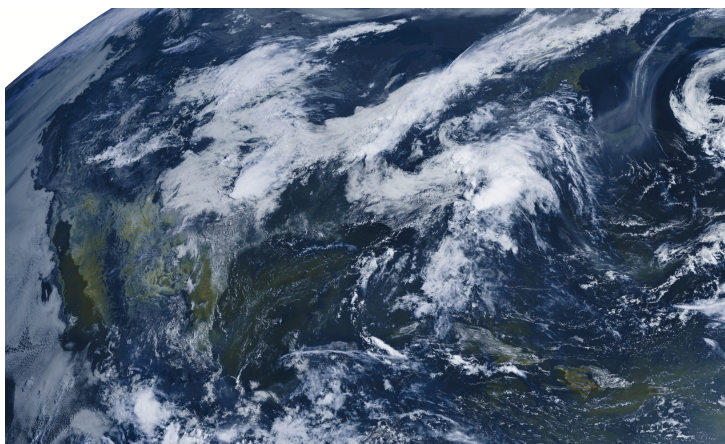


Figura E.9: Imagen **CONUS** formada a partir de los canales 2 y 14.

E.2. Productos de la Polarización Circular Derecha (RCHP)

En esta sección se presentan los resultados de los datos provistos en la polarización RHCP. Estos son:

- Banda 1 en la Figura E.11.
- Banda 3 en la Figura E.12.
- Banda 4 en la Figura E.13.
- Banda 5 en la Figura E.14.
- Banda 6 en la Figura E.15.
- Banda 9 en la Figura E.16.
- Banda 11 en la Figura E.17.
- Banda 12 en la Figura E.18.

E.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)



Figura E.10: Composición a color formada a partir de las Figuras E.11, E.12 y E.14.

- Banda 13 en la Figura E.19.

Adicionalmente, SatDump genera una composición a color, en base a los canales 1, 3 y 5. Esta composición, cuyo contraste fue ajustado, se muestra en la Figura E.10.

En esta polarización también se incluyen las dos imágenes de Mesoescala que transmite el satélite. Dado que tienen características similares a las que transmite HRIT, no fueron incluidas en esta sección.

Una composición a color de **CONUS**, semejante a la de la Figura E.10, se presenta en la Figura E.20

Finalmente, aprovechando la gran resolución espacial de estas imágenes, generamos un recorte de la imagen Full Disk, la de la Figura E.10, para comprender la superficie de Uruguay. Esta imagen se puede observar en la Figura E.21.

E.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)

Una diferencia con respecto a HRIT, es el hecho de que GRB incorpora, en su polarización RHCP, la transmisión de imágenes de la corona Solar en distintas longitudes de onda ultravioletas, típicamente del orden de 10^{-10} m, que toma el valor de una unidad cuyo nombre es el Ångström (Å). SatDump tiene soporte para la decodificación de las mismas, y en esta sección se presentan estas imágenes.

Apéndice E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)



Figura E.11: Canal 1 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.



Figura E.12: Canal 3 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.

E.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)



Figura E.13: Canal 4 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.



Figura E.14: Canal 5 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.

Apéndice E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)



Figura E.15: Canal 6 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.

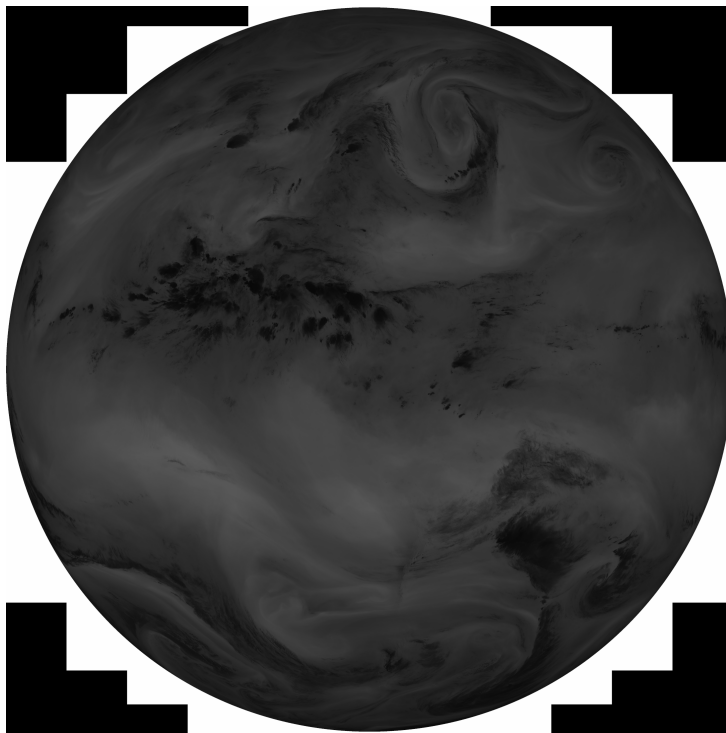


Figura E.16: Canal 9 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.

E.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)

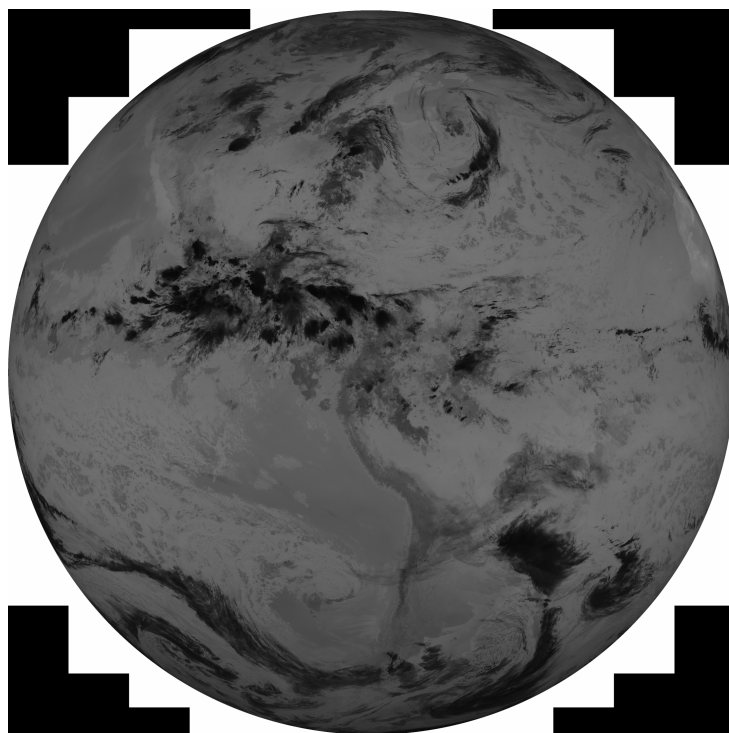


Figura E.17: Canal 11 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.

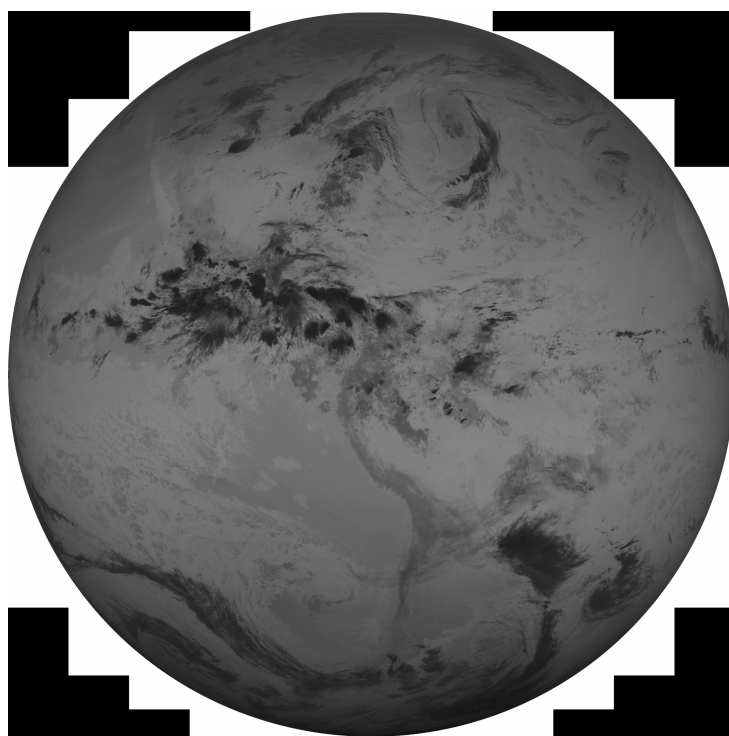


Figura E.18: Canal 12 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.

Apéndice E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)

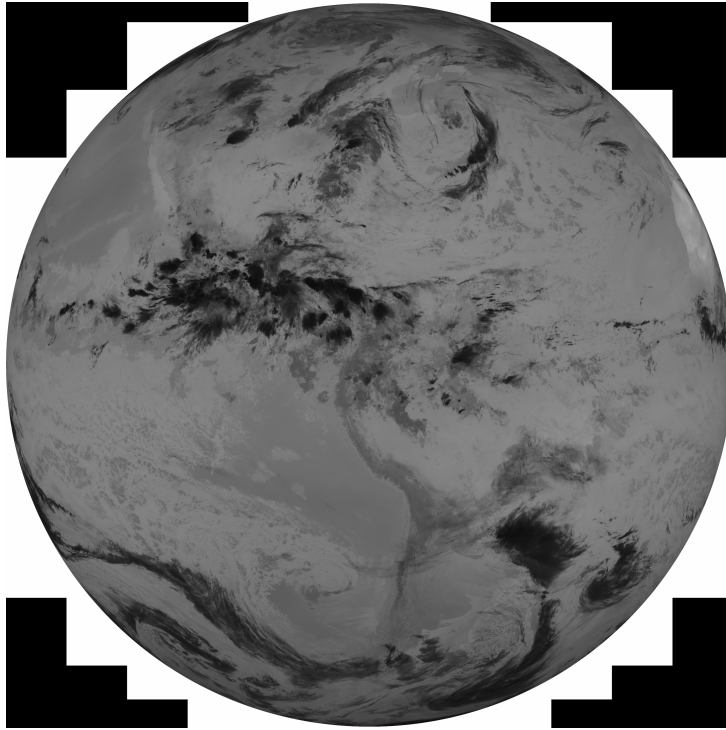


Figura E.19: Canal 13 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.

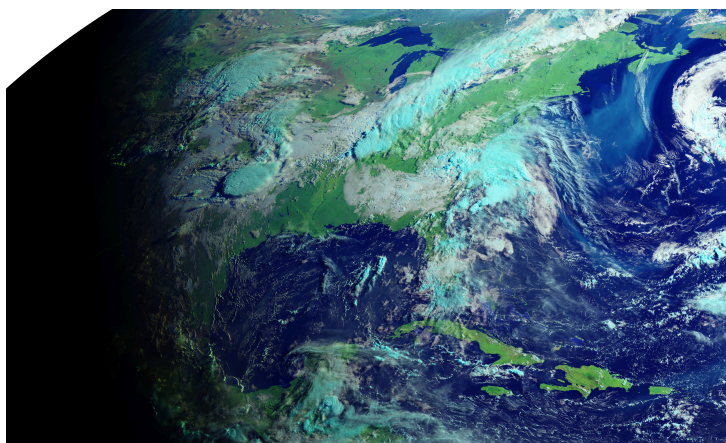


Figura E.20: Imagen **CONUS**, formada como composición a color de los canales 1, 3 y 5.

E.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)

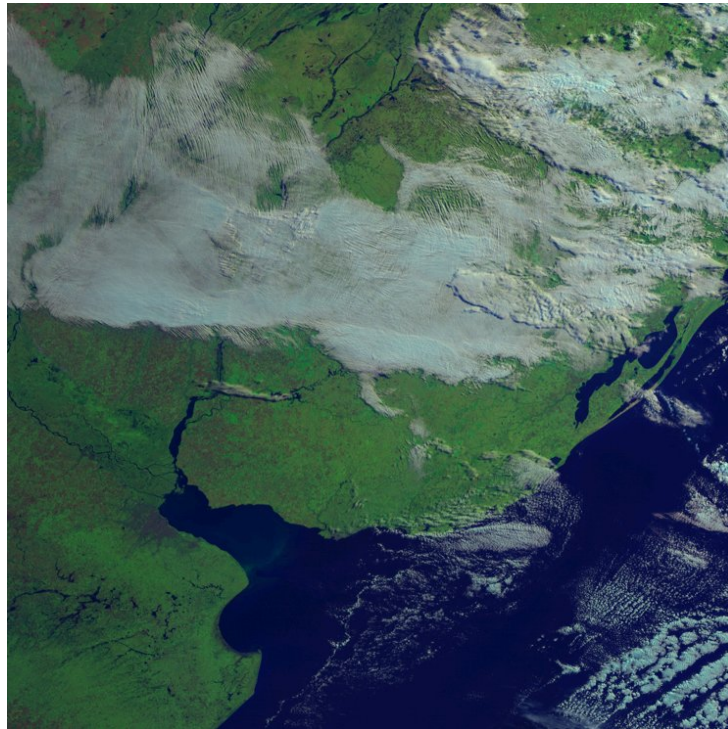


Figura E.21: Imagen del territorio de Uruguay, formada como composición a color de los canales 1, 3 y 5.

Estos datos son una gran novedad, y su uso se encuentra en fases iniciales por parte de la NOAA, por lo que es posible recibir imágenes cuya calidad no es aceptable, debiéndose a errores de calibración desde el procesamiento realizado por la propia NOAA [79].

Las imágenes incluidas son:

- Banda de 94 Å en la Figura E.22.
- Banda de 132 Å en la Figura E.23.
- Banda de 171 Å en la Figura E.24.
- Banda de 195 Å en la Figura E.25.
- Banda de 284 Å en la Figura E.26.
- Banda de 304 Å en la Figura E.27.

Apéndice E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)

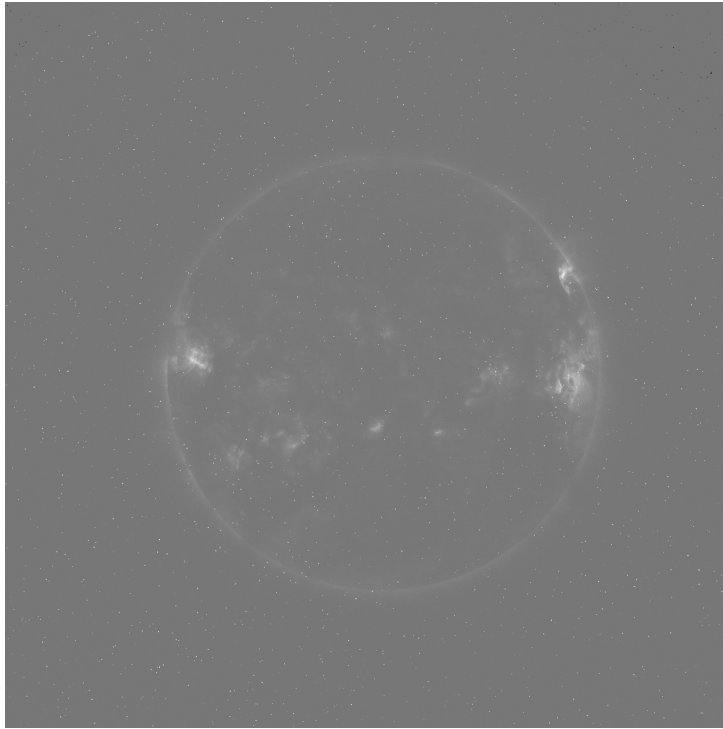


Figura E.22: Imagen **SUVI** de la banda de 94 Å.

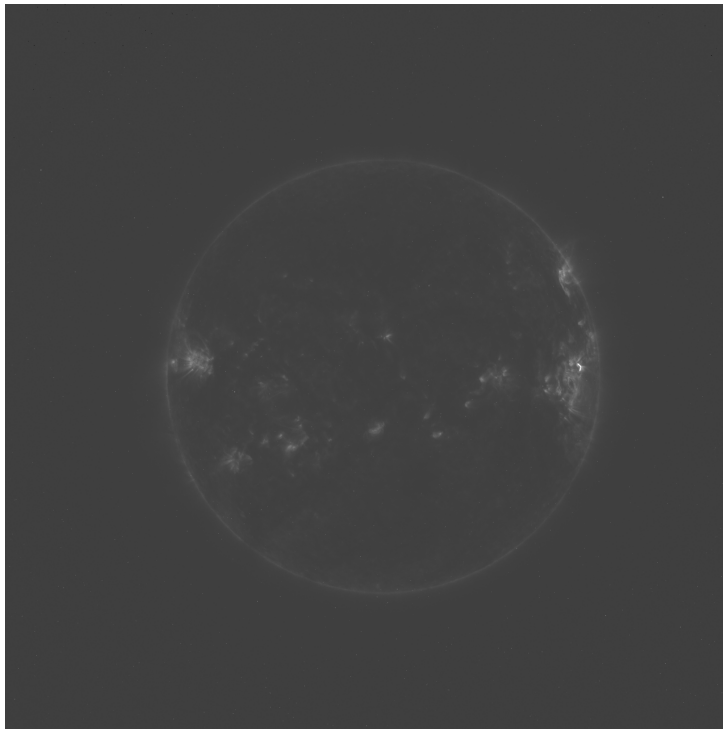


Figura E.23: Imagen **SUVI** de la banda de 132 Å.

E.3. Productos del Solar Ultraviolet Imager (SUVI)

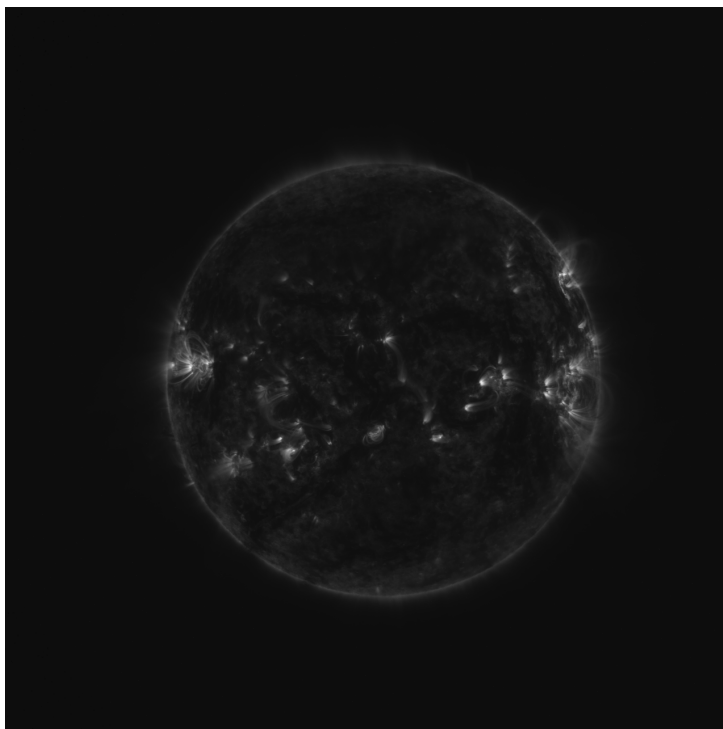


Figura E.24: Imagen **SUVI** de la banda de 171 Å.

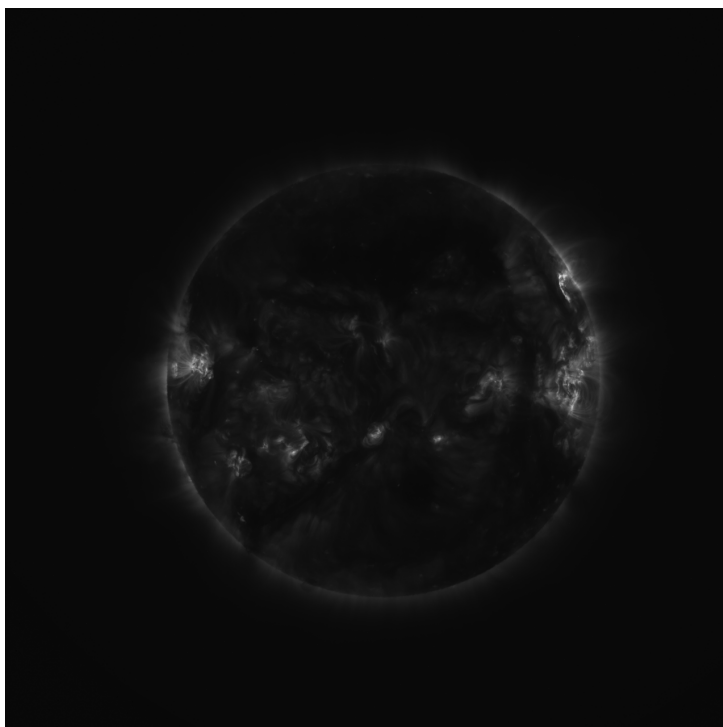


Figura E.25: Imagen **SUVI** de la banda de 195 Å.

Apéndice E. Productos Obtenidos de GOES Rebroadcast (GRB)

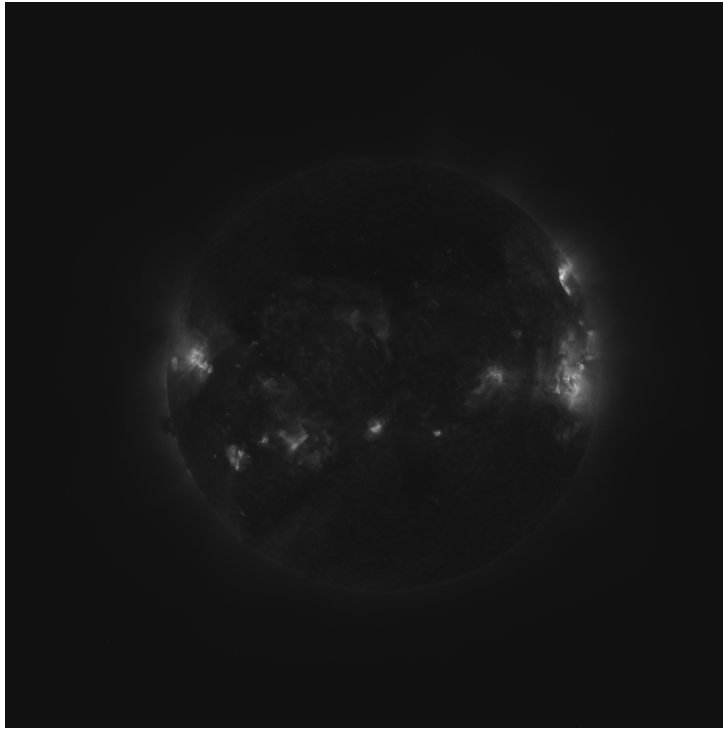


Figura E.26: Imagen **SUVI** de la banda de 284 Å.

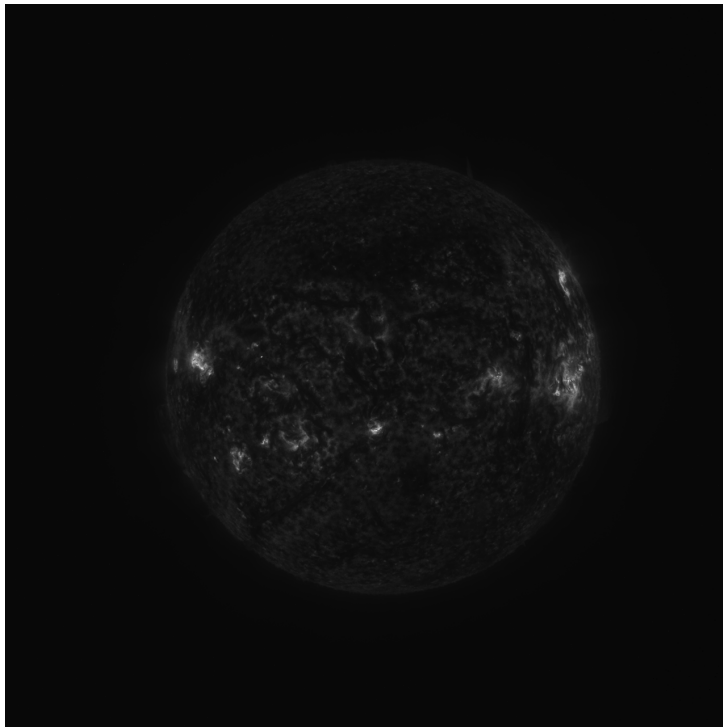


Figura E.27: Imagen **SUVI** de la banda de 304 Å.

Apéndice F

Instrumentos de los Satélites GOES-R

F.1. Space Environment In-Situ Suite (SEISS)

El SEISS está compuesto por cuatro sensores que monitorean el flujo de protones, electrones e iones pesados en la magnetosfera [91]. La información que proporciona es fundamental para evaluar el riesgo de descargas electrostáticas (ESD) y el peligro de radiación tanto para los astronautas como para los satélites. La NOAA utiliza los datos recolectados para analizar el estado del clima espacial y emitir alertas o advertencias ante eventos severos. Los instrumentos que contiene el SEISS son: el sensor de iones pesados energéticos (EHIS), los sensores de partículas magnetosféricas de alta y baja energía (MPS-HI y MPS-LO) y el sensor de protones solares y galácticos (SGPS).

F.2. Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors (EXIS)

El EXIS permite detectar erupciones solares, las cuales pueden interrumpir las comunicaciones, afectar la precisión de los sistemas de navegación y comprometer el funcionamiento de redes eléctricas en la Tierra [92]. Los datos proporcionados por EXIS son enviados al SWPC, donde se utilizan para emitir alertas de posibles apagones de radio. El instrumento está compuesto por dos sensores principales: el sensor radiación ultravioleta extrema (EUVS) y el sensor de rayos X (XRS).

El sensor XRS monitorea las erupciones solares y permite predecir eventos de protones solares que puedan penetrar el campo magnético terrestre. Este sensor es clave para detectar el ingreso de rayos X en la atmósfera superior y alertar sobre erupciones lo suficientemente intensas como para provocar apagones de radio. Su función se complementa con la del instrumento SUVI, el cual capta imágenes del Sol en el extremo ultravioleta para observar estructuras solares, erupciones y eyecciones de masa coronal. El sensor EUVS, por su parte, mide los cambios en la irradiancia solar en el extremo ultravioleta. Esta radiación tiene un fuerte impacto en la ionosfera, pudiendo causar apagones en las comunicaciones de alta frecuencia

(HF).

F.3. Magnetometer (MAG)

El MAG proporciona mediciones del campo magnético, el cual comportamiento de las partículas cargadas en las regiones externas de la magnetosfera [93]. Estas partículas pueden representar un riesgo tanto para las naves espaciales como para las misiones humanas en el espacio. Las mediciones del campo geomagnético son fundamentales para emitir alertas y advertencias dirigidas a diversos usuarios, incluidos operadores de satélites y empresas del sector eléctrico. Además, los datos del MAG son ampliamente utilizados en investigaciones, siendo una de las fuentes de datos satelitales más consultadas por la comunidad científica.

F.4. Geostationary Lightning Mapper (GLM)

El GLM es capaz de detectar cambios en la escena óptica, y por lo tanto, registrar la ocurrencia de rayos [80]. Cada detección de este instrumento es registrada como un evento (*event*). Cuando varios eventos se detectan en instantes de tiempo próximos se agrupan en grupos (*groups*). Un rayo completo puede estar formado por varios eventos distribuidos en varios grupos, por lo que su información se agrupa en rayos (*flashes*). El satélite registra la ubicación geográfica donde ocurre el rayo, así como el tiempo en el que ocurre, su duración y la energía emitida por el mismo en el espectro visible [80]. Así, el GLM proporciona información clave a los meteorólogos, permitiéndoles monitorear con rapidez el desarrollo de tormentas severas.

F.5. Compact Coronagraph (CCOR)

El CCOR, presente solamente en el GOES-East (actualmente GOES-19), obtiene imágenes de la corona solar y ayuda a detectar y caracterizar las CME [94]. Esto permite una detección temprana de tormentas geomagnéticas, las cuales pueden provocar daños significativos en redes eléctricas, satélites y sistemas de comunicación [30].

Referencias

- [1] Instituto Uruguayo de Meteorología. Pluma de humo sobre la región y el país. Disponible en: <https://www.inumet.gub.uy/sala-de-prensa/noticias/pluma-de-humo-sobre-la-region-y-el-pais> Accedido el 15/06/2025.
- [2] NOAA Satellite Information System. GOES Status. Disponible en <https://www.noaasis.noaa.gov/GOES/HRIT/broadcast.html>.
- [3] Casa Rosada. Se instaló una nueva receptora satelital en la sede central del SMN. Disponible en: <https://www.casariosada.gob.ar/informacion/eventos-destacados-presi/43706-se-instalo-una-nueva-receptora-satelital-en-la-sede-central-del-smn> Accedido el 16/06/2025.
- [4] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Nova estação do INPE oferece dados do satélite GOES-16. Disponible en: http://www.inpe.br/urc/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5356 Accedido el 16/06/2025.
- [5] Eugene Grayver. *Implementing Software Defined Radio*. Springer, ISBN:978-1-4419-9331-1, 2012.
- [6] SatDump. SatDump: A generic satellite data processing software. Disponible en: <https://www.satdump.org/> Accedido el 12/1/2025.
- [7] Pieter Noordhuis. A minimal LRIT/HRIT receiver, 2018. Disponible en https://pietern.github.io/goestools/guides/minimal_receiver.html.
- [8] Belcredi, G, Randall, M, Rattaro, C y Belzarena, P. Satellite and aircraft communications through SDR as an introduction to Telecommunications and Electrical Engineering, 2020. XIV Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, Porto, Portugal. Disponible en <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/24597>.
- [9] Analog Devices. ADALM-PLUTO. Disponible en <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html>.
- [10] Joaquín Gayoso, Damián Melgarejo, Gabriela Mullukian. Construcción y operación de estación terrena para el seguimiento de satélites, 2019. Disponible en: <https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2019/GMM19/GMM19.pdf>.

Referencias

- [11] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES Rebroadcast (GRB) downlink specifications for users. Disponible en: https://www.goes-r.gov/users/docs/GRB_downlink.pdf.
- [12] Ettus Research. USRP B200mini. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b200mini> Accedido el 6/06/2025.
- [13] IMM, Municipio D. Estación ANTEL - Manga. Disponible en: <https://municipiod.montevideo.gub.uy/node/198> Accedido el 6/06/2025.
- [14] Benigno Rodríguez Díaz. Material curso antenas y propagación.
- [15] Federico La Rocca. Fundamentos de Comunicaciones Inalámbricas - Tecnologías para Internet de las Cosas. Disponible en: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/387343/mod_resource/content/3/T2-Fundamentos_v2.pdf Accedido el 16/06/2025.
- [16] Iram Nadeem, Mohammed Alibakhshikenari, Fatemeh Babaeian, Ernesto Limiti. A comprehensive survey on Circular Polarized Antennas for existing and emerging wireless communication technologies. Journal of Physics D: Applied Physics. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Three-types-of-polarizations-a-LP-b-CP-and-c-EP_fig1_355018777 Accedido el 16/06/2025.
- [17] Rohde & Schwarz. Vector Network Analyzer Specifications, 2011. Disponible en https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZVB_dat_sw_en.pdf.
- [18] Rohde & Schwarz. R&SZVB Vector Network Analyzer. Disponible en https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZVB_dat_sw_en.pdf.
- [19] Gérard Maral. Michel Bousquet. *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*. Wiley, ISBN: 978-0-470-71458-4, 2009.
- [20] Jr. Louis J. Ippolito. *Satellite Communications Systems Engineering*. Wiley, ISBN: 9781119259374, 2017.
- [21] Instituto Uruguayo de Meteorología. Características climáticas. Disponible en <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/caracteristicas-climaticas> Accedido el 22/06/2025.
- [22] Federico La Rocca. ¿Qué es SDR y por qué usa números complejos?, 2017. Disponible en: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/156645/mod_resource/content/1/sdr-complejos.pdf Accedido el 16/06/2025.
- [23] Pentek Inc. Software-Defined Radio Handbook: Sampling. Disponible en <https://wwwusers.ts.infn.it/~milotti/Didattica/Segnali/SDR-Pentek.pdf>.

- [24] Rohde & Schwarz. How to measure cable loss. Disponible en https://www.rohde-schwarz.com/us/products/test-and-measurement/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/how-to-measure-cable-loss_258130.html.
- [25] Analog Devices. ADALM-PLUTO Detailed Specifications. Disponible en <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/devs/specs>.
- [26] Ettus Research. UHD. Disponible en: <https://kb.ettus.com/UHD> Accedido el 7/06/2025.
- [27] GNU Radio. GNU Radio: The Free and Open Software Radio Ecosystem. Disponible en <https://www.gnuradio.org/>.
- [28] National Aeronautics and Space Administration. Sputnik and The Dawn of the Space Age. Disponible en: <https://www.nasa.gov/history/sputnik/index.html> Accedido el 10/06/2025.
- [29] Andrew Lavender. Pixalytics - How many satellites are orbiting the Earth in 2023? Disponible en: <https://www.pixalytics.com/satellites-orbiting-earth-2023/> Accedido el 12/1/2025.
- [30] National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA's GOES-19 satellite now operational, providing critical new data to forecasters. Disponible en: <https://www.noaa.gov/news-release/noaas-goes-19-satellite-now-operational-providing-critical-new-data-to-forecasters> Accedido el 8/06/2025.
- [31] National Oceanic and Atmospheric Administration. Bigger than DishTV, How the Wallops Ground Station Prepares for GOES-T. Disponible en: <https://www.nesdis.noaa.gov/news/bigger-dishtv-how-the-wallops-ground-station-prepares-goes-t> Accedido el 8/06/2025.
- [32] Earth Observation Portal. Antarctic Broadband. <https://www.eoportal.org/other-space-activities/antarctic-broadband#antarctic-broadband-nanosatellite-demonstration-mission>. Accedido el 19/1/2025.
- [33] National Oceanic and Atmospheric Administration. Geostationary Satellites. Disponible en <https://www.nesdis.noaa.gov/our-satellites/currently-flying/geostationary-satellites> Accedido el 22/06/2025.
- [34] National Oceanic and Atmospheric Administration. Joint Polar Satellite System. Disponible en <https://www.nesdis.noaa.gov/our-satellites/currently-flying/joint-polar-satellite-system> Accedido el 22/06/2025.

Referencias

- [35] GSMA. 5G and the 3.3-3.8 GHz Range in Latin America. Disponible en <https://www.gsma.com/connectivity-for-good/spectrum/wp-content/uploads/2020/11/5G-and-3.5-GHz-Range-in-Latam.pdf>.
- [36] Federal Communications Commission. FCC Part 25 Rules. Disponible en <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-B/part-25> Accedido el 22/06/2025.
- [37] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES-R Mission Overview. Disponible en: <https://www.goes-r.gov/mission/mission.html> Accedido el 10/06/2025.
- [38] National Oceanic and Atmospheric Administration. Five Reasons GOES-S will be a Game-Changer for Weather Forecasts in the Western U.S., 2018. Disponible en: <https://www.nesdis.noaa.gov/news/five-reasons-goes-s-will-be-game-changer-weather-forecasts-the-western-us> Accedido el 12/1/2025.
- [39] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES-R Series Data Book, 2019. Disponible en: <https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/GOES-RSeriesDataBook.pdf>.
- [40] National Oceanic and Atmospheric Administration. Advanced Baseline Imager (ABI). Disponible en <https://www.goes-r.gov/spacesegment/abi.html>.
- [41] National Oceanic and Atmospheric Administration. Transforming Energy into Imagery: How Satellite Data Becomes Stunning Views of Earth, 2020. Disponible en <https://www.nesdis.noaa.gov/news/transforming-energy-imagery-how-satellite-data-becomes-stunning-views-of-earth>.
- [42] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES-R Series Data Products. Disponible en <https://www.goes-r.gov/products/overview.html>.
- [43] Harry Dove-Robinson. Designing False Colors for GOES-R HRIT, 2018. Disponible en <https://wx-star.tumblr.com/post/169608535305/designing-false-colors-for-goes-r-hrit>.
- [44] National Oceanic and Atmospheric Administration. Beginner's Guide to GOES-R Series Data. Disponible en https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/Beginners_Guide_to_GOES-R_Series_Data.pdf.
- [45] National Oceanic and Atmospheric Administration. Solar Ultraviolet Imager (SUVI). Disponible en <https://www.goes-r.gov/spacesegment/suvi.html>.
- [46] National Oceanic and Atmospheric Administration. National Telecommunications and Information Administration. Disponible en: https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/january_2016_spectrum_wall_chart.pdf Accedido el 8/06/2025.

- [47] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES-R Series Unique Payload Services (UPS). Disponible en <https://www.goes-r.gov/mission/ups.html>.
- [48] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES Data Collection Platform Radio Set (DCPRS) CERTIFICATION STANDARDS at 300 bps and 1200 bps. Disponible en: https://www.noaasis.noaa.gov/docs/DCPR_CS2_final_June09.pdf Accedido el 7/6/2025.
- [49] Coordination Group For Meteorological Satellites. LRIT/HRIT Global Specification, 2013. Disponible en: [https://www.cgms-info.org/wp-content/uploads/2021/10/cgms-lrit-hrit-global-specification-\(v2-8-of-30-oct-2013\).pdf](https://www.cgms-info.org/wp-content/uploads/2021/10/cgms-lrit-hrit-global-specification-(v2-8-of-30-oct-2013).pdf) Accedido el 1/2/2025.
- [50] National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA's High Rate Information Transmission Overview. Disponible en https://noaasis.noaa.gov/pdf/docs/TWG2022/0930%20GOES-DCS_HRIT-EMWIN_CMM_2022_Avruch.pdf.
- [51] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES-N Series Data Book, 2010. Disponible en: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/doc/GOES_N_Series_Databook_rev-D.pdf.
- [52] National Oceanic and Atmospheric Administration. User Systems: GOES Rebroadcast. Disponible en: <https://www.goes-r.gov/users/grb.html> Accedido el 1/2/2025.
- [53] Digital Video Broadcasting - ETSI. Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2) - Standard ETSI EN 302 307-1, 2009. Disponible en https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.02.01_60/en_302307v010201p.pdf.
- [54] National Oceanic and Atmospheric Administration. User's Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations, 2009. Disponible en https://open-weather.community/wp-content/uploads/2022/09/Users_Guide-Building_Receive_Stations_March_2009.pdf.
- [55] Igor Freire. DVB-S2 Receiver Extensions for GNU Radio, 2021. Disponible en <https://github.com/igorauad/gr-dvbs2rx>.
- [56] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES Rebroadcast (GRB). Disponible en: <https://noaasis.noaa.gov/GOES/GRB/grb.html> Accedido el 1/2/2025.
- [57] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES-R series product definition and users' guide, Dec 2019. Disponible en: <https://www.goes-r.gov/users/docs/PUG-GRB-vol4.pdf>.

Referencias

- [58] Nooelec. Nooelec SAWbird+ GOES. Disponible en: <https://www.nooelec.com/store/sdr/sdr-addons/sawbird/sawbird-plus-goes-302.html> Accedido el 6/06/2025.
- [59] National Oceanic and Atmospheric Administration. Link Budget for GRB on GOES-R Series Satellites to User Stations. Disponible en <https://www.noaasis.noaa.gov/pdf/budget.pdf> Accedido el 22/06/2025.
- [60] International Telecommunications Union. RECOMMENDATION ITU-R P.838-3 Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, 2005. Disponible en https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/r-rec-p.838-3-200503-i!!pdf-e.pdf.
- [61] DxEngineering. Balun Basics: Common Mode vs. Differential Mode. Disponible en: <https://www.dxengineering.com/techarticles/balunsandfeedlinechokes/balun-basics-common-mode-vs-differential-mode> Accedido el 1/11/2024.
- [62] John S. Huggins. Coax Velocity Factor in Baluns, Does it Matter? Disponible en: <https://www.hamradio.me/antennas/coax-velocity-factor.html> Accedido el 1/11/2024.
- [63] Marko Andlar. Satellite Tracker 3D. Disponible en https://play.google.com/store/apps/details?id=zekitez.com.satellitedirector&hl=es_419.
- [64] GNU Radio. Costas Loop. Disponible en https://wiki.gnuradio.org/index.php/Costas_Loop.
- [65] GNU Radio. Clock Recovery MM. Disponible en https://wiki.gnuradio.org/index.php/Clock_Recovery_MM.
- [66] Andrew J. Viterbi. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm, 1967. IEEE Transactions on Information Theory.
- [67] National Weather Service. Snowfall and Cold Temperatures December 21-23, 2024. Disponible en: <https://www.weather.gov/bgm/pastWinterDecember21-232024> Accedido el 31/05/2025.
- [68] Certified Flight Instructor Notebook. Surface Analysis Chart. Disponible en: <https://www.cfynotebook.net/notebook/weather-and-atmosphere/surface-analysis-chart> Accedido el 22/6/2025.
- [69] National Weather Service. Coastal Waters Forecasts With Wave Detail. Disponible en: <https://www.weather.gov/marine/wavedetail> Accedido el 22/6/2025.

- [70] National Oceanic and Atmospheric Administration. Satellite Receiving Equipment Manufacturers. Disponible en: https://www.noaasis.noaa.gov/GOES/manu_list.html Accedido el 29/5/2025.
- [71] Ming Hui Chen y G. N. Tsandoulas. A Wide-Band Square-Waveguide Array Polarizer, 1973. IEEE Transactions On Antennas And Propagation. Disponible en: https://www.ok1dfc.com/eme/Technic/septum/Chen_Tsand.pdf.
- [72] Paul Wade (W1GHZ). Septum Polarizers and Feeds, 2003. Disponible en: <https://www.w1ghz.org/antbook/conf/SEPTUM.pdf>.
- [73] Paul Wade (W1GHZ). Analysis of the OK1DFC Septum Feed, 2003. Disponible en: <https://www.ok1dfc.com/eme/Technic/septum/W1GHZanalysis.pdf>.
- [74] Challenger Communications. GOES-R Dual Circular Polarity Feed. Disponible en: https://challengercommunications.com/wp-content/uploads/GRBF-100-GRBF-200-CLA_flyers.pdf.
- [75] Ansys. Ansys Electronics Desktop Student - Free Software Download. Disponible en: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-electronics-desktop-student> Accedido el 12/4/2025.
- [76] Paul Wade (W1GHZ). Septum Feeds – Tolerances and Sensitivity, 2012. EME Conference 2012 - Camdridge, UK. Disponible en: https://www.microwavers.org/eme2012/files/saturday/W1GHZ_Septum-Feeds_EME2012-long.pdf.
- [77] Rastislav y et al. Galuscak. Circular polarization feed for space communication on the 3 cm band part 1. *DUBUS*, 09 2014.
- [78] Zekitez. Satellite Director. Disponible en <https://satellitetracker3d.com/>.
- [79] National Oceanic and Atmospheric Administration. GOES-19 SUVI Level 1b (L1b) Data Beta Data Quality. Disponible en: https://www.noaasis.noaa.gov/pdf/ps-pvr/goes19/SUVI/Beta/GOES-19_SUVI_Beta_README.pdf Accedido el 8/06/2025.
- [80] National Oceanic and Atmospheric Administration. Geostationary Lightning Mapper (GLM). Disponible en <https://www.goes-r.gov/spacesegment/glm.html>.
- [81] National Oceanic and Atmospheric Administration. GEONETCast Americas. Disponible en: <https://www.geonetcastamericas.noaa.gov/> Accedido el 12/1/2025.
- [82] Group on Earth Observations. GEONETCast. Disponible en: <https://old.earthobservations.org/geonetcast.php> Accedido el 9/06/2025.

Referencias

- [83] Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales del Brasil (INEP). GEONETCast-Americas - Illustrated Product Catalog, "2023". Disponible en: <https://www.geonetcastamericas.noaa.gov/docs/GNC-A%20Product%20List%20-%20v2023-05-02.pdf> Accedido el 9/06/2025.
- [84] Intelsat. Intelsat 21. Disponible en: https://www.intelsat.com/fleetmaps/satellites/satellite_19/ Accedido el 9/06/2025.
- [85] National Oceanic and Atmospheric Administration. GEONETCast Americas - Station Installation and Maintenance. Disponible en: <https://www.dropbox.com/s/jvc7z4p5trv66zq/New%20GNC-A%20Manual%20-%20v2021-11-19a.pdf?raw=1> Accedido el 9/06/2025.
- [86] National Oceanic and Atmospheric Administration. GEONETCast Americas. Disponible en: <https://www.geonetcastamericas.noaa.gov/> Accedido el 9/06/2025.
- [87] Novra. S400 PRO DVB Satellite Receiver. Disponible en: https://www.novra.com/es_AR/s400 Accedido el 9/06/2025.
- [88] KenCast. KenCast - Receive. Disponible en: <https://kencast.com/receive> Accedido el 9/06/2025.
- [89] GNU Radio. MPSK SNR Estimator. Disponible en: https://wiki.gnuradio.org/index.php/MPSK_SNR_Estimator Accedido el 8/06/2025.
- [90] Leslie A. Rusch. Digital Communications, 2021. GEL7114 - Université Laval.
- [91] National Oceanic and Atmospheric Administration. Space Environment In-Situ Suite (SEISS). Disponible en <https://www.goes-r.gov/spacesegment/seiss.html>.
- [92] National Oceanic and Atmospheric Administration. Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Sensors (EXIS). Disponible en <https://www.goes-r.gov/spacesegment/exis.html>.
- [93] National Oceanic and Atmospheric Administration. Magnetometer (MAG). Disponible en <https://www.goes-r.gov/spacesegment/mag.html>.
- [94] National Oceanic and Atmospheric Administration. Compact Coronagraph (CCOR). Disponible en <https://www.goes-r.gov/spacesegment/CCOR.html>.

Glosario

ADC Analog-to-Digital Converter.

BCH Bose–Chaudhuri–Hocquenghem (Código corrector de errores).

BER Bit Error Rate.

BPSK Binary Phase Shift Keying.

CDAS Command and Data Acquisition Station.

DCS Data Collection System.

DDC Digital Down-Converter.

DTH Direct To Home.

DUC Digital Up-Converter.

EIRP Effective Irradiated Power (Potencia Irradiada Efectiva).

EMWIN Emergency Managers Weather Information.

EUMETSAT European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites.

EUV Extreme Ultraviolet Radiation.

GNC GEONETCast.

GOES Geostationary Operational Environmental Satellite.

GPS Global Positioning System.

GRB GOES Rebroadcast.

HPA High Power Amplifier.

HRIT High Rate Information Transmission.

Inumet Instituto Uruguayo de Meteorología.

Glosario

LDPC Low density parity check (Código corrector de errores).

LES Laboratorio de Energía Solar.

LHCP Left-Hand Circular Polarization (Polarización Circular Izquierda).

LNA Low Noise Amplifier.

LNB Low Noise Block-downconverter.

LUT Lookup Table.

NOAA Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica.

PLL Phase-locked Loop.

QPSK Quadrature Phase Shift Keying.

RHCP Right-Hand Circular Polarization (Polarización Circular Derecha).

SDR Radio Definida por Software.

SMA SubMiniature version A.

SNR Signal-to-Noise Ratio.

SWR Relación de Onda Estacionaria.

UHD USRP Hardware Driver.

USRP Universal Software Radio Peripheral.

VNA Analizador de Redes Vectoriales.

VSWR Relación de Onda Estacionaria de Voltaje.

XPD Cross-Polarization Discrimination (Discriminación de polarización cruzada).

Índice de tablas

4.1. Componentes principales de la plataforma de un satélite meteorológico.	36
4.2. Asignación de frecuencias para aplicaciones satelitales [36]. Se muestran de la forma uplink-downlink, cuando aplica.	42
4.3. Parámetros clave para la recepción de HRIT [39].	49
4.4. Parámetros clave para la recepción de GRB [39].	52
4.5. Productos relevantes para el proyecto del servicio GRB junto a su instrumento de origen [57, p. 38].	54
4.6. Distribución de los productos relevantes para el proyecto del servicio GRB en cada polarización [57].	55
4.7. Bandas del instrumento ABI junto a su resolución espacial para GRB [57].	55
5.1. Estimación del SNR y de E_B/N_0 de las muestras obtenidas con el sistema de HRIT durante sus distintas mejoras.	67
6.1. Estimación del SNR y de E_B/N_0 de las muestras obtenidas con el sistema de GRB para las dos polarizaciones recibidas, LHCP y RHCP.	97
B.1. Parámetros de recepción del transporte en el que se encuentra GNC-A [85].	117
B.2. Frecuencias de transmisión de imágenes Full Disk del instrumento ABI del satélite GOES-East según los servicios GNC-A y GRB.	118

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de figuras

1.1.	Imagen de disco completo de la Tierra. Capturada por el GOES-East el 7 de septiembre de 2024, utilizando uno de los sistemas diseñados en el proyecto en la azotea de la Facultad de Ingeniería.	2
1.2.	Áreas de cobertura (conocidas como huellas o <i>footprints</i> en inglés) de los satélites GOES-West y GOES-East [2].	3
1.3.	Sistema de recepción de HRIT implementado en la azotea de la FING.	4
1.4.	Sistema de recepción de GRB implementado en la Estación Terrena en Manga.	6
2.1.	Diagrama que muestra el comportamiento de una antena dipolo cuando recibe ondas con distintas frecuencias.	10
2.2.	Tipos de polarización que puede tener una onda [16]. a) Polarización lineal. b) Polarización circular. c) Polarización elíptica. En verde se muestra el componente vertical del campo y en rojo el horizontal. .	11
2.3.	Diagrama de una línea de transmisión.	13
2.4.	Diagrama general de una línea de transmisión.	14
2.5.	VNA del mismo modelo que el disponible en la FING.	15
3.1.	Funcionamiento simplificado de un SDR.	22
3.2.	Espectro de una señal pasabanda.	23
3.3.	Espectro de la señal estudiada en bandabase.	23
3.4.	Diagrama de un sistema de recepción IQ.	25
3.5.	Diagrama simplificado del SDR USRP B200mini [12].	26
3.6.	Diagrama de bloques de un sistema receptor basado en SDR. . . .	27
3.7.	SDR Adalm-Pluto.	28
3.8.	SDR USRP B200mini.	29
4.1.	Diagrama del funcionamiento de un sistema de comunicación satelital [19].	35
4.2.	Estación terrena de la NOAA en Wallops Island, Virginia, EE.UU., desde donde se operan y controlan los satélites GOES-16, GOES-17, GOES-18 y GOES-19 [31].	36
4.3.	Diagrama con los componentes y la estructura de una estación terrena [19]. RF: Radio Frecuencia. IF: Frecuencia Intermedia.	38
4.4.	Forma de las órbitas HEO, LEO, MEO y GEO.	40

Índice de figuras

4.5. Áreas de cobertura de los satélites GOES-West y GOES-East de la NOAA [38].	43
4.6. Comparación entre una imagen RGB compuesta y una imagen monocromática del canal 2 ($0,64\mu\text{m}$) [41].	44
4.7. Espectro de la transmisión en banda L del satélite GOES-East. . .	47
4.8. Diámetros de antena mínimos establecidos por la NOAA para GOES-East [56].	53
5.1. Diagrama del sistema de recepción utilizado para HRIT.	57
5.2. Sistema de recepción utilizado para HRIT en la azotea de la FING. .	58
5.3. Medidas del SWR (S_{11}) del dipolo tomadas con el VNA.	60
5.4. Efecto de la corriente de modo común, que se simboliza en rojo, en una antena dipolo.	61
5.5. Dipolo utilizado para el sistema de recepción de HRIT, adaptado en frecuencia y con balun.	62
5.6. Foto desde el punto de vista de la antena empleada para HRIT en la azotea de la FING, indicando la ubicación del satélite GOES-East en el cielo, con el programa <i>Satellite Director</i>	63
5.7. Montaje de la antena parabólica de Wi-Fi en el sistema de HRIT para alcanzar el ángulo de elevación del satélite, de $44,7^\circ$	64
5.8. Diagrama del procesamiento que hace SatDump para la decodificación de los datos provistos por HRIT.	65
5.9. Espectro recibido con el sistema implementado para HRIT desde la azotea de la FING.	66
5.10. Constelación recibida con el sistema implementado para HRIT. . .	67
5.11. Composición falso color en base a imágenes de GOES-East.	68
5.12. Mapa de radar para EE.UU. el 23 de diciembre de 2024 a las 10:52 de Uruguay.	69
5.13. Gráfico del NWS: análisis de superficie meteorológica para la región del Pacífico, correspondiente al período 23-24 de diciembre de 2024.	71
5.14. Gráfico del NWS: pronóstico de período y dirección de olas a 48 horas para el Pacífico oriental, válido entre el 23 y el 25 de diciembre de 2024.	71
5.15. Gráfico del NWS: pronóstico cromático de período y dirección de olas a 48 horas para el Atlántico Norte y Golfo de México, válido entre el 23 y el 25 de diciembre de 2024.	72
6.1. Diagrama de un sistema de recepción de GRB general para ambas polarizaciones basado en SDR.	74
6.2. Funcionamiento del polarizador del septum feed para una señal con polarización RHCP. E_h representa el componente horizontal del campo eléctrico y E_v el componente vertical.	76
6.3. Representación esquemática de la variante de OK1DFC del septum feed, indicando sus componentes principales. Se presenta la vista frontal (izquierda) y lateral (derecha).	77
6.4. Diagrama de un cantenna capaz de recibir polarización doble circular. .	78

6.5. Diagrama de una antena helicoidal capaz de recibir una polarización circular.	79
6.6. Simulación en ANSYS HFSS para el diseño del septum feed. Se puede observar el desempeño del mismo cuando es excitado con una onda de polarización RHCP (simulación a la izquierda) y LHCP (simulación a la derecha).	80
6.7. Simulación en ANSYS HFSS para el diseño del septum feed con un horn que mejora su desempeño. Se puede observar el desempeño del mismo cuando es excitado con una onda de polarización RHCP (simulación a la izquierda) y LHCP (simulación a la derecha). . . .	81
6.8. Dimensiones de la variante OK1DFC del septum feed según la longitud de onda de la frecuencia de operación.	81
6.9. Dimensiones de la variante OK1DFC del septum feed para la frecuencia de GRB.	82
6.10. Vista frontal de la primera versión del septum feed construido. . .	83
6.11. Vista lateral de la primera versión del septum feed construido. . .	83
6.12. SWR (S_{11}) del puerto Rx del septum feed.	84
6.13. SWR (S_{11}) del puerto Tx del septum feed.	84
6.14. Vista frontal de la última versión del septum feed construido. . . .	85
6.15. Vista lateral de la última versión del septum feed construido. . . .	86
6.16. Sistema montado en la Estación Terrena de Antel en Manga, Montevideo. Se puede observar en el fondo de la imagen la Antena Standard-A de 32 m de diámetro.	87
6.17. Ubicación del satélite GOES-16, muy próximo al satélite Star One C3. Se muestra con puntos blancos otros satélites en la órbita geostacionaria. SDGC-1 es un satélite militar brasileño [78].	90
6.18. Analizador de espectro PSA-2500C de AVCOM. Se puede apreciar el espectro recibido por el septum feed durante las etapas iniciales del montaje del sistema.	90
6.19. Espectro del satélite GOES-East recibido con el sistema implementado en la Estación Terrena de Antel, puerto Tx del septum feed. .	91
6.20. Captura del espectro recibido con el sistema de recepción de GRB, cuando se empleaba la fuente de alimentación del LNA defectuosa. .	92
6.21. Captura del espectro recibido con el sistema de recepción de GRB, cuando se empleaba una fuente de alimentación del LNA adecuada. .	92
6.22. Espectro del satélite GOES-East recibido con el sistema implementado en la Estación Terrena de Antel, puerto Rx del septum feed. .	94
6.23. Diagrama de bloques del flujo de procesamiento de GRB que utiliza SatDump.	94
6.24. Constelación recibida para la señal LHCP de GRB. Se muestra también el status de la etapa de corrección de errores en la decodificación. .	96
6.25. Constelación recibida para la señal RHCP de GRB. Se muestra también el status de la etapa de corrección de errores en la decodificación. .	96
6.26. Composición a color formada a partir de las imágenes de los canales 2 y 14.	97

Índice de figuras

6.27. Composición a color formada a partir de los canales 1, 3 y 5. . . .	98
6.28. Imagen del territorio de Uruguay, formada como composición a color de los canales 1, 3 y 5.	99
6.29. Imagen SUVI de la banda de 171 Å.	100
A.1. Interfaz gráfica de SatDump, resaltando sus principales componentes	109
A.2. Interfaz gráfica de SatDump, decodificando en forma offline una grabación bandabse de HRIT, tomada con el sistema de recepción en la Estación Terrena de ANTEL en Manga.	110
A.3. Interfaz gráfica de SatDump, decodificando en forma live una gra- bación bandabse de GRB, tomada con el sistema de recepción en la Estación Terrena de ANTEL en Manga.	111
A.4. Interfaz gráfica de SatDump, mostrando la visualización y genera- ción de productos satelitales a partir de las imágenes recibidas de HRIT.	112
B.1. Área de cobertura de los distintos componentes de GEONETCast [82].	116
B.2. Huella del satélite Intelsat-21 [84].	117
B.3. Diagrama de recepción del servicio GNC-A.	118
B.4. Receptor satelital DVB-S2 Novra S400 Pro [87].	119
D.1. Composición falso color en base a imágenes de GOES-East.	126
D.2. Banda 2 de GOES-East, corresponde al rango de longitudes de onda visibles.	126
D.3. Banda 7 de GOES-East, corresponde al rango de bandas infrarrojas.	127
D.4. Banda 8 de GOES-East, corresponde también al rango de bandas infrarrojas.	127
D.5. Banda 9 de GOES-East, dentro del rango de bandas infrarrojas. .	128
D.6. Banda 13 de GOES-East, dentro del rango de bandas infrarrojas. .	128
D.7. Banda 14 de GOES-East, dentro del rango de bandas infrarrojas. .	129
D.8. Banda 15, dentro del rango de bandas infrarrojas.	129
D.9. Banda 13 del GOES-West.	130
D.10. Composición a color de Mesoescala 1.	131
D.11. Composición a color de Mesoescala 2.	131
D.12. Imagen de la banda de 10,8 µm de satélite METEOSAT-9, ubicado en 45,5°E.	132
D.13. Imagen de la banda 4 del satélite Japonés Himawari, ubicado en 140,7°E.	133
E.1. Composición a color formada a partir de las Figuras E.2 y E.6. . .	136
E.2. Canal 2 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.	136
E.3. Canal 7 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.	137
E.4. Canal 8 transmitido por GRB, en su polrización LHCP.	137
E.5. Canal 10 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.	138
E.6. Canal 14 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.	138
E.7. Canal 15 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.	139

E.8. Canal 16 transmitido por GRB, en su polarización LHCP.	139
E.9. Imagen CONUS formada a partir de los canales 2 y 14.	140
E.10. Composición a color formada a partir de las Figuras E.11, E.12 y	
E.14.	141
E.11. Canal 1 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	142
E.12. Canal 3 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	142
E.13. Canal 4 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	143
E.14. Canal 5 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	143
E.15. Canal 6 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	144
E.16. Canal 9 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	144
E.17. Canal 11 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	145
E.18. Canal 12 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	145
E.19. Canal 13 transmitido por GRB, en su polarización RHCP.	146
E.20. Imagen CONUS , formada como composición a color de los canales	
1, 3 y 5.	146
E.21. Imagen del territorio de Uruguay, formada como composición a color	
de los canales 1, 3 y 5.	147
E.22. Imagen SUVI de la banda de 94 Å.	148
E.23. Imagen SUVI de la banda de 132 Å.	148
E.24. Imagen SUVI de la banda de 171 Å.	149
E.25. Imagen SUVI de la banda de 195 Å.	149
E.26. Imagen SUVI de la banda de 284 Å.	150
E.27. Imagen SUVI de la banda de 304 Å.	150

Esta es la última página.
Compilado el martes 18 noviembre, 2025.
<http://iie.fing.edu.uy/>