

ESTUDIO DE LOS CRITERIOS Y DESAFÍOS DE INTEROPERABILIDAD DE SBAS A NIVEL MUNDIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR DEL TRABAJO

Carlos Davis Huerta

TUTOR

Dr. Israel Quintanilla García

FECHA

Junio 2021

Resumen

El trabajo de fin de grado *Estudio de los criterios y desafíos de interoperabilidad de SBAS a nivel mundial* propone un análisis del desarrollo de la interoperabilidad a lo largo de los años. Actualmente, el auge de los Sistemas de Aumentación Basados en Satélites (abreviado SBAS en inglés) es innegable. Guiándonos tan solo por los procesos de prueba y certificación de los SBAS en vía de desarrollo, se prevé que la cantidad de SBAS operativos se duplique en los próximos cinco años, lo que aumentará notablemente la precisión, integridad, continuidad y disponibilidad de las operaciones subyacentes relacionadas con la navegación aérea (e incluso otras aplicaciones relacionadas, por ejemplo, al ámbito de la geodesia).

Por una parte, estudiaremos la implementación de los SBAS que se encuentran actualmente operativos para ofrecer servicios en el ámbito de la navegación aérea. Al estudiar su implementación, tanto a nivel técnico como operativo, arrojaremos luz sobre las razones por las que podemos afirmar que son interoperables entre sí.

Por otra parte, comentaremos las líneas de investigación actuales, tanto en la implementación de nuevos SBAS como en la mejora del rendimiento de los SBAS actuales. Veremos también como dichas mejoras se incluirán en los SBAS que actualmente no están operativos, por lo que los SBAS tendrán un nivel de complejidad tecnológica y de rendimiento operativo homogéneo.

Con ello, se pretende constatar un esfuerzo a través de los años por mantener una interoperabilidad aparentemente imperceptible entre los SBAS actuales y los futuros.

Abstract

This final degree project, *A Study of the Criteria and Challenges of SBAS for Global Interoperability*, presents an analysis of how interoperability has developed over the years. The current rapid growth of Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS) is undeniable. Judging solely by the testing and certification processes of SBAS systems under development, the number of these systems in operation is expected to double in the next five years, significantly increasing the precision, integrity, continuity and availability of the underlying operations related to air navigation (and even other associated applications, such as the field of geodesy, for example).

On the one hand, the project examines the implementation of the SBAS systems that are currently operational to offer services in the area of air navigation. Studying their implementation, at both the technical and the operational level, will throw light on the reasons why they can be said to be interoperable with each other.

On the other hand, it comments on the current lines of research both on the implementation of new SBAS systems and on improving the performance of current systems. It will also show that these improvements will be included in the SBAS systems that are not currently operational, and SBAS will therefore have a uniform level of technological complexity and operational performance.

The intention is to observe the efforts made over the years to maintain an apparently imperceptible interoperability between current and future SBAS systems.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la contribución de otras personas que no han sido citadas ni mencionadas a lo largo del documento, por lo que me gustaría dedicarles este apartado para agradecerles lo que han hecho por mí.

Para empezar, quisiera agradecer a mis padres su constante fe ciega en mis decisiones académicas y profesionales. Tal confianza que tenéis puesta en mí es algo que no me merezco. También a mi hermano, por sus consejos sobre la vida y por ser un vivo ejemplo de como hacer y no hacer las cosas; y a mi abuela, por sus historias de tiempos pasados y por ponerme velas en los exámenes y fechas importantes (la mayoría han servido). Además, a mi familia inglesa, cuyas fronteras dificultan nuestros encuentros, pero que siempre me acogen con la mejor de las intenciones.

Por otra parte, quisiera dar las gracias a mis amigos de la carrera y fuera de ella por ser una constante de apoyo continua e independiente a mi situación de ánimo; por lidiar con mis manías, empatizar con mis dificultades y brindarme diariamente una sonrisa; por vuestros consejos y vuestro buen rollo. No os nombro por miedo a dejarme a alguien, pero sabéis quiénes sois.

Paralelamente, me gustaría reconocer la labor de mi tutor, Dr. Israel Quintanilla García, por su labor de supervisión durante este trabajo y por transmitirme durante sus clases su motivación por una parte de la materia que se encuentra en este documento, la cual contribuirá probablemente a las decisiones que tome para esculpir mi futuro profesional.

Por último, quiero gratificar a la UPV y a la ETSID por ofrecerme la oportunidad y los medios para cursar estos cuatro años de título de grado en un ambiente tanto profesional como amigable e instalaciones tecnológicamente avanzadas. En especial, quisiera agradecer el trabajo de la plantilla educativa del grado en ingeniería aeroespacial, quiénes me han permitido asentar mis gustos (y consecuentemente mis disgustos) en un área de conocimientos que me era totalmente desconocida.

Reconozco pues la contribución en la realización de este trabajo de todas las personas mencionadas en este apartado.

Tabla de contenido

Resumen.....	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Lista de ilustraciones.....	VI
Lista de tablas.....	VIII
Lista de acrónimos	IX
Introducción	XII
Objetivos	XIV
I. MEMORIA.....	1
1. La interoperabilidad asegurada por una disponibilidad creciente	2
1.1. El concepto de UDRE.....	2
1.2. El concepto de GIVE	3
1.3. Las correcciones troposféricas.....	3
1.4. La máscara de Red Ionosférica de Puntos.....	5
1.5. La virtualización de las estaciones de referencia y de usuario	9
1.6. Los límites de alerta	9
1.7. La disponibilidad mundial	12
2. La interoperabilidad asegurada por una definición de mensajes homogénea.....	15
2.1. El concepto de máscara PRN.....	15
2.2. Los mensajes interoperables de todos los SBAS: un ejemplo de EGNOS	18
2.2.1. Mensaje tipo 1: Máscara PRN	18
2.2.2. Mensajes tipo 2 a 6 y tipo 24	19
2.2.3. Mensaje tipo 7 y tipo 10.....	22
2.2.4. Mensaje tipo 9 y tipo 17.....	24
2.2.5. Mensaje tipo 12.....	26
2.2.6. Mensaje tipo 27.....	28
2.2.7. Mensaje tipo 25.....	31
2.2.8. Mensajes tipo 18 y tipo 26	32
2.3. El conjunto de mensajes transmitidos y la carga del ancho de banda	35
3. Los retos de interoperabilidad actuales.....	38
3.1. El grupo de trabajo sobre la interoperabilidad	38
3.1.1. Los miembros del grupo de trabajo sobre la interoperabilidad	39
3.1.2. Los objetivos del grupo de trabajo sobre la interoperabilidad	44
3.1.3. La reunión 36 del IWG.....	45

3.2.	El desarrollo actual de SBAS con frecuencia dual	46
3.2.1.	El concepto de frecuencia dual	46
3.2.2.	Los beneficios de la frecuencia dual.....	47
3.2.3.	Los SBAS DFMC.....	50
3.3.	Los desarrollos operacionales en aproximaciones con SBAS.....	57
3.3.1.	Las aproximaciones LPV garantizadas mediante SBAS	57
3.3.2.	Una inversión que no convence a las aerolíneas	59
II.	PLIEGO DE CONDICIONES.....	62
1.	Condiciones generales	63
2.	Condiciones técnicas.....	69
2.1.	Software	69
2.2.	Hardware.....	70
2.3.	Conexión a internet.....	70
2.4.	Documentos oficiales.....	71
III.	PRESUPUESTO	72
1.	Desglose de costes	73
1.1.	Costes de software y hardware.....	73
1.2.	Costes de entorno de trabajo.....	74
1.3.	Coste de documentos oficiales	75
1.4.	Coste de personal.....	75
2.	Presupuesto total del trabajo.....	75
IV.	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES	77
V.	ANEXOS	80
	ANEXO A: Localización de los puntos de la red ionosférica mundial y bits en la máscara	81
	ANEXO B: Localización de los IGP de WAAS.....	83
	ANEXO C: Localización de los IGP de EGNOS	84
	ANEXO D: Localización de las estaciones RIMS consideradas para EGNOS.....	85
	ANEXO E: Mapas de disponibilidad de SBAS actuales.....	86
	ANEXO F: Código de MATLAB asociado a la visualización de la región definida en MT27	89
	Script principal.....	89
	Función de conversión de coordenadas “sex2dec”	90
	Función de conversión de atributos a kml “kmlwrite_polygon”	91
	ANEXO G: Aproximaciones LPV en función del año en Estados Unidos	92
	ANEXO H: Operaciones totales en aeropuertos estadounidenses en función del año	93
	ANEXO I: Tráfico anual de pasajeros internacionales en Estados Unidos en función del año....	94
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Carta de referencia de los IGP mundiales agrupados en bloques	5
Ilustración 2. Máscara de IGP de EGNOS en el software MAAST	6
Ilustración 3. Máscara de IGP de WAAS en el software MAAST.....	7
Ilustración 4. Máscara de IGP de SDCM en su página web oficial.....	7
Ilustración 5. Repartición tridimensional del GIVE determinado por SDCM y máximo valor registrado	8
Ilustración 6. Registro de valores de GIVE para cada IGP y máximo valor de IGP monitorizados	8
Ilustración 7. Estaciones de referencia de EGNOS (RIMS) en el software MAAST	9
Ilustración 8. Límite de protección vertical en la RIMS de Santiago de Compostela el 15 de abril de 2021.....	10
Ilustración 9. Mapa de la distribución del percentil 99% del VPL para EGNOS el 15 de abril de 2021.....	11
Ilustración 10. Mapa de la distribución del percentil 99% del HPL para EGNOS el 15 de abril de 2021.....	11
Ilustración 11. Zonas de disponibilidad de SBAS superpuestas a la proyección de tráfico aéreo mundial de 2020.....	12
Ilustración 12. HPL garantizado actualmente por SBAS junto con RAIM	13
Ilustración 13. Proyección de disponibilidad para aproximaciones APV-I en 2025.....	14
Ilustración 14. Contenido del mensaje tipo 1 en SBAS MeNTOR	19
Ilustración 15. Contenido del mensaje tipo 2 en SBAS MeNTOR	20
Ilustración 16. Contenido del mensaje tipo 3 en SBAS MeNTOR	20
Ilustración 17. Contenido del mensaje tipo 4 en SBAS MeNTOR	21
Ilustración 18. Evolución del UDREI a lo largo del día para PRN 01 en SBAS MeNTOR.....	21
Ilustración 19. Contenido del mensaje tipo 10 en SBAS MeNTOR	23
Ilustración 20. Contenido del mensaje tipo 9 en SBAS MeNTOR	24
Ilustración 21. Identificador asociado a cada SBAS	25
Ilustración 22. Contenido del mensaje tipo 17 en SBAS MeNTOR	26
Ilustración 23. Contenido del mensaje tipo 12 en SBAS MeNTOR	28
Ilustración 24. Contenido del mensaje tipo 27 en SBAS MeNTOR	29
Ilustración 25. Visualización del contenido del mensaje tipo 27 en Google Earth.....	30
Ilustración 26. Contenido del mensaje tipo 25 en SBAS MeNTOR	31
Ilustración 27. Máscara de IGP contenida en el mensaje tipo 18 en SBAS MeNTOR.....	32
Ilustración 28. Retardo vertical contenido en el mensaje tipo 26 para el inicio del día en SBAS MeNTOR	33
Ilustración 29. Retardo vertical contenido en el mensaje tipo 26 para el final del día en SBAS MeNTOR	34
Ilustración 30. GIVE contenido en el mensaje tipo 26 para el inicio del día en SBAS MeNTOR.	34
Ilustración 31. GIVE contenido en el mensaje tipo 26 para el final del día en SBAS MeNTOR ..	35
Ilustración 32. Tiempos de transmisión de cada tipo de mensaje el 9 de mayo de 2021.....	36
Ilustración 33. Carga de la banda de frecuencia para cada tipo de mensaje el 22 de abril de 2021.....	37
Ilustración 34. Reconstrucción de los tiempos de transmisión de cada tipo de mensaje el 22 de abril de 2021.....	37

Ilustración 35. Observación espacial de la fulguración solar del 6 de diciembre de 2006.....	48
Ilustración 36. Comparación de la relación señal a ruido de un día estándar con el día 6 de diciembre de 2006	48
Ilustración 37. Proyección de la disponibilidad mundial futura si los SBAS operan en frecuencia dual.....	50
Ilustración 38. Representación comparativa bidimensional de DOP según la cercanía de los satélites	51
Ilustración 39. Representación comparativa tridimensional de DOP según la geometría de los satélites	52
Ilustración 40. Simulación de la cobertura de todos los satélites operativos con un observador en la ETSID.....	53
Ilustración 41. Mapa rectangular con la HDOP de los satélites del primer caso.....	54
Ilustración 42. Mapa tridimensional de cobertura de los satélites del primer caso	54
Ilustración 43. Mapa rectangular con la HDOP de los satélites del segundo caso.....	55
Ilustración 44. Mapa tridimensional de cobertura de los satélites del segundo caso	55
Ilustración 45. Proyección de la disponibilidad mundial futura si los SBAS son DFMC.....	57
Ilustración 46. Aproximaciones LPV publicadas en territorio canadiense	58
Ilustración 47. Aproximaciones LPV publicadas en Europa.....	58
Ilustración 48. Número de aproximaciones LPV publicadas en Estados Unidos según el año...	59
Ilustración 49. Operaciones totales en aeropuertos estadounidenses según el año.....	60
Ilustración 50. Tráfico de pasajeros internacionales en Estados Unidos según el año	60
Ilustración 51. Contorno de disponibilidad para aproximaciones de precisión de EGNOS.....	86
Ilustración 52. Disponibilidad para aproximaciones de precisión de WAAS	86
Ilustración 53. Disponibilidad para aproximaciones APV-I de GAGAN.....	87
Ilustración 54. Disponibilidad para aproximaciones de precisión de SDCM (2015).....	87
Ilustración 55. Disponibilidad para aproximaciones de no precisión de MSAS.....	88
Ilustración 56. Código del script principal de MATLAB para la visualización del mensaje tipo 27	89
Ilustración 57. Código de conversión de formato de coordenadas de MATLAB	90
Ilustración 58. Código de conversión de atributos a formato kml de MATLAB	91

Lista de tablas

Tabla 1. Equivalencia del índice de UDRE y sus parámetros estadísticos correspondientes	2
Tabla 2. Valores de referencia para los parámetros del cálculo de las correcciones troposféricas	4
Tabla 3. Rangos de PRN asociados a cada constelación de satélites.....	15
Tabla 4. PRN asociados a la banda L1 para satélites de SBAS	16
Tabla 5. Fragmentos de subsecuencias característicos para cada PRN.....	17
Tabla 6. Asociaciones de los parámetros del mensaje tipo 7 con el indicador ai.....	23
Tabla 7. Asociación del índice URA con su valor nominal asociado	24
Tabla 8. Identificador asociado a cada estándar UTC.....	27
Tabla 9. Asociación del indicador δ UDRE y su valor nominal respectivo	29
Tabla 10. Asociación del indicador de GIVE y sus parámetros estadísticos respectivos	33
Tabla 11. Diferencias técnicas significativas entre la banda L1 y la banda L5	46
Tabla 12. Satélites operativos de GPS y GLONASS que figuran en Nova	53
Tabla 13. Satélites seleccionados para el primer caso	53
Tabla 22. Parámetros de cálculo de la tasa horaria de software y hardware	74
Tabla 23. Cómputo de coste total del hardware y el software.....	74
Tabla 24. Cómputo de coste total del entorno de trabajo	75
Tabla 25. Cómputo de coste de personal	75
Tabla 26. Presupuesto total de la realización del trabajo.....	76
Tabla 14. Distribución de coordenadas de los IGP mundiales según sus bloques correspondientes	82
Tabla 15. Fragmento de la localización de los IGP utilizados por WAAS en MAAST	83
Tabla 16. Fragmento de la localización de los IGP utilizados por EGNOS en MAAST	84
Tabla 17. Localización de las RIMS registradas en MAAST	85
Tabla 18. Aproximaciones LPV publicadas en Estados Unidos según el año de publicación inicial	92
Tabla 19. Operaciones totales en aeropuertos estadounidenses según el año	93
Tabla 20. Tráfico de pasajeros internacionales en Estados Unidos según el año.....	94
Tabla 21. Proyección del tráfico de pasajeros internacionales en Estados Unidos para los últimos tres meses de 2020	95

Lista de acrónimos

AAI	Airports Authority of India
APV	Approach with Vertical guidance
ASAL	Agence Spatiale Algérienne
ASECNA	Agence pour la Sécurité de la Navigation aérienne en Afrique et à Madagascar
ATADS	Air Traffic Activity Data System
BDSBAS	BeiDou Satellite-Based Augmentation System
C/A	Coarse Acquisition
CONOPS	Concept of Operations
COVID-19	Coronavirus Disease-19
CSNO	China Satellite Navigation Office
CWAAS	Canadian Wide Area Augmentation System
DFMC	Dual Frequency Multi-Constellation
DOP	Dilution Of Precision
ECEF	Earth-Centered, Earth-Fixed
EDAS	EGNOS Data Access Service
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EMI	Electromagnetic Interference
ESA	European Space Agency
ETSID	Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
EUROCAE	European Organisation for Civil Aviation Equipment
EUSPA	European Union Agency for the Space Programme
FAA	Federal Aviation Administration
FTP	File Transfer Protocol
GAGAN	GPS-Aided GEO Augmented Navigation
GDOP	Geometric Dilution Of Precision
GIVE	Grid Ionospheric Vertical Error
GIVEI	Grid Ionospheric Vertical Error Index
GLONASS	Global Navigation Satellite System (Russia)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Generic)

GPS	Global Positioning System
GSA	European Global navigation Satellite systems Agency
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
HPL	Horizontal Protection Level
IGP	Ionospheric Grid Point
ILS	Instrument Landing System
IODE	Issue Of Data Ephemeris
IODF	Issue Of Data Fast corrections
IODP	Issue of Data PRN mask
IPP	Ionospheric Pierce Point
IRNSS	Independent Regional Navigation Satellite System
IWG	Interoperability Working Group
JRANSA	Japan Radio Air Navigation System Association
KARI	Korea Aerospace Research Institute
KASS	Korea Augmentation Satellite System
KOMPSAT	Korea Multi-Purpose Satellite
LINZ	Land Information New Zealand
LNAV	Lateral Navigation
LPV	Localizer Performance with Vertical guidance
LSFR	Linear-Feedback Shift Register
MAAST	MATLAB Algorithm Availability Simulation Tool
MATLAB	Matrix Laboratory
MLIT	Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
MOPS	Minimum Operational Performance Standard
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
MT	Message Type
NLES	Navigation Landing Earth Stations
NPA	Non-Precision Approach
NSAS	Nigerian Satellite Augmentation System
NSP	Navigation Systems Panel
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OSG	Operations Subgroup

PDOP	Position Dilution Of Precision
PRC	Pseudo Range Correction
PRN	Pseudorandom Noise
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RIMS	Ranging Integrity Monitoring Station
ROC	Rate Of Change
RSS	Russian Space Systems
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SACCSA	Sistema de Aumentación para el Caribe, Centro y Sudamérica
SARP	Standards And Recommended Practices
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring
SoL	Safety of Life
SPAN	Southern Positioning Augmentation Network
TDOP	Time Dilution Of Precision
TSG	Technical Subgroup
UDRE	User Differential Range Error
UDREI	User Differential Range Error Index
URA	User Range Accuracy
UTC	Coordinated Universal Time
VDOP	Vertical Dilution Of Precision
VPL	Vertical Protection Level
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS-84	World Geodetic System-84
WRS	Wide area Reference Stations

Introducción

Los SBAS son, como su nombre lo indica, sistemas que permiten aumentar las prestaciones de constelaciones GNSS mediante satélites geoestacionarios. Con una aumentación de prestaciones, nos referimos a complementar la información conseguida por satélites pertenecientes a constelaciones GNSS mediante mensajes que transmiten su integridad y sus correcciones asociadas.

Cada SBAS no tiene capacidad suficiente para cubrir una zona de operación mayor de la que su diseño dicta, por motivos de incertidumbres excesivas más allá del área de cobertura de los satélites geoestacionarios con respecto a la cobertura de los satélites GNSS utilizados. Por lo tanto, cada SBAS tiene asociado un área de disponibilidad en la que es capaz de ofrecer servicios.

Para definir la disponibilidad de un SBAS tenemos que hacer referencia a los otros tres pilares fundamentales que componen sus parámetros de rendimiento.

En primer lugar, un SBAS es capaz de ofrecer un nivel de precisión que no será uniforme dentro del área de disponibilidad. Esta precisión es la que diferencia la posición real del usuario de la posición del usuario estimada por el SBAS, mediante errores principalmente asociados al efecto de ciertas capas atmosféricas en las señales electromagnéticas transmitidas a través del canal de comunicación "Satélite-Tierra" y errores asociados a diferencias temporales y espaciales entre las medidas.

La información transmitida por este canal puede resultar no ser fiable, con lo que estaríamos ante un evento de integridad. En términos aeronáuticos obtenemos, además del error de posicionamiento del usuario, su nivel de protección, el cual establece los límites válidos que puede alcanzar el error de posicionamiento sin que se considere un riesgo de integridad. Ambos parámetros definen volúmenes mediante la combinación de sus componentes tridimensionales, por lo que, en una operación normal, el volumen definido por el error de posicionamiento siempre está contenido por el nivel de protección. Lógicamente, el cociente entre una componente del error de posición y su nivel de protección asociado (lo cual definimos como "índice de seguridad") mide el nivel de integridad del sistema, puesto que sería superior a la unidad en el caso de un evento de integridad.

Por otra parte, la continuidad se establece mediante una probabilidad de que el rendimiento del sistema se mantenga dentro de los límites válidos durante una operación en la que empleemos este sistema. Este parámetro es una de las principales deficiencias de los SBAS a la hora de poder validar los procedimientos de aproximación con límites más estrictos para ciertos aeropuertos.

Esto nos lleva a comentar la disponibilidad de un SBAS, la cual se define como la probabilidad de que los niveles de precisión, integridad y continuidad del sistema se cumplan en un instante determinado y para un usuario en concreto. Esto significa que la precisión que requiere el procedimiento es superior a sus mínimos, que el límite de protección garantizado por la integridad del sistema no exceda su límite válido (llamado "límite de alerta") y que el sistema tenga un nivel mínimo de interrupciones temporales en la operación medido en ventanas de una hora o quince segundos (dependiendo de lo estricto que sea el procedimiento). Es por tanto primordial tener en cuenta que, cuando nombramos el concepto de disponibilidad de un SBAS a lo largo de este trabajo, estamos haciendo referencia también a sus niveles de precisión, integridad y continuidad.

Sin embargo, la arquitectura de los SBAS no se compone exclusivamente de satélites geostacionarios. Este no es más que uno de los segmentos que componen un SBAS, llamado "segmento espacial". Además del segmento espacial, tenemos lógicamente un "segmento usuario" que recibe la información correspondiente a su posicionamiento. Cabe destacar que este segmento está altamente regulado mediante estándares con respecto a los sistemas que componen la recepción de la señal, lo que corresponde a servicios "Safety of Life" en acorde a su nivel de criticidad. Además de estos segmentos, el segmento terrestre se compone de estaciones de monitorización, centros de control e incluso infraestructuras de procesamiento de la señal para gestionar las correcciones "uplink" que se envían al segmento espacial por medio de los centros de control y la información "downlink" que reciben las estaciones de monitorización.

Por ello, no podemos afirmar que la disponibilidad dependa exclusivamente del segmento espacial, sino también de las localizaciones y los niveles de precisión, integridad y continuidad que ofrecen las distintas estaciones de referencia del segmento terrestre.

Una vez afianzados los conceptos mencionados previamente, podemos definir la interoperabilidad como la capacidad de múltiples sistemas para operar mutuamente sin cambios aparentes en su funcionamiento. La interoperabilidad de los SBAS sería pues la capacidad de ofrecer una transición entre servicios ofrecidos por dos o más SBAS sin interrupciones notables ni necesidad de equipos de a bordo tecnológicamente distintos para operar con cada uno de los servicios.

Como consecuencia, la estructura de dichos SBAS debe ser similar, pero tiene que permitir albergar las diferencias técnicas que distinguen sus operaciones. Dicho de otra manera, un SBAS tendría que poder transmitir hipotéticamente la información característica de otro SBAS sin tener que redefinir su estructura interna (obviamente que la disponibilidad que los SBAS pueden garantizar en zonas de cobertura distintas no es suficiente, con el fin de ilustrar mejor una situación de interoperabilidad a nivel estructural).

Además, la interoperabilidad se puede medir a partir del grado de superposición de sus zonas con disponibilidad aceptable según el procedimiento (dos SBAS que permiten tener niveles de disponibilidad aceptables para una localización cualquiera permitirían un grado mayor de interoperabilidad en los servicios que pueden ofrecer para un usuario que se encuentre en dicha localización).

Estas son las directrices que utilizaremos para justificar el alto grado de interoperabilidad de los SBAS actuales. Sin embargo, hay un gran número de SBAS que actualmente se encuentran en desarrollo. Veremos como esto permitirá lógicamente una interoperabilidad mayor gracias a una disponibilidad más globalizada y gracias a avances tecnológicos implementados conjuntamente para todos los SBAS.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es esclarecer las razones por las que podemos justificar que los SBAS son sistemas interoperables, tanto en la actualidad como en el futuro.

Para empezar, analizaremos la disponibilidad de los SBAS actuales mediante mapas de disponibilidad recientes de cada uno de ellos. Esto permitirá evaluar el nivel actual de interoperabilidad que pueden garantizar los SBAS operativos hoy en día. Al encontrarnos con una multitud de SBAS que van a tener un funcionamiento operativo en los próximos años, compararemos el escenario actual con el nivel de interoperabilidad mundial a nivel de la disponibilidad al que se puede llegar en los próximos diez años. El objetivo de ello es dejar en evidencia el progreso inminente de la interoperabilidad garantizado por la inclusión de nuevos SBAS. A lo largo de ello, comentaremos de los parámetros que definen la disponibilidad de un SBAS para ofrecer una vista más comprehensiva de este progreso y para asentar las bases de los aspectos técnicos comentados en apartados posteriores.

Estos aspectos técnicos son las estructuras de los distintos tipos de mensajes de corrección de los SBAS. Analizaremos su composición y la utilidad de sus parámetros subyacentes con el fin de justificar el nivel actual de interoperabilidad satisfactorio de la generación y organización de cada tipo de mensaje. Además, pondremos en evidencia los indicios de una estructura interoperable con los SBAS futuros comentados previamente para poder deducir si se trata de una interoperabilidad aparente y mejorable o no.

Por último, el objetivo final del trabajo será la justificación de las mejoras de interoperabilidad mediante la explicación de los desarrollos tecnológicos y operacionales que se están llevando a cabo multilateralmente. Con esto, pretendemos ligar la creciente interoperabilidad a nivel de la disponibilidad con las modificaciones en la estructura de los SBAS y sus aplicaciones actuales y futuras en la navegación aérea y la aviación. Llegaremos pues a identificar las ventajas de dichos desarrollos, aunque también mostraremos sus limitaciones.

I. MEMORIA

1. La interoperabilidad asegurada por una disponibilidad creciente

El software de uso libre MAAST [1] permite simular un mapeo de la disponibilidad de WAAS, EGNOS y MSAS a partir de los parámetros que se mencionan en los próximos apartados. Sin embargo, en su estado predeterminado, ofrece cálculos a partir de valores asumidos constantes y de bases de datos no actualizadas, por lo que no es conveniente utilizarlo actualmente desde un punto de vista práctico. Sin embargo, tiene otras funcionalidades útiles que sirven para ilustrar los conceptos que se introducen a lo largo de este apartado.

1.1. El concepto de UDRE

El UDRE, o Error de Alcance Diferencial de Usuario, es el error residual que tenemos en la pseudodistancia tras aplicar correcciones orbitales y correcciones de reloj. En este tipo de errores, intervienen cuatro dimensiones: tanto los estados orbitales de los satélites (tres dimensiones) como la deriva del reloj del satélite con respecto a los relojes de las estaciones de referencia (cuarta dimensión). Las correcciones se realizan sobre las medidas de la pseudodistancia corregida para efectos ionosféricos, lo que resulta en la obtención de un intervalo de confianza y un error esperado de filtrado. A partir del modelo obtenido, se estima la varianza y la media para determinar un índice de UDRE (o UDREI), lo cual es un indicador de la precisión de las correcciones rápidas y lentas. Los errores residuales son comparados a los límites asociados a cada uno de estos índices, para determinar si la probabilidad de tener una varianza de UDRE real mayor a la requerida es suficientemente baja. Generalmente, los errores mayores del cuádruple de la desviación estándar del modelo de UDRE son considerados como fallos. El valor más bajo de UDRE que se encuentra dentro del límite probabilístico es el que se utiliza para determinar el UDREI [2]. En la siguiente tabla, vemos la repartición de los UDREI en función de la varianza asociada.

UDREI	Varianza UDRE	Media UDRE
0	0.052	0.75
1	0.0924	1
2	0.1444	1.25
3	0.283	1.75
4	0.4678	2.25
5	0.8315	3
6	1.2992	3.75
7	1.8709	4.5

UDREI	Varianza UDRE	Media UDRE
8	2.5465	5.25
9	3.326	6
10	5.1968	7.5
11	20.787	15
12	230.9661	50
13	2078.695	150
14	No monitorizado	
15	No utilizar	

Tabla 1. Equivalencia del índice de UDRE y sus parámetros estadísticos correspondientes

1.2. El concepto de GIVE

El GIVE, o Error Vertical de Red Ionosférica, es el error resultante de la aplicación de modelos de cómputo del retardo ionosférico. Se trata de establecer una red de puntos llamados IPP o Puntos de Penetración Ionosférica. Estos son los puntos de intersección con la capa ionosférica entre el campo visual del satélite y un punto terrestre, con altura de la ionosfera asumida constante e igual a 350 km por encima del modelo WGS-84. Las localizaciones de estos IPP se determinan gracias a la obtención de parámetros como la latitud del usuario o el ángulo de elevación y el acimut del satélite con respecto al usuario [3]. A partir de los cálculos de IPP, se establece un modelo de retardo en cada uno de los puntos terrestres establecidos en la red (puntos llamados IGP o Puntos de la Red Ionosférica). El GIVE es pues un valor establecido en un intervalo de confianza para el residual de retardo vertical calculado en cada IGP [4]. Junto con el UDRE y las correcciones troposféricas, forman las correcciones diferenciales principales de SBAS para garantizar los niveles de precisión y protección actuales.

1.3. Las correcciones troposféricas

Pese a que la interfaz de MAAST no especifica ninguna selección en cuanto a las correcciones troposféricas del modelo de cómputo, la guía del usuario especifica que el cálculo se realiza en acorde a los estándares mínimos de rendimiento operacional de la RTCA. Es por ello por lo que es relevante comentar estas correcciones, ya que son procedimientos implícitos en el código al ser calculados principalmente con relaciones estadísticas. Se determinan principalmente mediante la suma de dos parámetros: el retardo de rango cenital causado por los gases atmosféricos en condiciones de equilibrio hidrostático y el retardo de rango cenital causado por el vapor de agua e hidrometeoros. Estos parámetros son calculados a partir de las estimaciones de seis valores distintos relacionados con el receptor: la altitud (que es fija para un instante), la presión, la temperatura, la presión del vapor de agua, el gradiente adiabático de temperatura y el gradiente adiabático de vapor de agua. Los valores previamente mencionados son computados según el día del año y la latitud del receptor, para ser interpolados estadísticamente mediante sus respectivas medias y variaciones según la estación del año [5]. A continuación, podemos ver una tabla con las medias y variaciones en función de la latitud del receptor [6].

Average					
Latitude (°)	P_0 (mbar)	T_0 (K)	e_0 (mbar)	β_0 (K/m)	λ_0
15° or less	1013.25	299.65	26.31	6.30e-3	2.77
30	1017.25	294.15	21.79	6.05e-3	3.15
45	1015.75	283.15	11.66	5.58e-3	2.57
60	1011.75	272.15	6.78	5.39e-3	1.81
75° or greater	1013.00	263.65	4.11	4.53e-3	1.55
Seasonal Variation					
Latitude (°)	ΔP (mbar)	ΔT (K)	Δe (mbar)	$\Delta \beta$ (K/m)	$\Delta \lambda$
15° or less	0.00	0.00	0.00	0.00e-3	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	0.25e-3	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	0.32e-3	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	0.81e-3	0.74
75° or greater	-0.50	14.50	3.39	0.62e-3	0.30

Tabla 2. Valores de referencia para los parámetros del cálculo de las correcciones troposféricas

Por ejemplo, para una estación con latitud 47° N en el día 12 de enero (día D = 12), tendríamos que:

- $$P_0(47^\circ) = P_0(45^\circ) + [P_0(60^\circ) - P_0(45^\circ)] * \left(\frac{47-45}{60-45}\right)$$

$$P_0(47^\circ) = 1015.75 + [1011.75 - 1015.75] * \left(\frac{47 - 45}{60 - 45}\right)$$

$$P_0(47^\circ) = 1015.22 \text{ mbar}$$

- $$\Delta P(47^\circ) = \Delta P(45^\circ) + [\Delta P(60^\circ) - \Delta P(45^\circ)] * \left(\frac{47-45}{60-45}\right)$$

$$\Delta P(47^\circ) = \Delta P(45^\circ) + [\Delta P(60^\circ) - \Delta P(45^\circ)] * \left(\frac{47 - 45}{60 - 45}\right)$$

$$\Delta P(47^\circ) = -2.18 \text{ mbar}$$

- $$D_{min} = 28, \text{ al ser latitud Norte } (D_{min} = 211 \text{ si fuese latitud Sur})$$

$$P(47^\circ N, D = 12) = P_0(47^\circ) - \Delta P(47^\circ) * \cos\left(\frac{2\pi(12 - D_{min})}{365.25}\right)$$

$$P(47^\circ N, D = 12) = 1015.22 \text{ mbar} + 2.18 \text{ mbar} * \cos\left(\frac{2\pi(12 - 28)}{365.25}\right)$$

$$P(47^\circ N, D = 12) = 1017.40 \text{ mbar}$$

Este simple procedimiento matemático es aplicable a los cinco parámetros variables del receptor. A partir de estos valores obtenidos, podemos calcular los retardos de rango cenital (fórmulas A-8 y A-9 de RTCA MOPS DO-229D [6]). La suma de estos retardos es multiplicada por una función que depende exclusivamente del ángulo de elevación del satélite, lo que resulta en el cómputo final de las correcciones troposféricas.

1.4. La máscara de Red Ionosférica de Puntos

Una Red Ionosférica de Puntos es un conjunto de IGP cuyas elevaciones son similares al terreno y sobre los cuales se conocen sus retardos ionosféricos a través de los IPP. Las variables conocidas de estos puntos son la posición y el retardo ionosférico correspondiente, por lo que para conocer el retardo en un punto intermedio que no pertenece a la red, se trataría de interpolar el retardo según la distancia a los puntos que lo rodean. Una máscara de IGP es pues una selección de puntos ionosféricos para formar una o varias redes. Cada SBAS tendrá su propia máscara IGP en función de su disponibilidad.

A continuación, se muestra un mapa con las IGP mundiales predefinidas, extraído del documento RTCA MOPS DO-229D [6] (las bandas 9 y 10 no son visibles). A su vez, en el anexo A, podemos comprobar la localización de cada uno de los puntos de la red global (extraídas del mismo documento de RTCA). Estos están agrupados en bandas, por lo que el código especifica tanto los identificadores de los puntos seleccionados como las bandas en las que se encuentran.

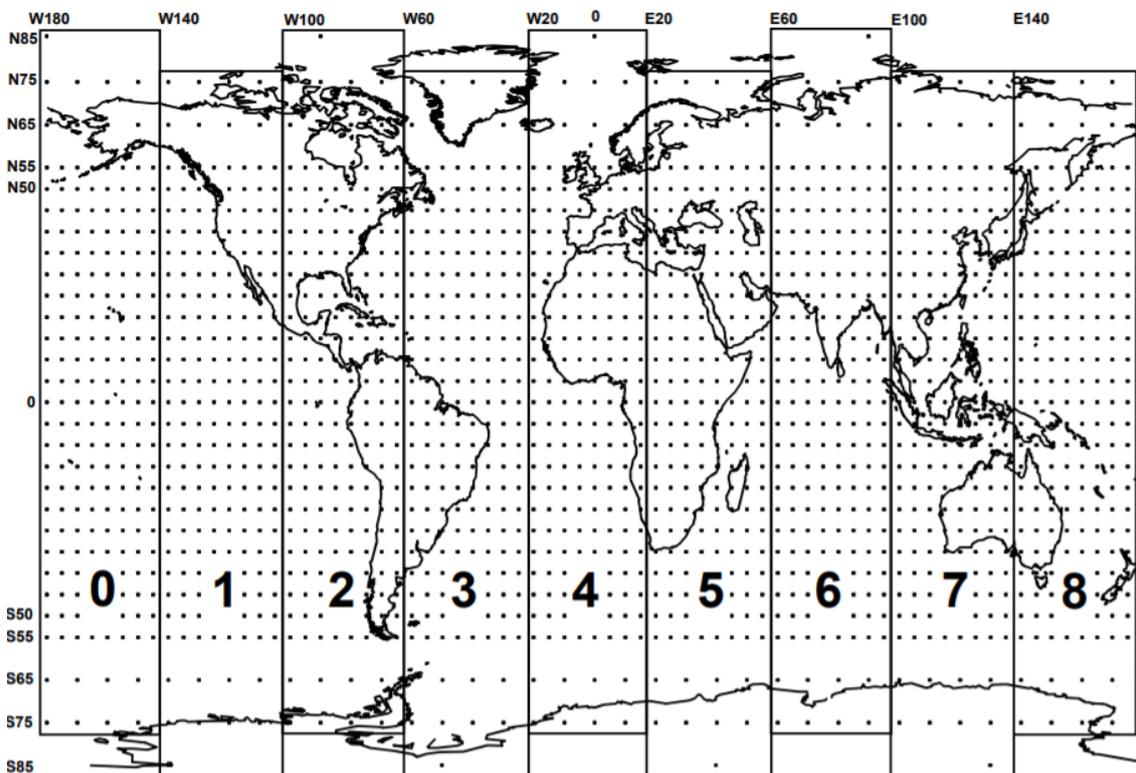


Ilustración 1. Carta de referencia de los IGP mundiales agrupados en bloques

La existencia misma de una red ionosférica de puntos mundial justifica la adaptabilidad del modelo actual a un sistema interoperable con respecto a las correcciones que se realizan. El UDRE depende de ciertos parámetros del satélite y de parámetros asociados a la estación de referencia, por lo que sería totalmente interoperable si cualquier estación de referencia es capaz de transmitir información a satélites de cualquier SBAS, o bien a estaciones de referencia asociadas a cualquier SBAS. Por otra parte, las correcciones troposféricas son exclusivamente dependientes de modelos estadísticos realizados sobre condiciones físicas y climatológicas del

receptor, por lo que se puede superponer claramente a cualquier receptor en cualquier parte del mundo, siempre y cuando tengamos información suficiente sobre su entorno. Finalmente, las correcciones ionosféricas se realizan con cálculos de valores obtenidos a partir de los parámetros del usuario y de los satélites. Sin embargo, los parámetros del usuario pueden ser extrapolables con respecto a los cálculos sobre los IGP por lo que, una vez seleccionada la máscara de IGP, obtenemos el GIVE a partir de las efemérides de los satélites. Por lo tanto, las correcciones realizables demuestran un grado alto de interoperabilidad, ya que estas correcciones se pueden computar teóricamente, con mayor o menor grado de incertidumbre, para cualquier punto dentro de la zona de cobertura de los SBAS actuales.

Veamos pues algunos ejemplos de máscaras de IGP utilizadas para SBAS actuales. La máscara IGP que vemos a continuación es utilizable para EGNOS, ya que cubre toda su zona de operaciones. En términos globales, los IGP forman parte de las regiones 3 a 6 señaladas en la ilustración 1 (aunque incluimos el punto de la región 2 más cercano al polo Norte).

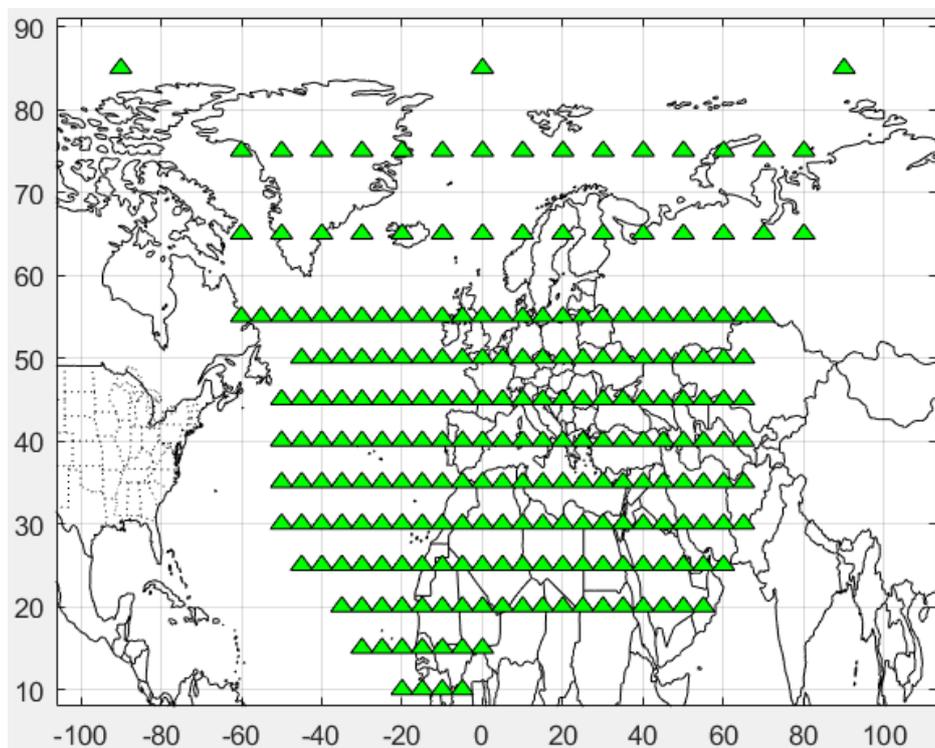


Ilustración 2. *Máscara de IGP de EGNOS en el software MAAS*

En cuanto a WAAS, la máscara IGP con mayor cobertura utiliza puntos de las regiones 0 a 3, incluyendo ciertos puntos de la región 9 (la cual tiene latitudes Norte superiores al resto de regiones). El mapeo de dicha máscara se puede observar a continuación:

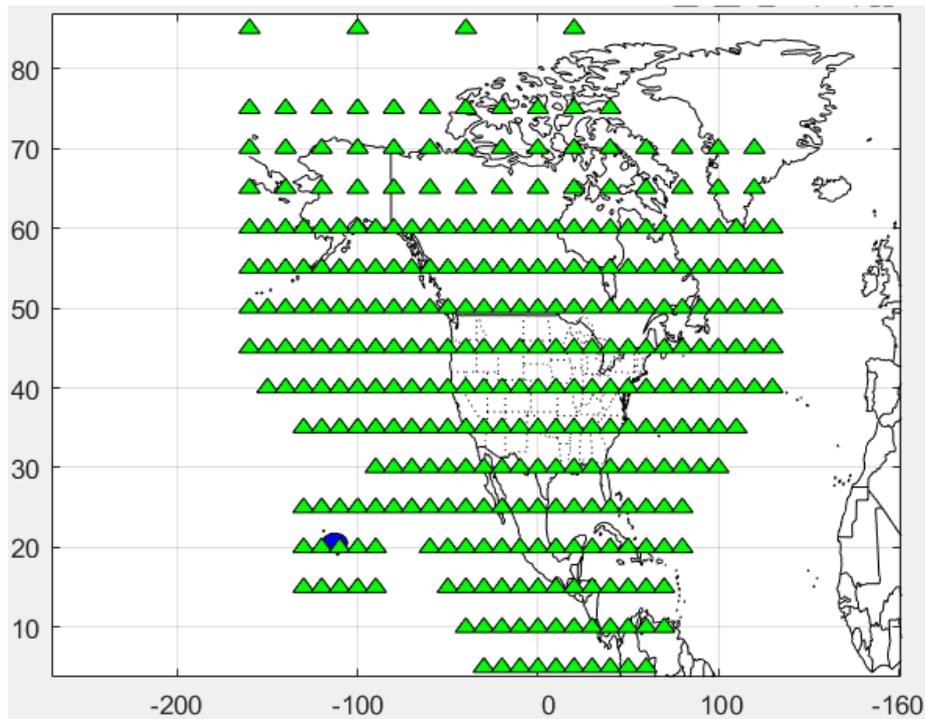


Ilustración 3. Máscara de IGP de WAAS en el software MAAST

Para la información completa con la localización de la localización de los IGP de las máscaras mencionadas, referirse a los anexos B y C. Al tener una cantidad excesiva de datos de IGP que mostrar (321 IGP en la máscara de WAAS y 231 IGP en la máscara de EGNOS), los anexos muestran únicamente los primeros y últimos puntos de las máscaras. El resto de las coordenadas y los bits se pueden deducir a partir de las ilustraciones 2 y 3 en conjunto con la información del anexo A.

Tomando el ejemplo de SDCM [7], podemos comprobar que la red ionosférica de puntos utilizada es la siguiente:

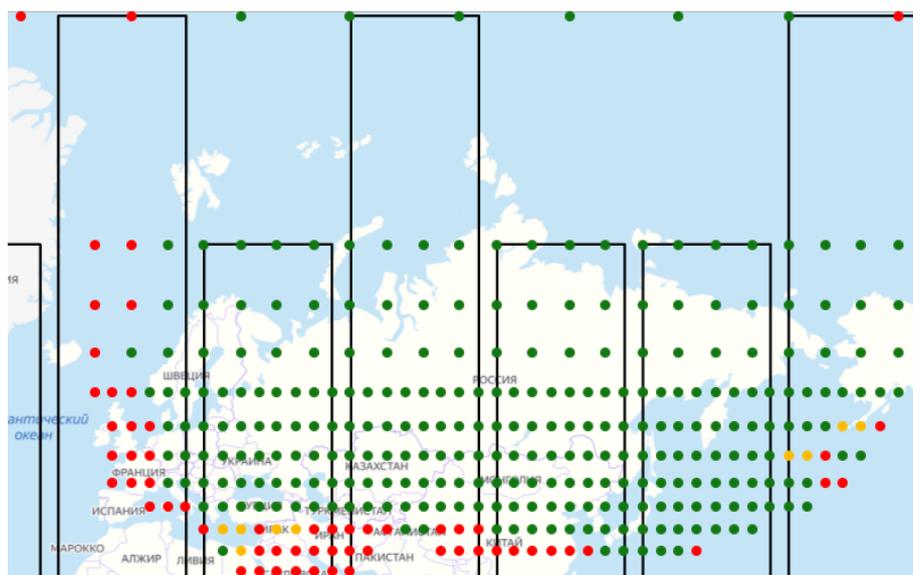


Ilustración 4. Máscara de IGP de SDCM en su página web oficial

Se trata de una red extensa con IGP localizados en las regiones 0 y 4 a 9. Podemos comprobar el GIVE calculado para cada uno de estos puntos el 18 de abril de 2021 en forma de gráfico 3D de latitudes, longitudes y errores ionosféricos asociados (ilustración 5). El máximo error registrado parece ser de 2.62 m en el IGP de latitud 45 N y longitud 30 W. Con ello podemos comprobar que el valor registrado a las 9:29 de la mañana de ese día concuerda con el valor graficado (ilustración 6).

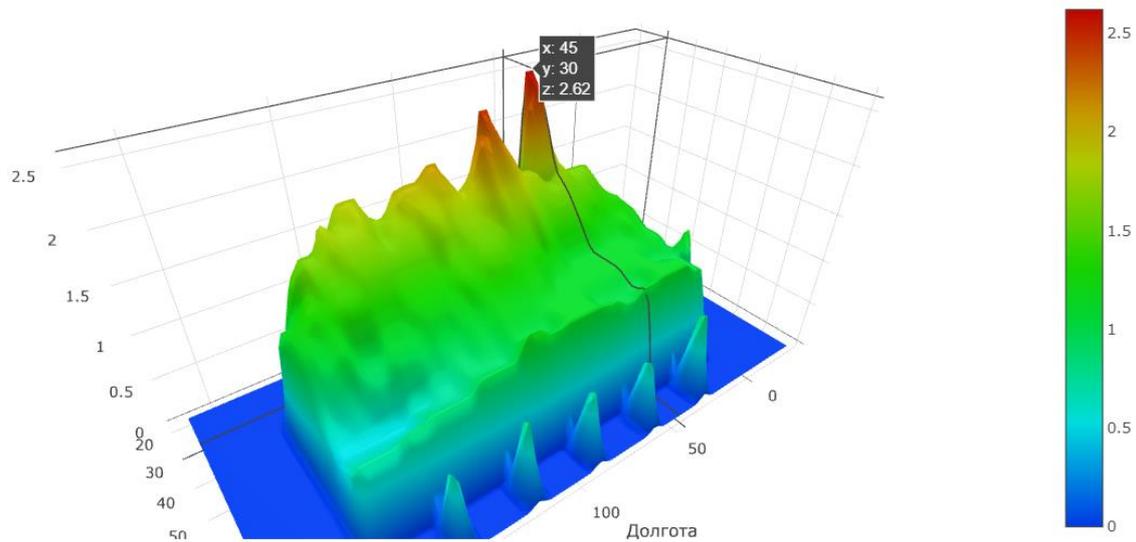


Ilustración 5. Repartición tridimensional del GIVE determinado por SDCM y máximo valor registrado

2021-04-18 09:28:57	5	0	45	35	6	1.500	-0.0710
2021-04-18 09:28:57	5	0	50	30	5	1.250	0.0400
2021-04-18 09:28:57	5	0	50	35	7	1.250	-0.0300
2021-04-18 09:28:57	5	0	55	30	6	1.120	-0.0030
2021-04-18 09:28:57	5	0	55	35	5	1.120	-0.0540
2021-04-18 09:28:57	5	0	65	30	4	1.120	0.0610
2021-04-18 09:28:57	5	0	75	30	3	1.120	0.0780
2021-04-18 09:29:09	5	0	25	45	15	63.750	
2021-04-18 09:29:09	5	0	30	40	15	63.750	
2021-04-18 09:29:09	5	0	30	45	14	2.620	0.0540
2021-04-18 09:29:09	5	0	35	40	13	1.620	-0.1000
2021-04-18 09:29:09	5	0	35	45	13	2.380	0.3910
2021-04-18 09:29:09	5	0	40	40	5	1.750	-0.0880
2021-04-18 09:29:09	5	0	40	45	5	1.750	-0.1020
2021-04-18 09:29:09	5	0	45	40	5	1.500	-0.0990
2021-04-18 09:29:09	5	0	45	45	6	1.620	0.0140
2021-04-18 09:29:09	5	0	50	40	5	1.380	0.0060
2021-04-18 09:29:09	5	0	50	45	6	1.380	-0.0320
2021-04-18 09:29:09	5	0	55	40	4	1.120	-0.0250
2021-04-18 09:29:09	5	0	55	45	5	1.120	-0.0010
2021-04-18 09:29:09	5	0	65	40	4	1.120	0.0550
2021-04-18 09:29:09	5	0	75	40	4	1.120	0.0570

Ilustración 6. Registro de valores de GIVE para cada IGP y máximo valor de IGP monitorizados

1.5. La virtualización de las estaciones de referencia y de usuario

Con el menú WRS de MAAST podemos seleccionar las estaciones de referencia que podemos considerar para un análisis de disponibilidad. Por ejemplo, las estaciones de referencia consideradas para EGNOS (en este caso se denominan RIMS o “Ranging and Integrity Monitoring Stations”) están señalizadas con un punto azul en la siguiente ilustración.

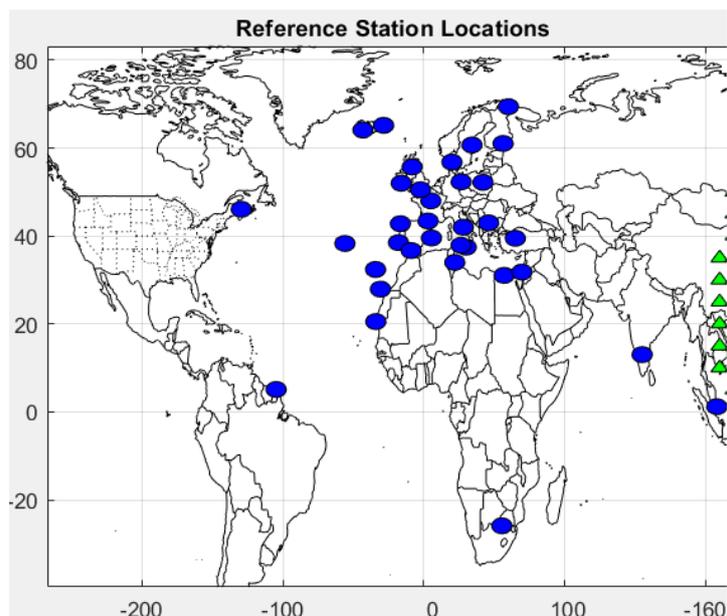


Ilustración 7. Estaciones de referencia de EGNOS (RIMS) en el software MAAST

Se trataría de 34 RIMS cuyas latitudes, longitudes y localización están definidas en un fichero de texto leído por MATLAB. Podemos encontrar, por ejemplo, estaciones en las Islas Canarias (27.92° N, 15.38° W), en Málaga (36.7° N, 4.5° W), en Palma de Mallorca (39.55° N, 2.73° E) o en Santiago de Compostela (42.8° N, 8.3° W). Las localizaciones de las 34 RIMS seleccionadas se encuentran en el anexo D.

En cuanto al menú de usuarios, seleccionamos la zona con la posible localización del usuario. Al evaluar las prestaciones de SBAS, tendremos que seleccionar la totalidad de la zona en la que el SBAS pretende dar servicio. A nivel práctico, esto resulta en la creación de una red de usuarios individuales contenidos dentro de la zona de usuario seleccionada. El espaciado, tanto en latitud como en longitud (es decir, la resolución de la red), puede ser introducido manualmente.

1.6. Los límites de alerta

Por último, sería necesario especificar los límites de alerta de los que dependería la disponibilidad. En fases de vuelo que no son críticas, el límite horizontal proporciona un margen lo suficientemente amplio para que pueda ser garantizado por al menos un SBAS para cualquier avión situado en una de las principales vías aéreas cubiertas por SBAS durante su fase de crucero

(de hecho, no existe límite de alerta vertical durante dicha fase). Sin embargo, los requerimientos de límite de alerta para fases de aproximación son notablemente más estrictos, llegando a unas pocas decenas de metros tanto en protección horizontal como en vertical para procedimientos APV [8]. De hecho, la necesidad de márgenes verticales tan estrechos es la razón por la que muchos aeropuertos no pueden validar aún procedimientos APV II mediante SBAS. Por ejemplo, como podemos observar en la siguiente ilustración, la RIMS de Santiago de Compostela ha computado niveles de protección vertical (VPL) que oscilan entre 10 y 28 metros para el satélite con PRN 123 el día 15 de abril de 2021, mientras que el requerimiento de límite de alerta vertical para procedimientos APV II es de 20 metros [9].

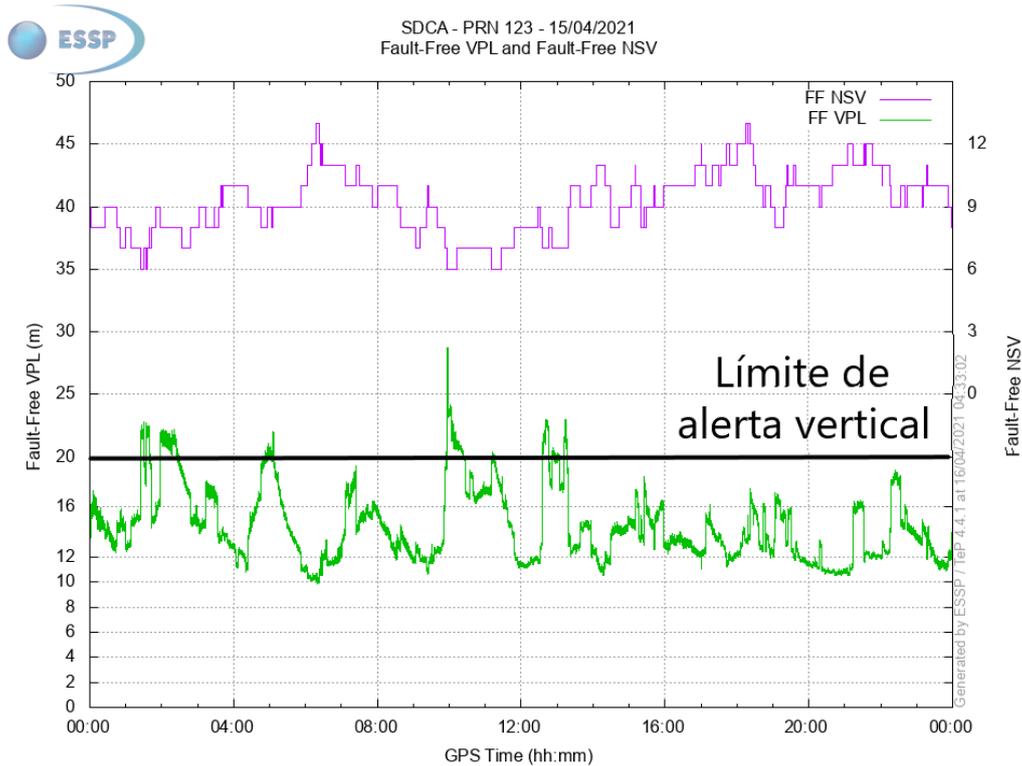


Ilustración 8. Límite de protección vertical en la RIMS de Santiago de Compostela el 15 de abril de 2021

Esta limitación se constata claramente cuando comparamos los niveles de protección vertical y los niveles de protección horizontal (ilustraciones 9 y 10 respectivamente). Los resultados de EGNOS para estos niveles de integridad se pueden superponer a otros SBAS como WAAS o GAGAN. Al tener dificultad para garantizar niveles de protección verticales en su propia zona de cobertura, se puede suponer que la interoperabilidad de SBAS para procedimientos de aproximación tales como APV, tanto en integridad como en disponibilidad, no está garantizada para ciertos aeropuertos por los SBAS actuales.

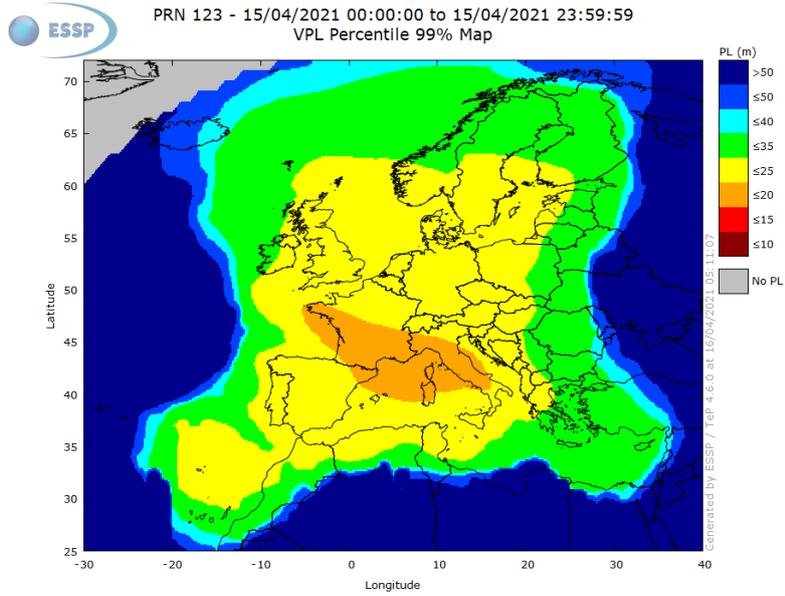


Ilustración 9. Mapa de la distribución del percentil 99% del VPL para EGNOS el 15 de abril de 2021

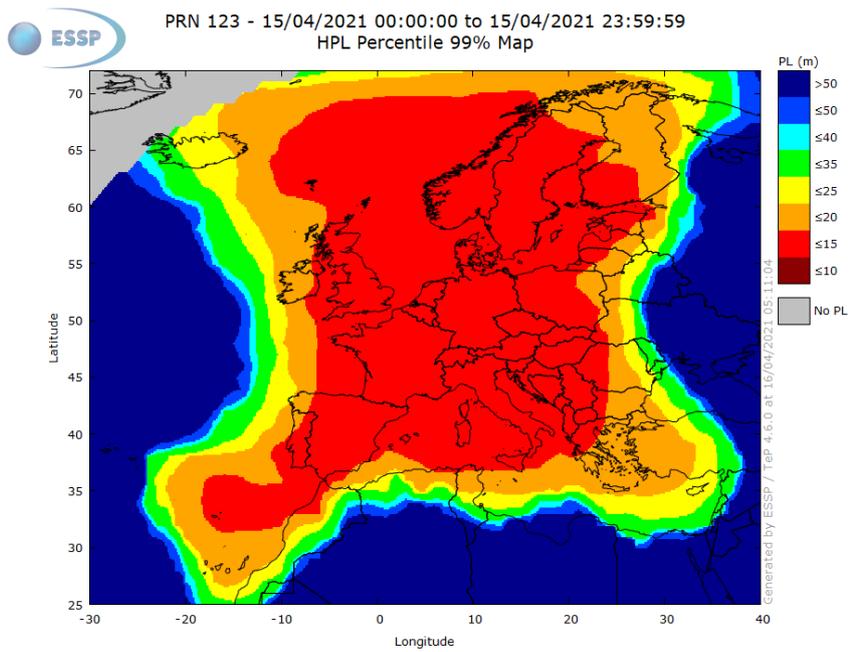


Ilustración 10. Mapa de la distribución del percentil 99% del HPL para EGNOS el 15 de abril de 2021

1.7. La disponibilidad mundial

El programa MAAST no es ideal para realizar cálculos de la disponibilidad de EGNOS, WAAS y MSAS en la actualidad. En primer lugar, no plantea ningún algoritmo de variación de UDRE o GIVE, sino que asume valores predeterminados constantes (aunque en teoría ofrece la posibilidad de desarrollar algoritmos para simular una variación en las diferentes redes). Además, utiliza efemérides de satélites geostacionarios ya retirados como ARTEMIS para EGNOS, con lo que sus cómputos están actualmente obsoletos.

Al querer tener únicamente una noción de la disponibilidad de los SBAS actuales y futuros, vamos a utilizar las versiones públicamente accesibles más recientes de los SBAS actuales y combinarlos con estimaciones de la disponibilidad de los SBAS en desarrollo. EGNOS y WAAS ofrecen actualizaciones diarias de todos los parámetros imprescindibles para el “*Safety of Life*” (GAGAN publica únicamente el mapa de disponibilidad de APV I del día que se consulta). Por otra parte, SDCM ofrece mapas ionosféricos y correcciones minuto a minuto, pero no publica mapas de disponibilidad de manera regular.

Basaremos pues el análisis de la disponibilidad mundial en las zonas previstas para implementación de SBAS futuros y en los perímetros que delimitan las zonas con disponibilidad superior al 99% para fechas recientes de los SBAS actuales.

Tras obtener mapas de disponibilidad recientes de los SBAS actuales (anexo E [10][11][12][13]), podemos trazar los perímetros de cada SBAS en una carta mundial, ateniéndonos a las deformaciones de las proyecciones cartográficas. A continuación, podemos observar el trazado de dichos perímetros (color negro) junto con la inclusión de las zonas de disponibilidad aproximadas de los SBAS futuros (color azul, al no disponer de información más precisa). Decidimos incluir la disponibilidad de SDCM a la de los SBAS actuales al tener ya una abundancia de datos en los que basarnos, pese a que se encuentra todavía en desarrollo. Todo ello se superpone a la carta de las proyecciones de las principales vías del tráfico aéreo de 2020, extraída del plan de navegación global de la OACI [14].

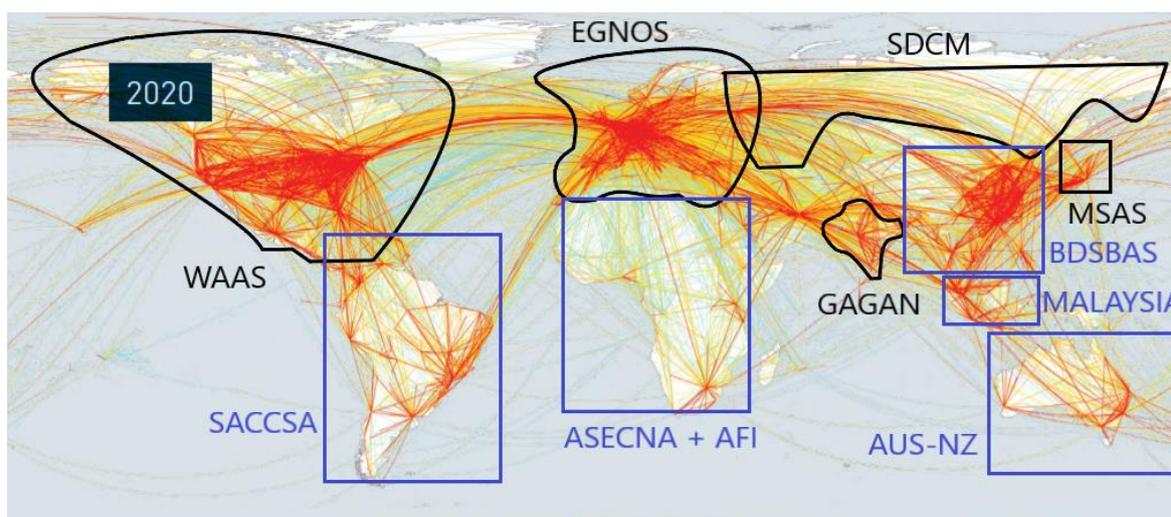


Ilustración 11. Zonas de disponibilidad de SBAS superpuestas a la proyección de tráfico aéreo mundial de 2020

Es lógico que la interoperabilidad a nivel de la disponibilidad no esté garantizada entre SBAS para aproximaciones de precisión, ya que no es en absoluto necesario que dos SBAS cubran las aproximaciones de un mismo aeropuerto. Además, los requerimientos son demasiado restrictivos, limitando los SBAS para aproximaciones en la zona para los que están diseñados. Cabe destacar que la zona del Oriente Medio es un importante enclave del flujo aéreo internacional y, pese a ello, no hay ningún plan de implementación de SBAS en la actualidad ni en el futuro.

En cuanto a los procedimientos de no precisión y procedimiento en ruta, solo EGNOS y SDCM tienen actualmente cierto grado de interoperabilidad para la zona de Europa Oriental que conecta con el Este ruso (para enclaves como el aeropuerto internacional de Sheremetyevo en Moscú). Esto se debe principalmente a que las zonas de disponibilidad de los SBAS actuales están geográficamente espaciadas entre sí, al ofrecer una aumentación para las principales rutas de tráfico aéreo en diversas partes del mundo.

Sin embargo, de cara al futuro, el grado de interoperabilidad en este ámbito puede mejorar enormemente tras la implementación de los SBAS dedicados a las regiones asiáticas y austral asiáticas (mediante el SBAS AUS-NZ, técnicamente llamado SPAN). La particularidad de estas regiones es que concentran un flujo de tráfico aéreo muy disperso, con zonas de muy alta densidad de flujo, pero también zonas de baja densidad de flujo en comparación con SBAS actuales como WAAS o EGNOS.

Por lo tanto, la implementación futura de BDSBAS y MALAYSIA puede ser la clave para la formación de un quinteto de SBAS asiáticos (SDCM, MSAS, GAGAN, BDSBAS y MALAYSIA) con alto grado de interoperabilidad en procedimientos de crucero y no precisión, pero también una interconexión de zonas de disponibilidad de aproximaciones de precisión. Vamos a ilustrar este concepto con una comparativa del rendimiento actual y las proyecciones de cara al futuro.

A continuación, podemos observar el nivel de protección horizontal garantizado por la combinación de SBAS junto con RAIM (febrero 2020 [15]).

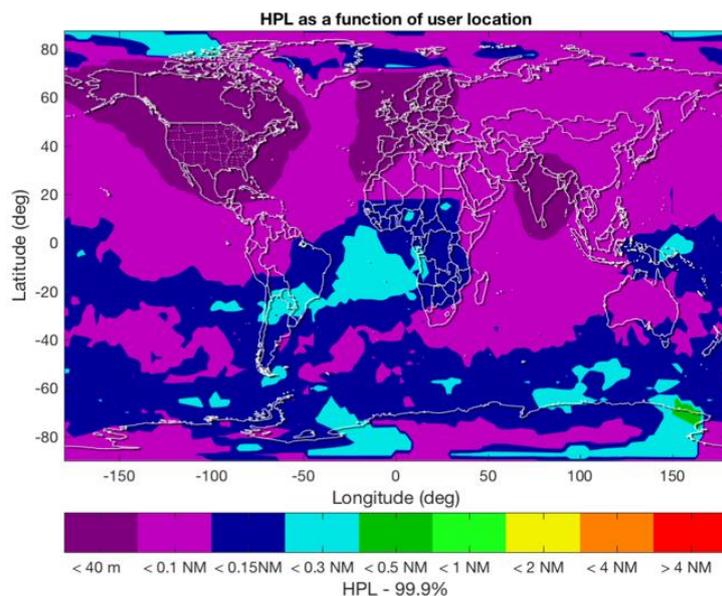


Ilustración 12. HPL garantizado actualmente por SBAS junto con RAIM

Es evidente que las zonas con mejores niveles de protección son las zonas de disponibilidad de WAAS, EGNOS y GAGAN (MSAS se encuentra en estado operativo para procedimientos de no precisión y está en proceso de certificación para aproximaciones de precisión), mientras que el resto de las zonas con un volumen de tráfico aéreo importante no llegan a cubrir el límite de alerta necesario para aproximaciones de precisión. Sin embargo, el IWG proyecta que la disponibilidad garantizada para aproximaciones de precisión en 2025 será similar a la que encontramos a continuación:

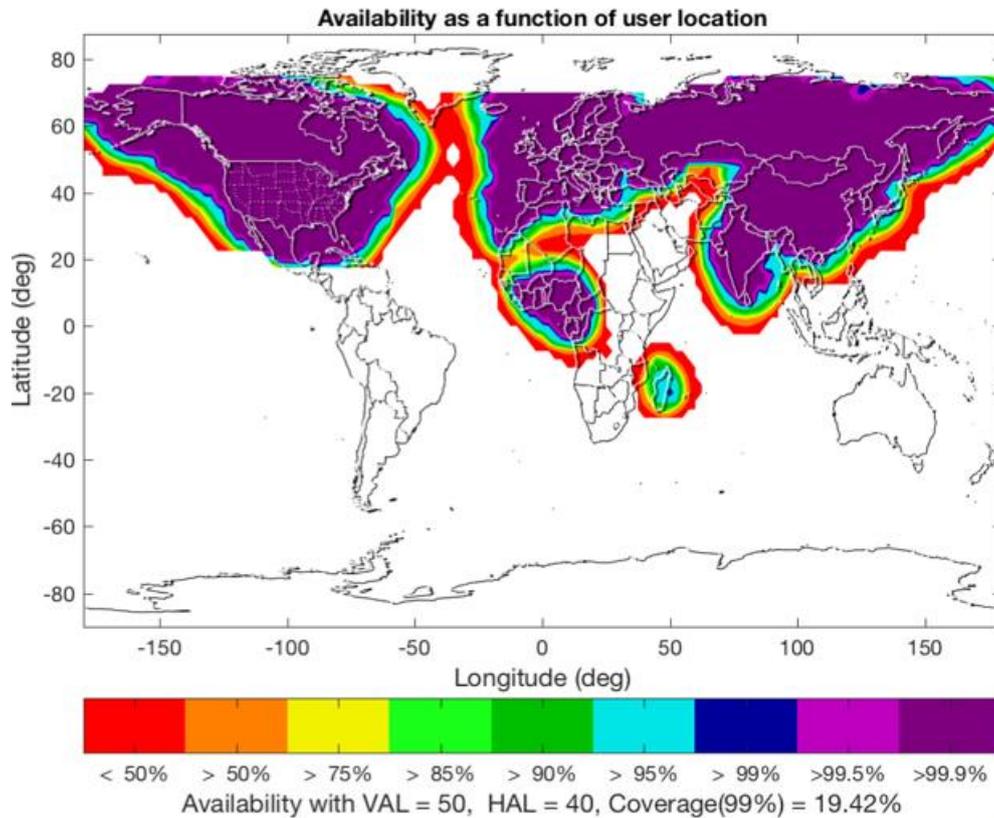


Ilustración 13. Proyección de disponibilidad para aproximaciones APV-I en 2025

Vemos como la interoperabilidad del quinteto asiático descrita previamente se materializaría junto con la actual entre EGNOS y SDCM para formar un gran bloque Euroasiático. La proyección predice también los inicios de la implementación de ASECNA, aunque su zona de disponibilidad no sería suficiente para conectar con la zona de disponibilidad de EGNOS. Por otra parte, vemos como no es previsible que SPAN y SACCSA sean implementados en 2025. Al igual, el Oriente Medio no será cubierto por ningún SBAS para aproximaciones de precisión de cara al futuro, como hemos mencionado anteriormente.

2. La interoperabilidad asegurada por una definición de mensajes homogénea

2.1. El concepto de máscara PRN

En su sentido abstracto, el código PRN de un satélite es el valor que asocia el mensaje a un determinado satélite. Cada satélite perteneciente a constelaciones GNSS o SBAS tiene asociado un código PRN en función de la agrupación en la que se encuentra. Una máscara PRN sería entonces un conjunto de PRN a los que hacemos alusión con una única llamada de código. Una funcionalidad importante de esto es ahorrar bits para el mensaje. La estructura del mensaje de cualquier SBAS permite seleccionar hasta un máximo de 51 PRN, lo cual es suficiente por ahora ya que la constelación GPS sobre la que se realiza la aumentación tiene un número de satélites total inferior al máximo permitido por la estructura.

En el sentido físico, se trata del patrón de una secuencia de pulsos. La autocorrelación de esta secuencia es baja para dos instancias de la secuencia separadas en el tiempo, pero la correlación entre las secuencias de la antena transmisora y de la receptora debe ser alta. De esta forma, un mensaje con un código PRN determinado es procesado por su satélite correspondiente si el código PRN que recibe tiene una alta correlación con la secuencia que el receptor está generando.

Encontramos en el código PRN el primer problema de interoperabilidad: cada constelación GNSS tiene asignada su secuencia de códigos PRN según los satélites que se encuentren dentro de la constelación. La distribución de códigos PRN se podría generalizar dentro de la estructura interoperable de SBAS asignando un código PRN internacional a cada satélite de las constelaciones GNSS que se pretenden aumentar. El código PRN de IRNSS no se podría definir bien en hexadecimal, por ejemplo, al tener un carácter "I" al inicio de la definición de cada uno de sus PRN. Cada banda de frecuencia tiene asociada su distribución de PRN según los satélites que se comuniquen a esa frecuencia. En la tabla 3, podemos comprobar los rangos de códigos asignadas a cada constelación [16]:

Constelación GNSS	Rango de máscara PRN asociado	Estado
GALILEO	E01 a E36	Actualidad
GPS	1 a 37	Actualidad + Reservado
GLONASS	38 a 61	Actualidad + Reservado
BeiDou	C01 a C61	Actualidad + Reservado
IRNSS	I01 a I07	Actualidad
QZSS	183 a 202	Actualidad + Reservado

Tabla 3. Rangos de PRN asociados a cada constelación de satélites

Sin embargo, los SBAS funcionan en bandas asociadas a códigos PRN del GPS. De hecho, el rango 120 a 158 está reservado a la mayoría de SBAS actuales y en desarrollo, mientras que el rango 159 a 210 sigue disponible para su uso futuro (con la excepción de un intervalo de PRN reservado para el QZSS). En la siguiente tabla, podemos ver los códigos PRN asociados a cada uno de los SBAS para la banda L1 C/A (actualizado en octubre de 2020 [17], la banda L5 tiene asignaciones similares reservadas exclusivamente para los SBAS que la utilicen).

SBAS	Máscaras PRN asociadas	Estado
EGNOS	121, 123, 126, 136	Actualidad
	124	Reservado
GAGAN	127, 128, 132	Actualidad
WAAS	131, 133, 135, 138	Actualidad
BDSBAS	130, 143, 144	Actualidad
SDCM	125, 140, 141	Actualidad
MSAS	129, 137	Actualidad
SPAN	122	Actualidad
KASS	134	Actualidad
NSAS	147	Actualidad
ASAL	148	Actualidad
	120	Reservado
	139, 142, 145, 146	Sin asignar
	149 a 182, 203 a 210	

Tabla 4. PRN asociados a la banda L1 para satélites de SBAS

El código utilizado en la banda L1 C/A es lo que se denomina un “código de oro”. Los códigos de oro tienen una longitud de $2^n - 1$ chips. En el caso de la banda que nos interesa, n es 10 bits, y la frecuencia de chip es de 1023 MHz. La generación de dicho código se basa en utilización de dos subsecuencias generadas mediante registros de desplazamiento con retroalimentación lineal (LSFR). Estos son esencialmente registros cuyo estado en un instante t depende del estado en el instante previo. En nuestro caso, al tener $n = 10$ bits, el polinomio generador a la salida del LSFR es de grado 10. Las subsecuencias de códigos de oro en GPS se denominan $G1$ y $G2i$ [18].

El factor determinante de cada código PRN es el retardo que se le atribuye a la subsecuencia $G2i$ (el subíndice “ i ” indica que la secuencia varía en función del código PRN correspondiente, mientras que $G1$ no varía). A la vez, la subsecuencia $G2i$ será inicializada de manera distinta para cada PRN. En la siguiente tabla, podemos ver como realmente la asignación PRN no es más que un número representante de una serie de factores determinantes para cada secuencia aparentemente aleatorios.

SBAS	PRN	Inicialización de la subsecuencia G2i	Primeros 10 chips de la secuencia total	Retardo de la subsecuencia G2i (chips)
EGNOS	121	1010100001	0101011110	175
	123	0010011010	1101100101	21
	126	1111110100	0000001011	886
	136	0111100000	1000011111	595
GAGAN	127	0111001111	1000110000	657
	128	1101011010	0010100101	634
	132	0101010000	1010101111	176
WAAS	131	0101101001	1010010110	1012
	133	1111011001	0000100110	603
	135	1010001110	0101110001	359
	138	0100101000	1011010111	386
BDSBAS	130	0011100001	1100011110	355
	143	1011001010	0100110101	307
	144	1000110000	0111001111	127
SDCM	125	1000111110	0111000001	235
	140	1110101011	0001010100	456
	141	1100001001	0011110110	499
MSAS	129	1010101000	0101010111	762
	137	1000000111	0111111000	68
SPAN	122	0010110111	1101001000	52
KASS	134	0111000110	1000111001	130
NSAS	147	0011101101	1100010010	118
ASAL	148	0011011101	0011011101	163

Tabla 5. Fragmentos de subsecuencias característicos para cada PRN

El hecho de que existan 210 secuencias construidas de esta manera supone ya un problema de interoperabilidad, ya que significa que hay un límite de satélites que pueden funcionar a esta frecuencia. Si bien hay todavía muchas asignaciones de PRN disponibles (Tabla 4), a muy largo plazo supone un reto de interoperabilidad con dos posibles soluciones: modificar la generación de códigos de oro para aumentar la cantidad de PRN disponibles o bien implementar los SBAS en bandas de frecuencia distintas, lo que empeoraría otros aspectos de la interoperabilidad.

2.2. Los mensajes interoperables de todos los SBAS: un ejemplo de EGNOS

Los requerimientos mínimos del mensaje vienen definidos en RTCA MOPS DO-229D [6] para aquellos sistemas de aumentación que usen la constelación GPS. En este apartado vamos a analizar el mensaje de EGNOS, teniendo en cuenta que es aplicable a otros SBAS con ciertos matices. Por ejemplo, el mensaje de WAAS es idéntico, con la excepción del uso de la matriz de covarianza reloj-efemérides como dato para controlar la degradación de la señal en distintas zonas de servicio.

Para facilitar la comprensión de todos los parámetros que se pueden transmitir en un mensaje de SBAS, propondremos un ejemplo de codificación de mensajes real. EGNOS permite acceder de manera pública a la información de los mensajes de sus satélites para cualquier instante de tiempo. Toda esta información se encuentra en un dominio de tipo File Transfer Protocol (FTP), bajo el servidor 131.176.49.48. Una vez accedido al servidor, tenemos acceso a la mayoría de los ficheros de datos de mensajes de navegación, desde 2018 hasta tres horas antes de la búsqueda del servidor aproximadamente.

Esto forma parte del EGNOS Data Access Service (EDAS), el cual ofrece un punto de acceso a los datos recibidos y generados de las RIMS y las NLES [19]. La disponibilidad de su servicio de FTP es aproximadamente del 98%, por lo que no siempre encontraremos los datos para la hora exacta deseada. Los ficheros de datos se estructuran en carpetas según el PRN, el año y el día del año. Existe un fichero de datos para cada hora en formato .ems (EGNOS Message Service). Cabe destacar que WAAS también dispone de un FTP de dominio público (consultable en el servidor ftp.nstb.tc.faa.gov). Estos ficheros tienen un formato binario, por lo que la manera de convertir el fichero a datos legibles será distinta.

En nuestro caso, vamos a seleccionar el fichero de datos del PRN 123 para la hora 00 del día 112 en el año 2021 (día 22 de abril de 2021). Explicaremos los distintos tipos de mensaje a partir de los conceptos mencionados en apartados anteriores, aunque también introduciremos conceptos nuevos. Los contenidos de los mensajes son visualizados mediante el programa SBAS MeNTOR, creado por la Agencia Espacial Europea con fines educativos.

2.2.1. Mensaje tipo 1: Máscara PRN

El mensaje tipo 1 contiene la máscara PRN seleccionada para el satélite que difunde las correcciones. Es necesario saber que los distintos tipos de mensajes se pueden relacionar gracias a un índice llamado IODP (Issue of Data PRN mask). Este índice permite asociar las correcciones a la máscara a la cual son aplicables y puede tomar valores enteros entre 0 y 3 (al tener dos bits asociados). La máscara PRN tiene también asociada un tiempo de aplicabilidad. En nuestro ejemplo, tenemos una máscara PRN que contiene los satélites GPS 1 a 32 (excluyendo el PRN 11, el cual es el único que figura bajo el estado de “desmantelado”; el resto se encuentra en estado saludable [20]) y el satélite de EGNOS con PRN de 136. El IODP de la máscara es 2 y el tiempo de aplicabilidad es de 0 horas desde el inicio del día.

Satellites in PRN mask

PRN mask 1 (W 2154, S 345600.0 - W 2154, S 428420)

GPS (Slot Numbers)					GLONASS (Slot Numbers)			Future GNSS								
1	9	17	25	33	1	9	17	62	70	78	86	94	102	110	118	
2	10	18	26	34	2	10	18	63	71	79	87	95	103	111	119	
3	11	19	27	35	3	11	19	64	72	80	88	96	104	112		
4	12	20	28	36	4	12	20	65	73	81	89	97	105	113		
5	13	21	29	37	5	13	21	66	74	82	90	98	106	114		
6	14	22	30		6	14	22	67	75	83	91	99	107	115		
7	15	23	31		7	15	23	68	76	84	92	100	108	116		
8	16	24	32		8	16	24	69	77	85	93	101	109	117		

GEO/WAAS PRN			FUTURE GNSS/GEO/WAAS/Pseudolites									
120	128	136	139	147	155	163	171	179	187	195	203	
121	129	137	140	148	156	164	172	180	188	196	204	
122	130	138	141	149	157	165	173	181	189	197	205	
123	131		142	150	158	166	174	182	190	198	206	
124	132		143	151	159	167	175	183	191	199	207	
125	133		144	152	160	168	176	184	192	200	208	
126	134		145	153	161	169	177	185	193	201	209	
127	135		146	154	162	170	178	186	194	202	210	

Select broadcasting SBAS
PRN 123

Clear

PRN masks

PRN mask 1

time interval
W 2154, S 345600
W 2154, S 428420

IODP 2

Add mask

Delete mask

Configure IODPs

Configure satellite parameters

Cancel

Ilustración 14. Contenido del mensaje tipo 1 en SBAS MeNTOR

El mensaje tipo 1 es inequívocamente interoperable con otros SBAS, puesto que da cabida a todos los PRN existentes y por asignar dentro de la banda de frecuencia utilizada actualmente. Es obvio que dos SBAS tendrán máscaras distintas, pero la estructura del mensaje binario que da lugar a la interpretación de la máscara sería la misma. En otras palabras, si EGNOS cambiase los PRN de sus satélites y los PRN de los GPS a los que otorga correcciones, la máscara PRN del mensaje tipo 1 se podría estructurar sin problema alguno. Además, la estructura facilita la posibilidad de ofrecer correcciones a satélites de GLONASS, por lo que SDCM podría basarse en correcciones de medidas de satélites de GLONASS sin tener que modificar la estructura del mensaje tipo 1.

2.2.2. Mensajes tipo 2 a 6 y tipo 24

Estos tipos de mensaje contienen información sobre el UDRE y las correcciones rápidas de cada uno de los satélites de la máscara. Cada tipo de mensaje sucesivo contiene la información de 13 satélites de la máscara, aunque en caso de que haya 6 o menos satélites de los 13 que puede contener uno de estos tipos de mensaje, los datos de dichos satélites se transmiten a través del mensaje 24. Por ejemplo, si la máscara PRN contiene 15 satélites, los datos de integridad de los 13 primeros se transmiten a través del mensaje tipo 2 y los datos de los satélites número 14 y 15 se transmiten a través del mensaje tipo 24. La máscara del día 22 de abril contiene 33 satélites (incluyendo PRN 123, que difunde las correcciones). Por ello, los mensajes de transmisión utilizados serán MT2, MT3 y MT4; mientras que MT5 y MT24 no son transmitidos. El mensaje

tipo 6 se utiliza para asociar la varianza de UDRE a los mensajes de transmisión 2 a 5 y 24. Esto permite actualizar las correcciones rápidas de manera poco frecuente, por lo que el mensaje tipo 6 se transmite muy esporádicamente durante un día.

Podemos observar tanto el índice de UDRE (con su respectiva media en metros y varianza en metros cuadrados) como las correcciones rápidas asociadas, en metros. Cabe destacar que se requiere un índice llamado IODF (Issue of Data Fast corrections), que asocie los datos contenidos en los tipos de mensajes del UDRE y el PRC con sus varianzas asociadas. Inicialmente, los MT2 y 3 tienen un IODF de 1, mientras que el MT4 tiene un IODF de 0.

IODP 2

Satellite	UDREI	UDRE [m]	σ_{UDRE}^2 [m ²]	PRC [m]	initial IODF
PRN 1	5 s	3.0	0.8315	0.750 s	1 ▼ ▲
PRN 2	5 s	3.0	0.8315	-0.625 s	
PRN 3	14 s	NM	NM	0.125 s	
PRN 4	5 s	3.0	0.8315	-0.500 s	
PRN 5	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 6	5 s	3.0	0.8315	-0.375 s	
PRN 7	5 s	3.0	0.8315	-1.375 s	
PRN 8	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 9	5 s	3.0	0.8315	-0.250 s	
PRN 10	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 12	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 13	14 s	NM	NM	0.000 s	

Ilustración 15. Contenido del mensaje tipo 2 en SBAS MeNTOR

IODP 2

Satellite	UDREI	UDRE [m]	σ_{UDRE}^2 [m ²]	PRC [m]	initial IODF
PRN 14	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 15	14 s	NM	NM	0.000 s	1 ▼ ▲
PRN 16	14 s	NM	NM	0.125 s	
PRN 17	5 s	3.0	0.8315	-0.250 s	
PRN 18	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 19	5 s	3.0	0.8315	0.375 s	
PRN 20	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 21	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 22	6 s	3.75	1.2992	-0.375 s	
PRN 23	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 24	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 25	14 s	NM	NM	0.625 s	

Ilustración 16. Contenido del mensaje tipo 3 en SBAS MeNTOR

IODP

Satellite	UDREI	UDRE [m]	σ_{UDRE}^2 [m ²]	PRC [m]	initial IODF
PRN 23	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 24	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 25	14 s	NM	NM	0.625 s	
PRN 26	5 s	3.0	0.8315	0.125 s	
PRN 27	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 28	14 s	NM	NM	0.000 s	0 ▾
PRN 29	14 s	NM	NM	-0.500 s	
PRN 30	5 s	3.0	0.8315	-1.500 s	
PRN 31	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 32	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 123	14 s	NM	NM	0.000 s	
PRN 136	14 s	NM	NM	0.000 s	

Ilustración 17. Contenido del mensaje tipo 4 en SBAS MeNTOR

Los valores mostrados en la ilustración anterior no son más que los valores iniciales del tiempo de aplicabilidad. Estos varían claramente durante la hora escogida, de manera que algunos satélites pasan del estado “no monitorizado” a un UDRE monitorizado, como podemos observar con la evolución del índice UDRE del PRN 01 a lo largo del día, que se muestra en la siguiente figura.

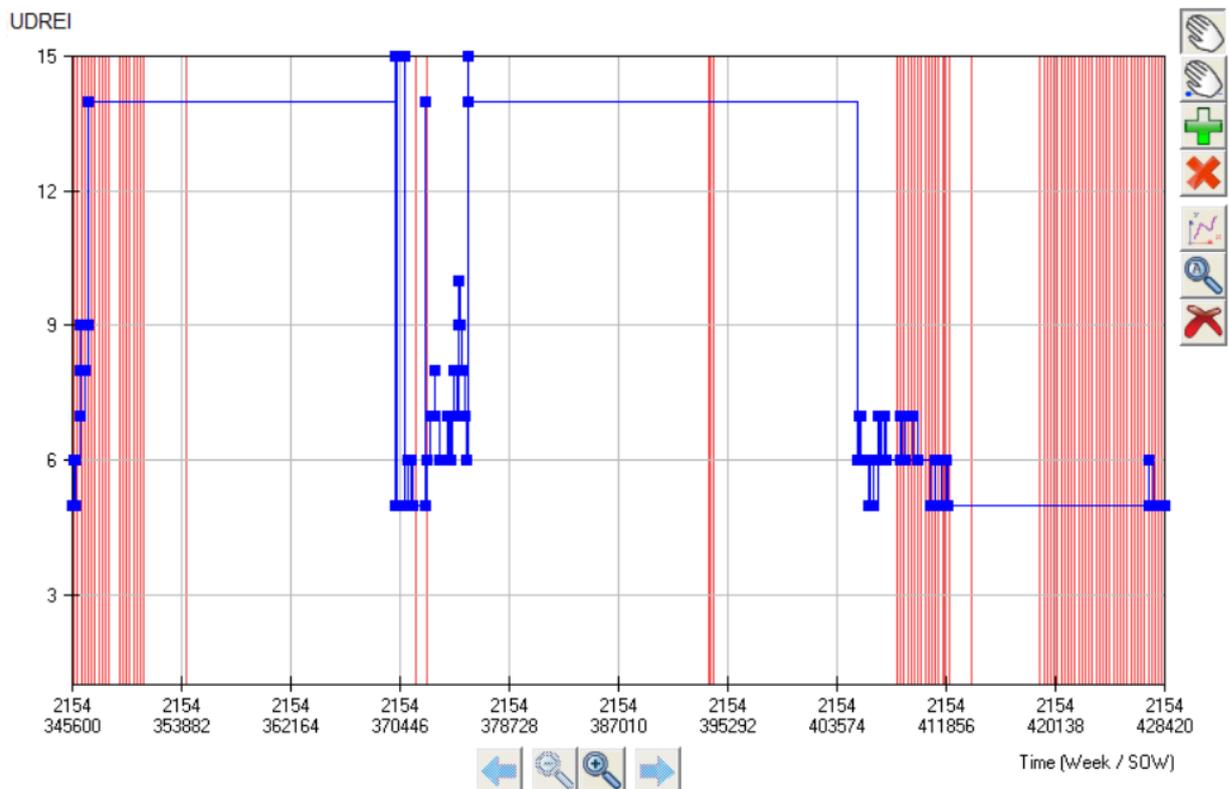


Ilustración 18. Evolución del UDREI a lo largo del día para PRN 01 en SBAS MeNTOR

Esta estructura de mensajes tiene un alto grado de interoperabilidad, puesto que cada SBAS tiene disponible todos estos tipos de mensaje y puede seleccionar los que tiene que transmitir en función del número de satélites dentro de la máscara PRN. Podemos determinar de manera universal un intervalo en el número de satélites dentro de la máscara PRN de cualquier SBAS sabiendo únicamente los tipos de mensaje transmitidos. En el ejemplo anterior, si no hubiésemos sabido los satélites de la máscara con antelación y supiésemos que se generan los mensajes tipo 2, 3 y 4, podríamos determinar que el número de satélites dentro de la máscara está entre 33 y 39 inclusive.

Además, la media y la varianza de la UDRE tienen asociado un índice universal y, sobre todo, la conversión de índice a valores nominales se realiza con unidades del sistema internacional para cualquier SBAS (la conversión para WAAS no se hace en pies, por ejemplo). De esta manera, cualquier SBAS sería capaz de determinar estos parámetros asociados a otros SBAS si conoce sus índices UDRE.

2.2.3. Mensaje tipo 7 y tipo 10

El mensaje tipo 7 corrige el desfase de tiempo entre los parámetros de integridad y sus correcciones asociadas. Para ello, el mensaje contiene un índice de factor de degradación de correcciones rápidas (abreviado a_i) y un tiempo de latencia del sistema (así como el IODP para asociar el mensaje con la máscara). A su vez, el a_i tiene asociado un factor de degradación de correcciones rápidas (a , en m/s^2), un intervalo de suspensión de tiempo (I_{fc}) y un intervalo máximo de actualización de correcciones rápidas. En la tabla 6, observamos la correspondencia entre el índice mencionado y sus parámetros asociados.

El parámetro de degradación de correcciones rápidas (ϵ_{fc}) se computa a partir de estos valores y se aplica junto con otros parámetros de degradación y de UDRE para obtener el error residual de correcciones total. Entre estos parámetros de degradación se encuentran el factor de degradación de tasa de rango, el de correcciones lentas y el de cruce por medio de LNAV.

Los parámetros necesarios para calcular estas correcciones se encuentran en el mensaje tipo 10, el cual no vamos a comentar en detalle debido a la complejidad y exhaustividad de los desarrollos matemáticos necesarios. Sin embargo, estos están ampliamente detallados en el documento RTCA MOPS DO-229D [6], por lo que se puede consultar la función de cada uno de los parámetros contenidos en el mensaje tipo 10 para sus factores de degradación y residuales asociados. Cabe destacar que un bit del mensaje tipo 10 (el bit denominado “ RSS_{UDRE} ”) determina si el modelo para calcular el error residual de correcciones total se basa en el cuadrado de la suma de la desviación típica de la UDRE y los factores de degradación (en ese caso $RSS_{UDRE}=0$) o bien en la suma del cuadrado de la desviación típica de la UDRE y el cuadrado de cada factor de degradación (en ese caso $RSS_{UDRE}=1$). El error residual ionosférico sigue este mismo procedimiento con el bit “ RSS_{iono} ”. A continuación, mostramos la información del mensaje tipo 10 para el instante inicial de la hora 0 de nuestro ejemplo. Vemos como los modelos utilizados para el cálculo de los errores residuales de corrección son los que tienen asociado el bit $RSS_{UDRE}=0$ y $RSS_{iono}=0$.

Indicador ai	Factor de degradación a	Intervalo de suspensión I_{fc} NPA (s)	Intervalo de suspensión I_{fc} PA (s)	Intervalo de actualización (s)
0	0	180	120	60
1	0.00005	180	120	60
2	0.00009	153	102	51
3	0.00012	135	90	45
4	0.00015	135	90	45
5	0.0002	117	78	39
6	0.0003	99	66	33
7	0.00045	81	54	27
8	0.0006	63	42	21
9	0.0009	45	30	15
10	0.0015	45	30	15
11	0.0021	27	18	9
12	0.0027	27	18	9
13	0.0033	27	18	9
14	0.0046	18	12	6
15	0.0058	18	12	6

Tabla 6. Asociaciones de los parámetros del mensaje tipo 7 con el indicador *ai*

MT 10 value settings

B_{rrc} [m]	0.000 s	I_{geo} [s]	120 s
C_{itc_lsb} [m]	0.358 s	C_{er} [m]	0.0 s
C_{itc_v1} [m/s]	0.00780 s	C_{iono_step} [m]	0.657 s
I_{itc_v1} [s]	120 s	I_{iono} [s]	300 s
C_{itc_v0} [m]	0.958 s	C_{iono_ramp} [m/s]	0.000000 s
I_{itc_v0} [s]	120 s	$C_{covariance}$	0.0 s
C_{geo_lsb} [m]	0.1770 s	RSS_{UDRE}	0 s
C_{geo_v} [m/s]	0.02000 s	RSS_{iono}	0 s

Ilustración 19. Contenido del mensaje tipo 10 en SBAS MeNTOR

De nuevo, estos mensajes son interoperables con otros SBAS, puesto que hacen uso de un indicador “ai” universal con valores nominales asociados, y las unidades de los parámetros son unidades del sistema internacional. Además, se puede seleccionar un modelo de cálculo del error residual de correcciones total utilizado por otro SBAS sin afectar a la estructura del mensaje.

2.2.4. Mensaje tipo 9 y tipo 17

El mensaje tipo 9 contiene la posición, velocidad y aceleración del satélite en coordenadas ECEF, así como parámetros asociados con la deriva del reloj del satélite (a_{Gf0} y a_{Gf1}), el tiempo de aplicabilidad (t_0) y un índice de precisión (URA o “User Range Accuracy”). Este índice está realmente asociado a la integridad de la señal de rango del satélite, de manera que la señal será menos fiable cuanto mas alto sea el URA. A continuación, podemos ver la asociación entre los índices URA y sus respectivos márgenes de error en metros.

Índice URA	Valor de URA asociado (m)
0	2
1	2.8
2	4
3	5.7
4	8
5	11.3
6	16
7	32
8	64
9	128
10	256
11	512
12	1024
13	2048
14	4096
15	No utilizar

Tabla 7. Asociación del índice URA con su valor nominal asociado

En el ejemplo que desarrollamos, el índice URA permanece en 15 durante toda la hora, como vemos en la siguiente ilustración para el instante inicial.

MT 9 value settings

IOD/spare	<input type="text" value="18"/> s	X _G Rate of Change [m/s]	<input type="text" value="0.000000"/> s
t ₀ [s]	<input type="text" value="0"/> s	Y _G Rate of Change [m/s]	<input type="text" value="0.000000"/> s
accuracy URA	<input type="text" value="15"/> s	Z _G Rate of Change [m/s]	<input type="text" value="0.000"/> s
X _G (ECEF) [m]	<input type="text" value="35944600.00"/> s	X _G Acceleration [m/s ²]	<input type="text" value="0.0000000"/> s
Y _G (ECEF) [m]	<input type="text" value="22044140.00"/> s	Y _G Acceleration [m/s ²]	<input type="text" value="0.0000000"/> s
Z _G (ECEF) [m]	<input type="text" value="0.0"/> s	Z _G Acceleration [m/s ²]	<input type="text" value="0.0000000"/> s
a _{Gf0} [s]	<input type="text" value="0"/> s		
a _{Gf1} [s/s]	<input type="text" value="0"/> s		

Ilustración 20. Contenido del mensaje tipo 9 en SBAS MeNTOR

En cuanto al mensaje tipo 17, nos permite obtener información sobre la posición, la velocidad y el estado del servicio de los satélites del SBAS asociado al satélite en cuestión. La posición y la velocidad se traducen en coordenadas ECEF, mientras que el estado del servicio se traduce en información binaria sobre varios tipos de servicio en un total de 8 bits.

- El bit 0 (el bit menos significativo) indica si el satélite es capaz de proporcionar servicios de rango de usuario;
- El bit 1 indica si el satélite es capaz de proporcionar servicios de corrección de medidas al usuario;
- El bit 2 indica si el satélite es capaz de proporcionar servicios de monitorización de la integridad de sus datos;
- El bit 3 está reservado en su uso por el momento;
- Los bits 4 a 8 proporcionan un identificador asociado al proveedor de servicios del satélite en cuestión. Aunque ciertos SBAS no estén todavía plenamente desarrollados, la mayoría de ellos ya tienen un identificador asociado a este mensaje, como podemos constatar en la siguiente tabla [21]. Además, es fácil darse cuenta de que la asignación está hecha temporalmente en función del inicio del desarrollo de cada SBAS, desde el SBAS más temprano hasta el más actual.

Curiosamente, un valor de bit 1 corresponde a la indisponibilidad del servicio, mientras que un valor de 0 significa que el satélite es capaz de proveer el servicio.

ID	Proveedor de servicios SBAS
0	WAAS
1	EGNOS
2	MSAS
3	GAGAN
4	SDCM
5	BDSBAS
6	KASS
7	A-SBAS
8	AUSBAS
9 a 13	Sin asignar
14 a 15	Reservado

Ilustración 21. Identificador asociado a cada SBAS

En el ejemplo desarrollado, para este mensaje encontramos lógicamente los otros dos satélites pertenecientes a EGNOS o ID 1 (PRN 123 y PRN 136, el PRN 126 está en modo test y por lo tanto no es referenciado en ninguno de los mensajes). El bit 0 indica que los satélites no son capaces de estimar rangos del usuario, lo cual está estrechamente relacionado con el valor de URA de 15 para el satélite PRN 123. Los satélites de SBAS ofrecen exclusivamente servicios de corrección sobre medidas realizadas con sus respectivos niveles de integridad, por lo que solo los bits 1 y 2 toman el valor 0. La información completa del mensaje para el instante inicial de la hora 0 se

muestra a continuación, aunque todos los parámetros (salvo el tiempo de aplicabilidad) se mantienen constantes a lo largo de la hora.

t_0 (Time of Day) [s] s

Service Provider	X_G [m]	Y_G [m]	Z_G [m]
Satellite	X_G ROC [m/s]	Y_G ROC [m/s]	Z_G ROC [m/s]
Ranging	Corrections	Broadcast Integrity	Reserved
PRN 123	35945000 s	22045400 s	0 s
	0 s	0 s	0 s
	On s	On s	On s
PRN 136	42003000 s	3673800 s	0 s
	0 s	0 s	0 s
	On s	On s	On s

Ilustración 22. Contenido del mensaje tipo 17 en SBAS MeNTOR

Estos mensajes relacionados con las efemérides son interoperables con otros SBAS por la universalización de los parámetros utilizados, del sistema de coordenadas utilizado (ECEF) y de las unidades utilizadas. Sin embargo, el mensaje tipo 17 tiene un grado de interoperabilidad aún mayor, puesto que tiene una variable asociada al proveedor de servicios SBAS que cambiará de un SBAS a otro. Además, los SBAS que no están todavía en estado de operación óptimo ya tienen un valor del identificador asociado, por lo que no solo se considera la interoperabilidad actual, sino también la futura.

2.2.5. Mensaje tipo 12

Este tipo de mensaje está básicamente relacionado con desviaciones entre tiempos de referencia y tiempos de reloj. La diferencia de tiempos es notablemente importante en el cómputo de correcciones, por lo que los cálculos de desviación de tiempos requieren una abundancia de parámetros. Gracias a los parámetros de este mensaje, podemos calcular la deriva entre el tiempo de la red SBAS y el tiempo UTC, para establecer una relación entre ambos de la siguiente manera:

$$t_{UTC} = t_{SBAS,Estim} - \Delta t_{UTC} ,$$

donde t_{UTC} es el tiempo UTC, Δt_{UTC} es la deriva de tiempo y $t_{SBAS,Estim}$ es el tiempo de la red SBAS estimado tras la aplicación de una corrección polinomial relacionada con el tiempo de

referencia de reloj y la corrección de efectos relativistas a partir de parámetros orbitales. Para ello, el cálculo de la deriva de tiempo se puede computar de la siguiente manera:

$$\Delta t_{UTC} = \Delta t_{LS} + A_{0WNT} + A_{1WNT} * (t_{SBAS,Estim} - t_{0t} - 604800 * (WN - WN_t)),$$

donde A_{0WNT} y A_{1WNT} son términos polinómicos de grado 0 y 1 respectivamente, referentes al bias de las escalas de tiempo, t_{0t} es el tiempo de referencia para datos UTC (el cual se actualiza aproximadamente 20 veces al día), WN es el número de la semana actual y WN_t es el número de la semana de referencia UTC.

En cuanto a Δt_{LS} , es la desviación de tiempo total a lo largo de los años debida a eventos de segundos intercalares [22]. Estos eventos son ajustes de un segundo realizados para compensar las diferencias de precisión entre los relojes satelitales y el tiempo UTC. Son eventos que se producen muy infrecuentemente (hasta ahora se han producido un total de 18 eventos de segundo intercalar totales) pero son curiosos ya que, el día en el que se realizan, los relojes llegan a marcar las 23 horas, 59 minutos y 60 segundos antes de avanzar de día. De hecho, encontraremos en la información del mensaje tipo 12 el parámetro Δt_{LSF} , que sirve para hacer la transición de tiempos en un evento de segundo intercalar. De esta manera, si Δt_{LSF} y Δt_{LS} difieren, la diferencia entre ellos se añadiría a la deriva de tiempo. Además, en caso de evento de segundo intercalar, el parámetro WN_{LSF} indica la semana en la que se vuelve efectivo y DN es el día de la semana al final del cual se aplica el segundo intercalar.

Aparte, es necesaria una correlación entre los parámetros de la deriva de tiempo y el tipo de tiempo UTC sobre el que vamos a estimar la deriva, ya que no hay un único tiempo UTC universal. A continuación, se muestran los distintos tiempos UTC con sus identificadores asociados.

Identificador UTC	Estándar de operador UTC
0	Estándar del Laboratorio de Investigación en Comunicaciones (CRL, Tokio, Japón)
1	Estándar del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, Maryland, EEUU)
2	Estándar del Observatorio Naval de los Estados Unidos (USNO, Washington DC, EEUU)
3	Estándar de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, Saint-Cloud, Francia)
4	Estándar de laboratorio europeo sin determinar
5	Estándar del Centro de Servicio Nacional del Tiempo (NTSC, Shaanxi, China)
6	Reservado
7	Sin operador

Tabla 8. Identificador asociado a cada estándar UTC

En la ilustración 23, podemos constatar los parámetros del mensaje tipo 12 descritos para el instante inicial de la hora 0 del 22 de abril. Para simplificar el cálculo sin perder mucha precisión, si consideramos que el tiempo de SBAS estimado es igual al tiempo GPS de la semana (es decir,

consideramos que sus correcciones polinomiales y relativistas asociadas están ya incluidas) podemos estimar la deriva de tiempo para ese instante:

$$\Delta t_{UTC} = \Delta t_{LS} + A_{0WNT} + A_{1WNT} * (t_{SBAS,Estim} - t_{0t} - 604800 * (WN - WN_t))$$

$$\Delta t_{UTC} = 18 + 1.3 * 10^{-8} + 1.42109 * 10^{-13} * (345776 - 344064 - 604800 * (106 - 106))$$

$$\Delta t_{UTC} = 18.00000001 \text{ s}$$

MT 12 value settings			
A _{1WNT} [s/s]	1.42109e-13 s	DN [days]	7 s
A _{0WNT} [s]	0.000000013 s	Δt _{LSF} [s]	18 s
t _{0t} [s]	344064 s	UTC Standard Id.	3 s
WN _t [wk]	106 s	GPS Time of Week [s]	345776 s
Δt _{LS} [s]	18 s	GPS Week Number [wk]	106 s
WN _{LSF} [wk]	137 s	GLONASS Ind.	0 s

Ilustración 23. Contenido del mensaje tipo 12 en SBAS MeNTOR

Nos apercibimos también de la existencia de un indicador GLONASS, que especifica si se proporciona una corrección del tiempo de referencia GLONASS (en este caso, el indicador marca que no se facilitan estas correcciones). De hecho, el código del mensaje tipo 12 cuenta con 74 bits reservados para la implementación de las correcciones del tiempo asociado a GLONASS.

El mensaje tipo 12 está diseñado claramente con la intención de que sea interoperable entre los distintos SBAS. Sobre todo, el identificador asociado al estándar UTC permite asociar distintos estándares sin afectar la estructura del mensaje. Por ejemplo, sabemos que EGNOS utiliza el estándar de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (por lo que tenemos un ID de 3), mientras que WAAS utiliza el estándar del Observatorio Naval de los Estados Unidos (por lo que tenemos un ID de 2). El estándar es distinto, pero la estructura del mensaje se adapta al cambio. Además, existe la posibilidad de implementar un tiempo de referencia de GLONASS, lo cual sería prometedor para SDCM y seguiría permitiendo una estructura universal del mensaje tipo 12.

2.2.6. Mensaje tipo 27

El mensaje tipo 27 contiene la información sobre la variable δUDRE. Esta variable es un factor multiplicativo aplicado a la varianza de las correcciones rápidas y lentas, de manera que una δUDRE superior a la unidad aumenta la varianza y significa que tenemos mayor incertidumbre en las estimaciones de UDRE. La manera de definir este parámetro son coordenadas que delimitan regiones. De esta manera, podemos indicar la δUDRE aplicable dentro de cada región y la que se aplica fuera de cada una. Esencialmente, la δUDRE fuera de la zona de servicio del SBAS será la máxima posible y la δUDRE dentro de ella estará en torno a la unidad. Hay opción de definir varias regiones con geometría triangular o cuadrada, aunque como podemos ver, en

nuestro ejemplo solo se define una región cuadrada con $\delta UDRE$ unitaria en su interior y máxima en su exterior.

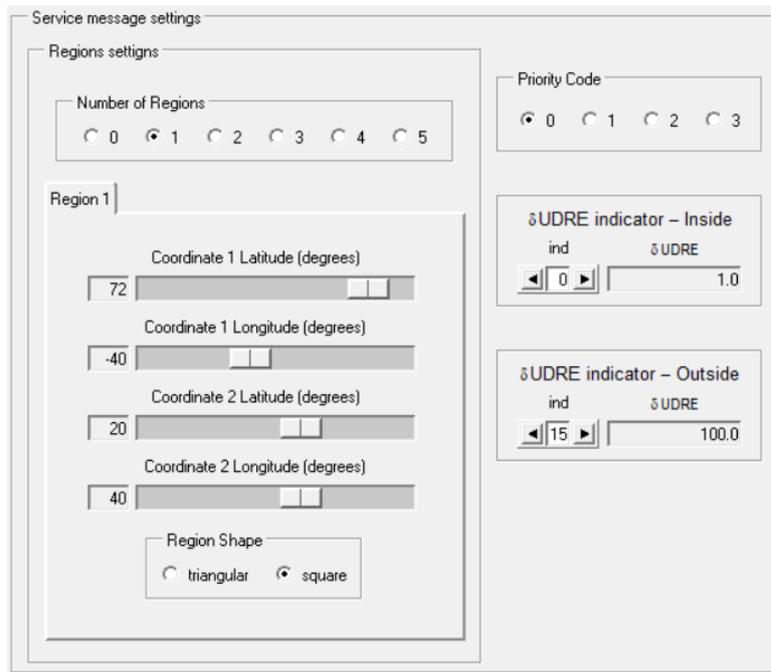


Ilustración 24. Contenido del mensaje tipo 27 en SBAS MeNTOR

La $\delta UDRE$ se define por medio de un indicador que toma valores de 0 a 15 en función del valor creciente de $\delta UDRE$ asociado. Las asociaciones entre el indicador y los valores nominales se muestran en la siguiente tabla:

Indicador de $\delta UDRE$	$\delta UDRE$ (adimensional)
0	1
1	1.1
2	1.25
3	1.5
4	2
5	3
6	4
7	5
8	6
9	8
10	10
11	20
12	30
13	40
14	50
15	100

Tabla 9. Asociación del indicador $\delta UDRE$ y su valor nominal respectivo

En cuanto a la región definida, podemos visualizarla fácilmente mediante Google Earth con la ayuda de un script sencillo desarrollado en MATLAB. Al ser una región cuadrada, la coordenada 3 tiene la misma latitud que la coordenada 1 y la misma longitud que la coordenada 2, mientras que la coordenada 4 tiene la misma latitud que la coordenada 2 y la misma longitud que la coordenada 1. El script utilizado para visualizar la región junto con las funciones requeridas para convertir coordenadas y convertir los atributos a formato kml se encuentra en el anexo F. El resultado de la ejecución del script principal se muestra en la siguiente figura.

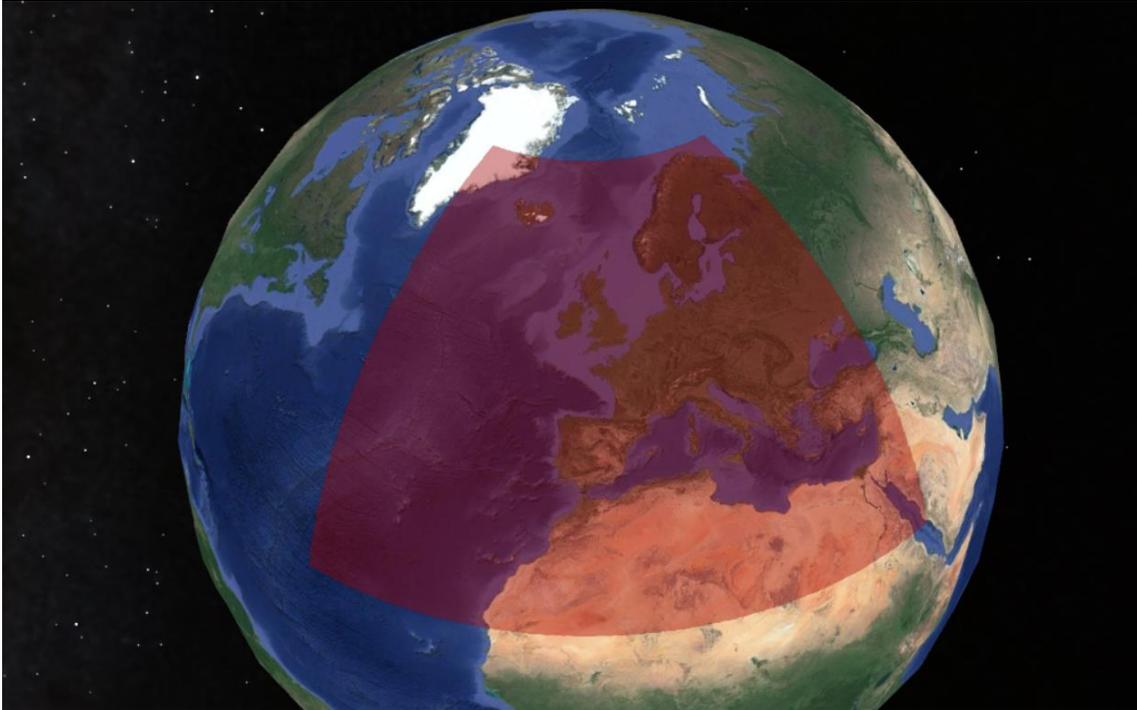


Ilustración 25. Visualización del contenido del mensaje tipo 27 en Google Earth

Vemos que la región definida es básicamente la zona de servicio de EGNOS, por lo que es lógico que más allá de la región, la varianza se multiplique por un factor de 100 al no poder facilitar las correcciones necesarias. La información de este mensaje no cambiará prácticamente nunca, aunque seguirá siendo transmitido continuamente.

De nuevo, este tipo de mensaje se puede aplicar a cualquier SBAS, puesto que se pueden definir varias regiones con dos coordenadas de referencia que escojamos y se aplica un indicador universal al factor multiplicativo de la varianza de UDRE. Esto significa que, si nuestra zona de operación no se puede definir exactamente como un cuadrado o un triángulo, podemos crear combinaciones de regiones adyacentes de distintas dimensiones que se asemejen mejor a la zona de operación del SBAS (MSAS podría ser un ejemplo de esto ya que su zona de operación no se parece a cualquiera de las dos formas geométricas disponibles en la definición de regiones). Además, si determinamos que una región tiene estimaciones de UDRE de peor calidad en algún instante, se puede definir dicha región en el UDRE y aplicar un factor mayor; todo ello sin variar en absoluto la estructura del mensaje tipo 27, únicamente su contenido.

2.2.7. Mensaje tipo 25

El mensaje tipo 25 es notablemente importante, ya que contiene la información relacionada con las correcciones lentas de los satélites que se encuentran en la máscara PRN. Sin embargo, cabe destacar que las correcciones lentas aplicables a los satélites geoestacionarios del SBAS no son suministradas en este mensaje. Las correcciones de posición en los tres ejes del sistema ECEF son suministradas por las variables δx , δy y δz , mientras que sus tasas de cambio son proporcionadas por δx_{ROC} , δy_{ROC} y δz_{ROC} (“Rate Of Change”). La corrección del reloj del satélite y la corrección de su tasa de cambio se encuentran bajo los parámetros δa_{f0} y δa_{f1} . Por último, t_0 es el tiempo de aplicabilidad de las correcciones (accesible en otros mensajes como el mensaje tipo 9) y IODE es un parámetro que relaciona las correcciones del satélite con los datos de efemérides transmitidos por ese satélite para cada instante. De esta manera, podemos deducir las estimaciones del error de posición en cada coordenada δx_k , δy_k y δz_k y la estimación del error del reloj $\delta \Delta t_{SV}$ (δa_{GF0} se encuentra en el mensaje tipo 9):

$$\delta x_k = \delta x + \delta x_{ROC} * (t - t_0)$$

$$\delta y_k = \delta y + \delta y_{ROC} * (t - t_0)$$

$$\delta z_k = \delta z + \delta z_{ROC} * (t - t_0)$$

$$\delta \Delta t_{SV} = \delta a_{f0} + \delta a_{f1} * (t - t_0) + \delta a_{GF0}$$

Si las correcciones se aplican instantáneamente, requerirían solamente los parámetros δx , δy , δz , δa_{f0} y δa_{GF0} . A continuación, se muestran los valores de los parámetros para el instante inicial de la hora 0 y para los cuatro primeros satélites de la máscara. PRN 3 no está siendo monitorizado en ese instante.

Satellite	δx [m]	δy [m]	δz [m]	δa_{f0} [s]	IODE
	δx_{ROC} [m]	δy_{ROC} [m]	δz_{ROC} [m]	δa_{f1} [s]	t_0 [s]
PRN 1	-0.875 s	0.125 s	-0.500 s	4.657e-10 s	46 s
	NA s	NA s	NA s	NA s	NA s
PRN 2	2.000 s	-0.500 s	-0.500 s	0 s	82 s
	NA s	NA s	NA s	NA s	NA s
PRN 3	NA s	NA s	NA s	NA s	NA s
	NA s	NA s	NA s	NA s	NA s
PRN 4	-0.625 s	-0.875 s	0.500 s	1.863e-9 s	80 s
	NA s	NA s	NA s	NA s	NA s

Ilustración 26. Contenido del mensaje tipo 25 en SBAS MeNTOR

Está claro que este mensaje es aplicable a cualquier SBAS mientras que tenga una máscara PRN definida y un tiempo de reloj conocido sobre el que aplicar las correcciones.

2.2.8. Mensajes tipo 18 y tipo 26

La única información adicional que necesitamos, una vez hemos interpretado los mensajes anteriores, es la información relacionada con las correcciones ionosféricas. En primer lugar, el mensaje tipo 18 contiene una máscara con la información de la localización de todos los IGP que forman la red ionosférica utilizada por EGNOS. El mensaje contiene, para cada banda del mapa global de IGP predefinido estudiado anteriormente, un valor binario asociado a la inclusión o exclusión de cada punto de la máscara de IGP. El orden de bits asociados a cada IGP empieza desde el sudoeste y progresa de sur a norte a lo largo de cada columna de IGP. De igual manera, una vez llegamos al límite norte de cada columna, regresamos al Sur de la columna adyacente desde el este y repetimos el proceso hasta que todos los bits de la banda están definidos correctamente.

A continuación, podemos visualizar el resultado de la operación anterior, lo que indica la red de IGP utilizada para EGNOS durante ese día. Vemos como no tenemos, dentro de este mensaje, ninguna información sobre correcciones ionosféricas de ningún tipo, sino que hemos definido los puntos sobre los cuales se aplicarán las correcciones.

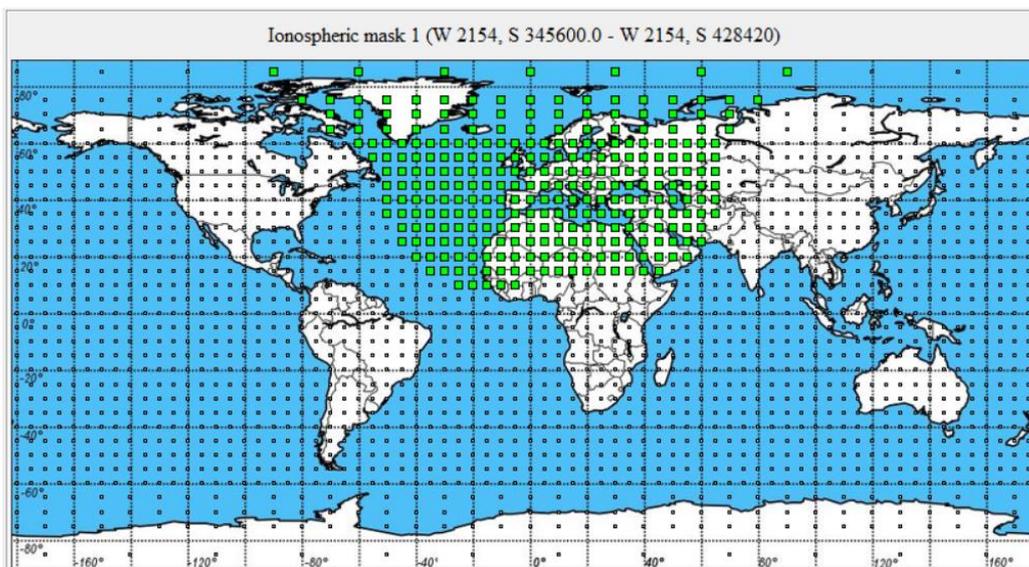


Ilustración 27. Máscara de IGP contenida en el mensaje tipo 18 en SBAS MeNTOR

Una vez definimos la máscara con la localización de los IGP de cada banda, el mensaje tipo 26 asocia la información de las correcciones ionosféricas a cada punto. La asociación se realiza mediante bloques que designan grupos de 15 IGP de la máscara dentro de la banda seleccionada. Así pues, tendremos que identificar el número de banda, el número de bloque y el IGP dentro del bloque, todo con sus bits respectivos.

Cada designación tiene un valor correspondiente a dos parámetros significativos: el error de retardo vertical provocado por la ionosfera (el cual puede tomar valores espaciados de 0.125 m entre sí, hasta un valor máximo de 63.750 m) y un indicador de GIVE que tiene asociado una media y una varianza del GIVE, tal y como muestra la siguiente tabla.

Indicador GIVE	Media GIVE (m)	Varianza GIVE (m ²)
0	0.3	0.0084
1	0.6	0.0333
2	0.9	0.0749
3	1.2	0.1331
4	1.5	0.2079
5	1.8	0.2994
6	2.1	0.4075
7	2.4	0.5322
8	2.7	0.6735
9	3	0.8315
10	3.6	1.1974
11	4.5	1.8709
12	6	3.326
13	15	20.787
14	45	187.0826
15	No monitorizada	No monitorizada

Tabla 10. Asociación del indicador de GIVE y sus parámetros estadísticos respectivos

A continuación, podemos visualizar la distribución de retardos verticales en el instante inicial y final del día 22 de abril. Vemos como la disponibilidad de los valores del retardo va variando a lo largo del día. Además, hay ligeras diferencias de retardos de un punto a otro pese a aparentar tener el mismo color, debido a la escala utilizada.

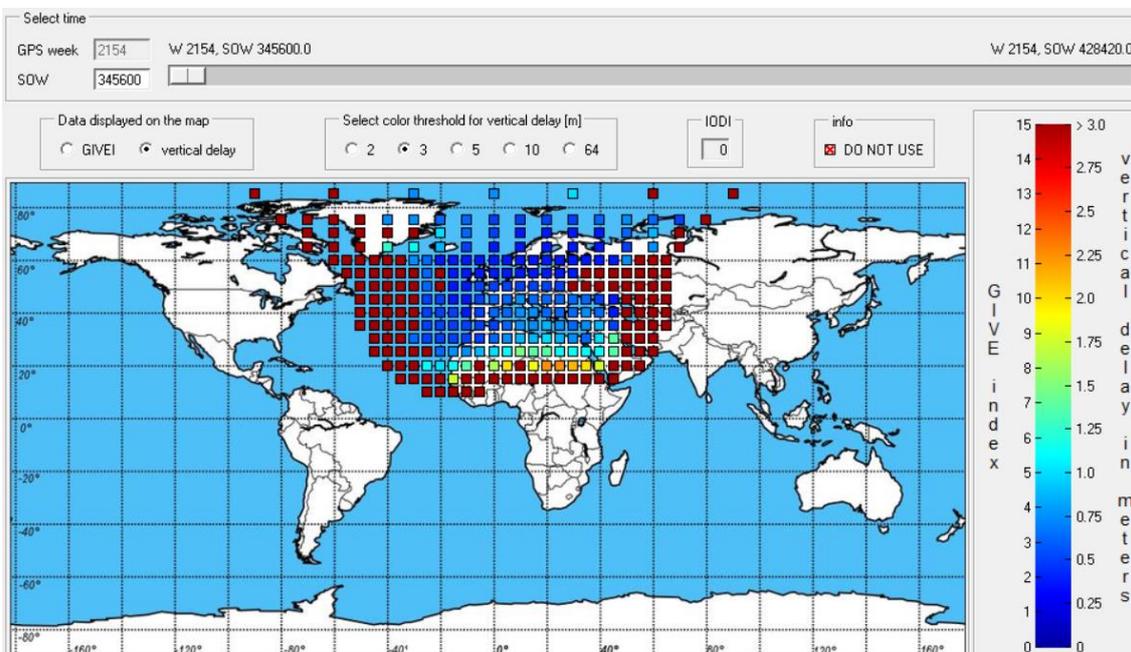


Ilustración 28. Retardo vertical contenido en el mensaje tipo 26 para el inicio del día en SBAS MeNTOR

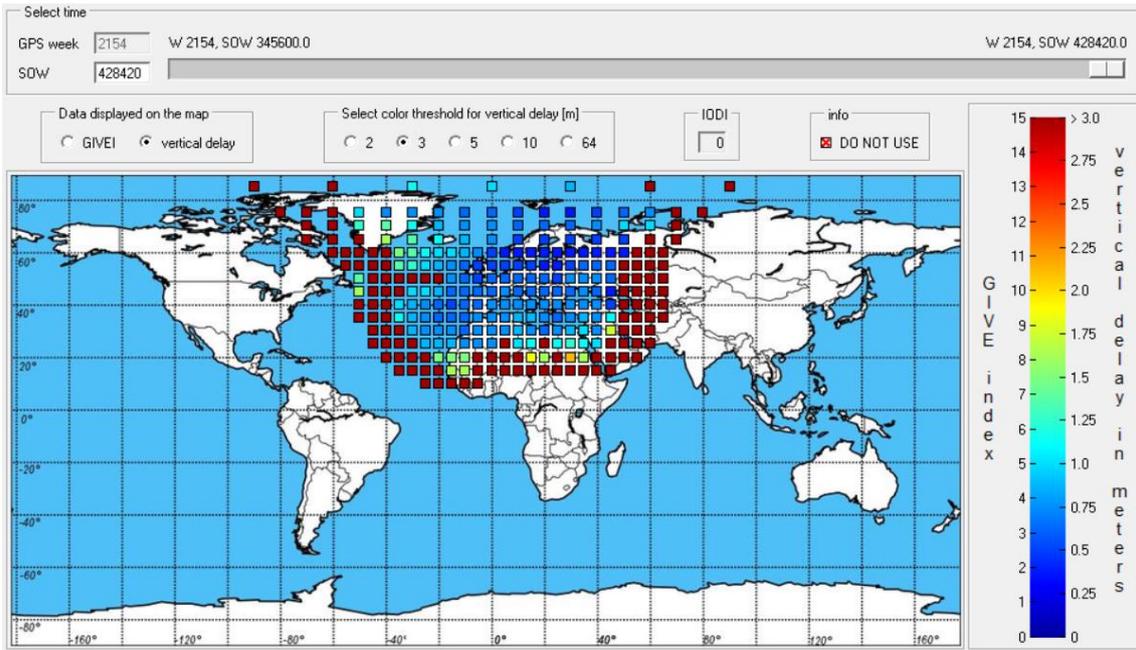


Ilustración 29. Retardo vertical contenido en el mensaje tipo 26 para el final del día en SBAS MeNTOR

En cuanto al indicador de GIVE, se puede visualizar más claramente, y podemos observar las variaciones a lo largo del día al tratarse de valores enteros entre 0 y 15.

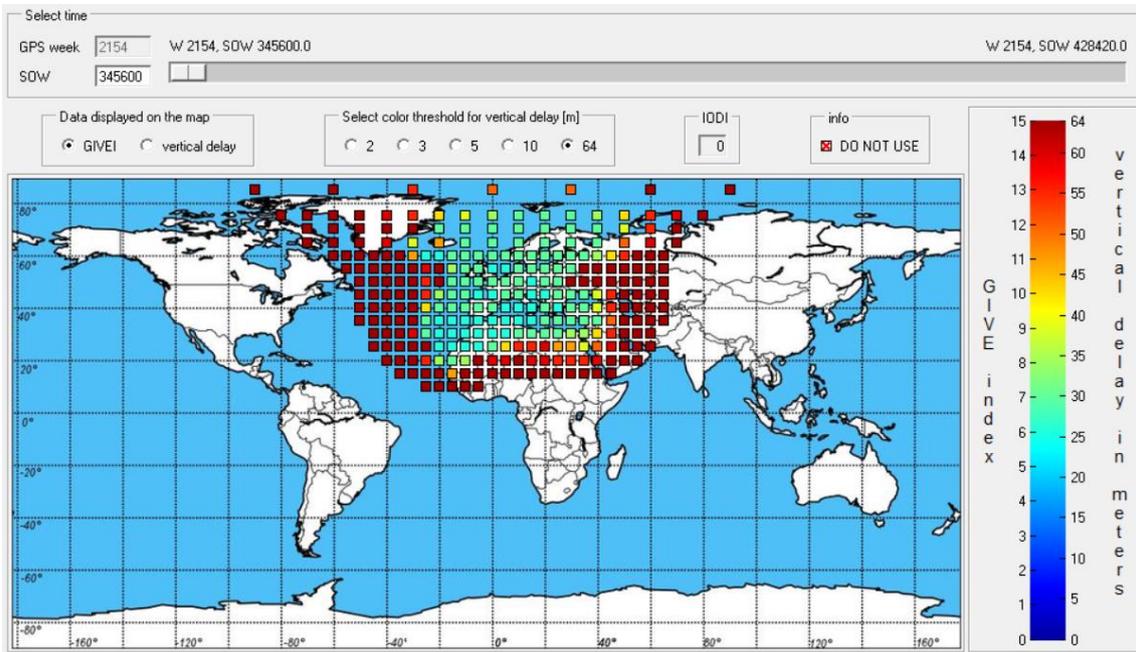


Ilustración 30. GIVE contenido en el mensaje tipo 26 para el inicio del día en SBAS MeNTOR

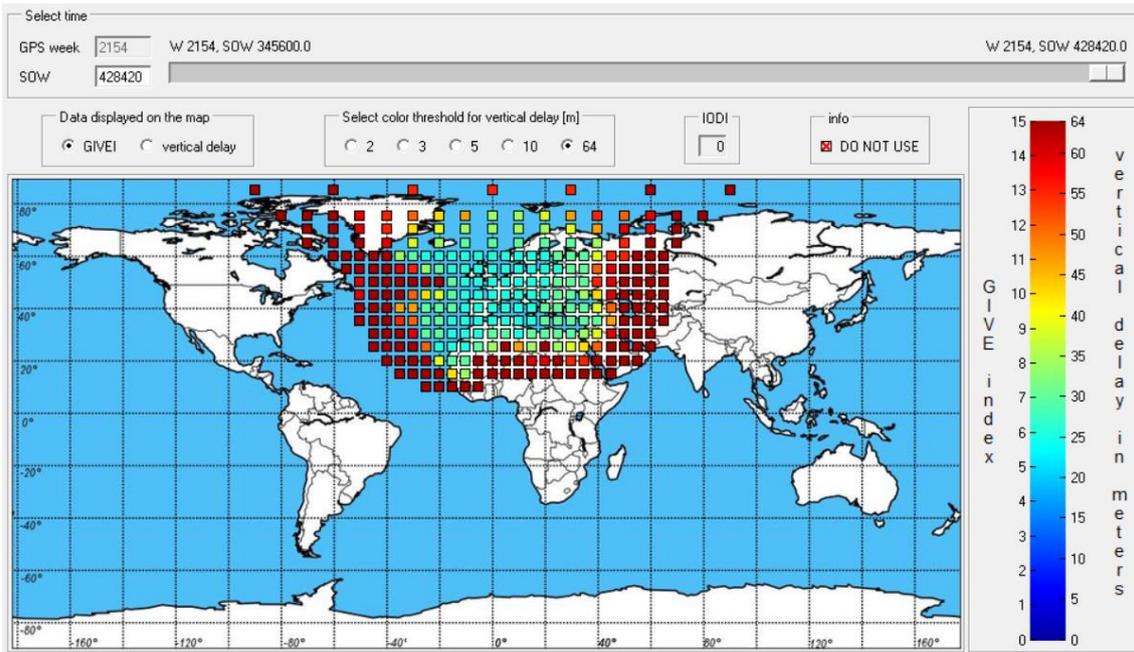


Ilustración 31. GIVE contenido en el mensaje tipo 26 para el final del día en SBAS MeNTOR

Ambos tipos de mensaje tienen un alto grado de interoperabilidad. En primer lugar, el mensaje tipo 18 permite incluir cualquier IGP del mapa mundial predefinido que deseemos en la máscara. Todos los IGP mundiales pueden ser seleccionados para cualquier SBAS, por lo que la lectura de este mensaje se produce de la misma manera para SBAS distintos, siempre y cuando sepamos asociar el contenido del mensaje con los IGP definidos físicamente mediante el procedimiento sur-norte explicado previamente.

Por otro lado, la información del mensaje tipo 26 se divide en dos parámetros que se asignan a cada IGP de la máscara por lo que, al haber interoperabilidad en la definición de la red de IGP de la máscara, hay interoperabilidad en la asignación de los parámetros por medio de las bandas y los bloques citados. Además, el índice de GIVE hace referencia a las mismas medias y varianzas para todos los SBAS, cuyas unidades son internacionales junto con las unidades del retardo vertical.

2.3. El conjunto de mensajes transmitidos y la carga del ancho de banda

Como último detalle, es interesante observar la continuidad y el tipo de los mensajes transmitidos, así como el porcentaje de ancho de banda que ocupan. La información de la continuidad de los mensajes transmitidos por EGNOS no se puede consultar históricamente, por lo que no podemos acceder al gráfico de transmisión de mensajes del día 22 de abril. Sin embargo, el único mensaje cuya transmisión no se producirá de la misma manera que el día 22 de abril es el mensaje tipo 6, ya que se transmite esporádicamente. El resto de los mensajes se transmiten continuamente por lo que, en ese aspecto, la gráfica del día 9 de mayo que se muestra en la siguiente ilustración [23] se puede superponer al del día 22 de abril.

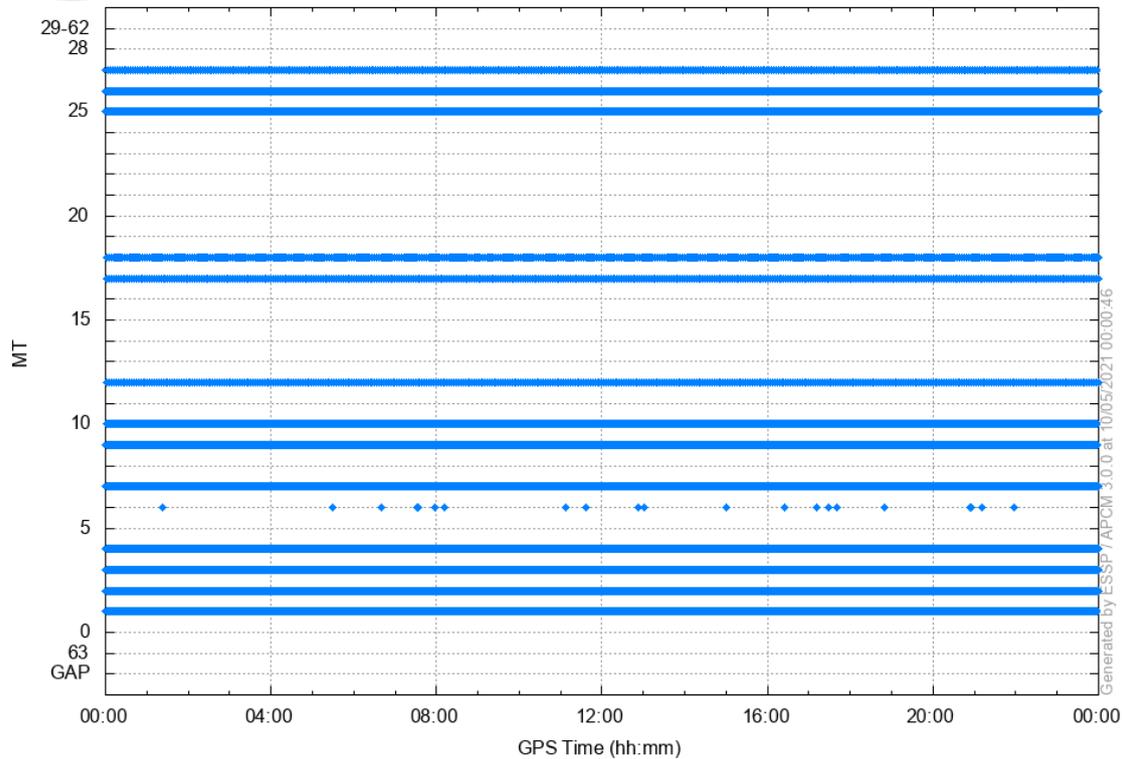


Ilustración 32. Tiempos de transmisión de cada tipo de mensaje el 9 de mayo de 2021

Vemos como los mensajes transmitidos son exactamente los que hemos citado a lo largo de este apartado, incluyendo la predicción de transmisión de los mensajes tipo 2, 3 y 4 y la supresión de los mensajes tipo 5 y 24 según el número de satélites de la máscara. Sin embargo, es interesante analizar la carga que suponen los mensajes en el ancho de banda, ya que esta información es accesible históricamente. En la ilustración 33, se muestra la carga del ancho de banda en función del tiempo durante el día 22 de abril para cada tipo de mensaje.

Podemos constatar que el 75% del ancho de banda es ocupado de manera aproximadamente uniforme por los mensajes tipo 2, 3 y 4, que contienen las asignaciones de UDRE a cada satélite de la máscara definida en el mensaje tipo 1. Además, el siguiente mensaje con mayor carga de ancho de banda (en torno a 15%) es el mensaje tipo 26, que contiene las asignaciones del retardo vertical y el GIVEI para cada punto definido en la máscara del mensaje tipo 18. Por lo tanto, es de sentido común asumir que asignar valores a cada elemento de una máscara definida supone una carga significativa en el ancho de banda.

Además, podemos observar los instantes en los que se transmite el mensaje tipo 6, ya sea mediante los contornos situados entre la carga del mensaje tipo 4 y la del mensaje tipo 7 o bien mediante las flechas en la parte superior de la ilustración que indican estos instantes en el eje temporal. De esta manera, podemos reconstruir la gráfica de transmisión de mensajes del día 22 de abril (ilustración 34).

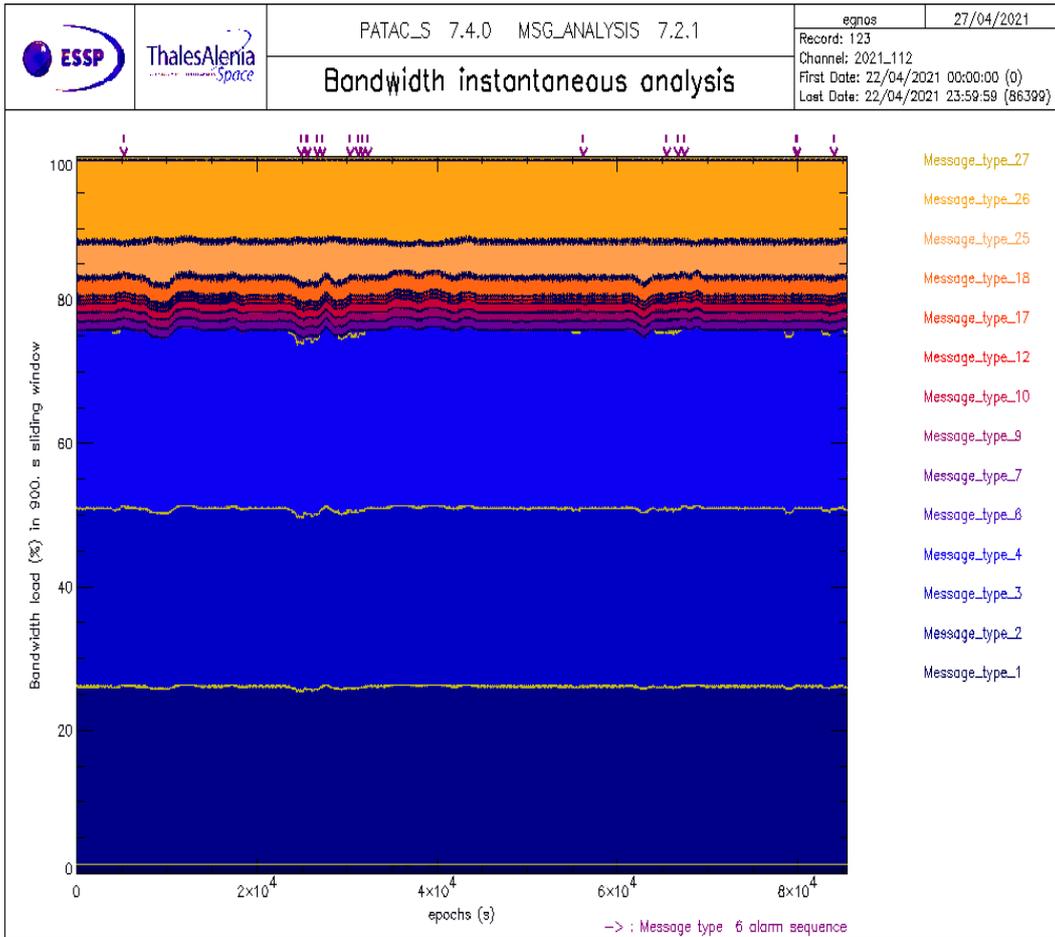


Ilustración 33. Carga de la banda de frecuencia para cada tipo de mensaje el 22 de abril de 2021

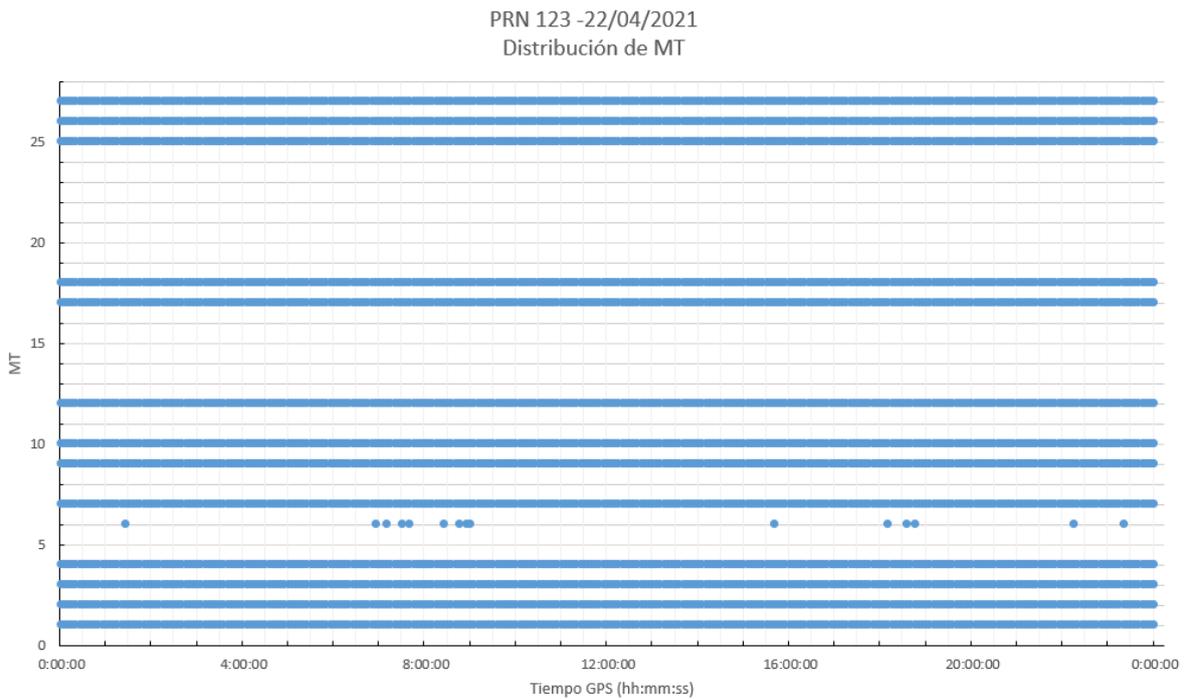


Ilustración 34. Reconstrucción de los tiempos de transmisión de cada tipo de mensaje el 22 de abril de 2021

3. Los retos de interoperabilidad actuales

3.1. El grupo de trabajo sobre la interoperabilidad

En apartados anteriores, hemos comentado el estado actual de la interoperabilidad a nivel mundial. Desde el inicio del desarrollo de los SBAS, ha quedado claro que la interoperabilidad es un factor clave que se ha tenido en cuenta a la hora de idear la estructura del mensaje de corrección de los SBAS y la disponibilidad de los servicios mediante el desarrollo e implementación de nuevos SBAS en zonas de tráfico aéreo abundante.

Nos encontramos en una época clave para este ámbito. En la actualidad, podemos identificar cuatro SBAS operativos (considerando WAAS y CWAAS como un mismo SBAS, al compartir infraestructuras en cada uno de sus segmentos):

- WAAS + CWAAS, cuya zona de operación cubre conjuntamente casi todo el continente norteamericano;
- EGNOS, cuya zona de operación cubre totalmente el continente europeo;
- GAGAN, cuya zona de operación cubre exclusivamente la India;
- MSAS, cuya zona de operación cubre exclusivamente el territorio japonés (aunque en la actualidad solo permite procedimientos NPA).

Sin embargo, los SBAS que se encuentran actualmente en desarrollo superan con creces, tanto en superficie de operación como en número, a los SBAS actuales. Estos son:

- SDCM, cuya zona de operación cubriría Rusia (pese a que las zonas periféricas al norte y al este tienen una disponibilidad reducida);
- BDSBAS, cuya zona de operación cubriría la totalidad de China e incluso parte de sus territorios adyacentes;
- SPAN, cuya zona de operación cubriría tanto Australia como Nuevo Zelanda, junto con el espacio aéreo que los une;
- ASECNA junto con NSAS de Nigeria y ASAL de Argelia, cuya zona de operación cubriría parcialmente el continente africano;
- KASS, cuya zona de operación cubriría Corea del Sur;
- SACCSA, cuya zona de operación cubriría varios países de América de Sur.
- MALAYSIA, cuya zona de operación cubriría Malasia.

Ante tal abundancia de proyectos de SBAS nuevos, es de vital importancia asegurar que se respeten los estándares y se haga un seguimiento continuo en materia de interoperabilidad, tanto con los SBAS actuales como con otros SBAS en desarrollo. Es por ello por lo que cada fase de estudios e implementación se tiene que llevar a cabo presentando los resultados y las proyecciones de los futuros años de manera multilateral.

En cuanto al desarrollo individual de los SBAS, cada entidad nacional mantiene un contacto bilateral con entidades responsables del mantenimiento de estándares relacionados con SBAS tal que OACI, RTCA o EUROCAE (en asuntos europeos). Sin embargo, estas entidades no

aseguran que los esfuerzos en el desarrollo de los SBAS se coordinen para asegurar un funcionamiento interoperable.

Es en este ámbito donde entra en juego el Grupo de Trabajo sobre la Interoperabilidad, abreviado IWG en inglés. El IWG es un grupo que concentra a los máximos responsables de cada SBAS como representantes y portavoces del progreso con respecto a las metas impuestas individualmente. Esto permite armonizar los esfuerzos individuales de cada entidad cuando más de una tienen la misma meta o ciertas han cumplido las metas individuales que otros SBAS quieren desarrollar.

Vamos a describir brevemente la organización responsable de cada SBAS perteneciente al IWG [24]. A su vez, introduciremos la meta actual asociada a su SBAS.

3.1.1. Los miembros del grupo de trabajo sobre la interoperabilidad

a. *FAA y NavCanada: representantes de WAAS y CWAAS*

La FAA, o “Federal Aviation Administration” es una de las entidades aéreas con mayor renombre del mundo. Está asentada en los Estados Unidos, por lo que es claramente el representante de WAAS. Por lo general, se responsabiliza de las actividades relacionadas con la aviación en los Estados Unidos.



Esto incluye la regulación de la operación y mantenimiento de aeronaves, la reglamentación de los estándares de fabricación, la gestión del tráfico aéreo en términos de seguridad aérea y eficiencia y la certificación tanto de aeronaves como de pilotos [25].

La rama de WAAS que cubre el espacio aéreo de Canadá, también llamada CWAAS, está gestionada por NavCanada. Por ello, representa a esta rama de WAAS en el IWG.

Al encargarse de la seguridad aérea, es lógico que la FAA sea la operadora de WAAS, puesto que es un SBAS capaz de ofrecer soluciones de aproximación de precisión en aeropuertos estadounidenses. La principal meta actual de la FAA para WAAS es la implementación de la banda L5 para hacer uso de una frecuencia dual con las bandas L1 y L5.

b. *ESA y GSA: representantes de EGNOS*

La Agencia Espacial Europea (abreviada ESA en inglés) es la entidad responsable de la totalidad de los servicios y las operaciones que se realizan a través del espacio por países europeos. Entre estos servicios se incluyen



programas espaciales tripulados o no tripulados para la exploración o la recopilación de información, la regulación del entorno espacial mediante recomendaciones y políticas

multilaterales y la coordinación del desarrollo de aplicaciones satelitales para la telecomunicación o la monitorización. Hay 22 miembros permanentes de la ESA y dos miembros asociados, mientras que Bulgaria, Chipre, Croacia, Eslovaquia, Malta, Lituania e incluso Canadá mantienen acuerdos de cooperación (Canadá incluso se involucra en algunos proyectos de la ESA) [26].

Por otra parte, la Agencia Europea de GNSS (abreviado GSA) se encarga de asegurar los servicios que proveen tanto GALILEO como EGNOS y la seguridad operacional de ambos. Cabe destacar que, a partir del 12 de mayo de 2021, la GSA a pasado a llamarse la EUSPA, la Agencia de la Unión Europea para el Programa Espacial, tras la nueva regulación europea sobre el espacio y la necesidad de expandir sus servicios.

Ambas entidades representan a EGNOS en el IWG y su meta principal es la implementación de la banda L5 para hacer uso de frecuencia dual y la implementación de correcciones para satélites GALILEO. En cuanto a este último punto, es una meta a muy largo plazo denominada “multi-constelación”, puesto que EGNOS proveería correcciones para satélites GPS y GALILEO.

c. *AAI: representante de GAGAN*

De manera similar a la FAA, GAGAN no es gestionado por una entidad reguladora relacionada exclusivamente con actividades espaciales como EGNOS, sino que es operado por la Autoridad de Aeropuertos de India (abreviado AAI). Esta organización se encarga básicamente de la totalidad de los proyectos relacionados con la aviación de India. Esto es:



- Toda la actividad de las infraestructuras aeroportuarias: la construcción, la operación y el mantenimiento de pistas, terminales...
- La gestión del espacio y el tráfico aéreo, garantizando tanto la seguridad aérea como la totalidad de los servicios requeridos para la navegación aérea (esto incluye GAGAN, por supuesto);
- La construcción, operación y mantenimiento de las ayudas visuales e instrumentales, así como las infraestructuras relacionadas con la comunicación [27].

La AAI es la entidad representante de GAGAN en el IWG y sus metas principales son la implementación de la banda L5 para hacer uso de frecuencia dual y la implementación de correcciones multi-constelación con IRNSS. Esto tiene un plazo aún más largo que el de EGNOS puesto que IRNSS no se encuentra actualmente operativo, pero esta constelación de satélites se está desarrollando con la idea de poder operar con GAGAN.

d. *JRANSA: representante de MSAS*

El último de los SBAS operativos actuales es el MSAS o MTSAT. Este SBAS está representado en el IWG por la Asociación Japonesa de Sistemas de Navegación Aérea por Radio (abreviado JRANSA en inglés). Curiosamente, esta organización se encarga únicamente de la asistencia y la supervisión del SBAS: la entidad encargada de operar MSAS es el Buró Japonés de Aviación Civil, el cual es una división del Ministerio de la Tierra, la Infraestructura, el Transporte y el Turismo.



En todo caso, la JRANSA se encarga además de asegurar y normalizar los sistemas de seguridad aérea, tanto a bordo como terrestres, mediante la cooperación con entidades internacionales como la OACI. MSAS es un sistema que garantiza niveles de seguridad aérea aceptables, por lo que JRANSA se encarga de difundir conocimientos sobre este y otros sistemas de seguridad aérea japoneses, de proveer soporte técnico a MSAS y apoyar actividades aéreas o incluso meteorológicas relacionadas con ajustes de frecuencia de MSAS [28].

Los planes futuros para MSAS incluyen la implementación de la banda L5 para hacer uso de una frecuencia dual y la certificación para procedimientos de aproximación LPV a partir de 2023 (ya que es el único SBAS actual que no es capaz de garantizar este tipo de procedimientos de aproximación). Además, figuran planes para trasladar el servicio de correcciones actual de GPS a la constelación de satélites japonesa QZSS de manera que sea capaz de garantizar correcciones a partir de satélites GPS y QZSS en las bandas de frecuencia L1 y L5 [29].

e. *RSS: representante de SDCM*

La entidad responsable de la gestión de SDCM es Sistemas Espaciales Rusos (abreviado RSS en inglés), la cual es la rama encargada de proveer sistemas espaciales a Roscosmos, la organización responsable de las actividades y la investigación espaciales. RSS se encarga de:

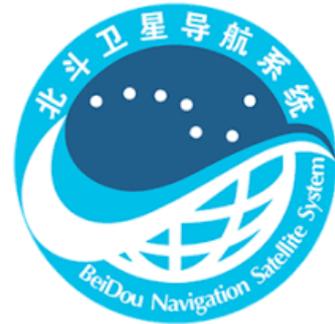


- Proveer sistemas de control y radiocomunicación a todo tipo de transportes espaciales, aéreos y terrestres;
- Desarrollar avances tecnológicos de la constelación de satélites rusa GLONASS y de GPS para aplicaciones de todo tipo (agricultura, turismo, comunicación, navegación...). Esto incluye, por supuesto, la gestión de satélites de SDCM;
- Monitorizar la seguridad de zonas críticas como centrales nucleares o presas y proporcionar servicios de búsqueda y rescate mediante aplicaciones satelitales [30].

Por ello, RSS representa los intereses de SDCM en el IWG. Los planes futuros de SDCM incluyen, de nuevo, la implementación de una segunda banda de frecuencias y la certificación completa del sistema de aumentación en los próximos años. Sin embargo, no consta ningún plan respecto a una estructura multi-constelación, ya que este SBAS provee servicio exclusivo a satélites de GLONASS.

f. CSNO: representante de BDSBAS

De manera similar a la organización de competencias de MSAS, el operador principal de BDSBAS no es el que representa a BDSBAS en el IWG, sino la Administración Espacial Nacional de China (abreviado CNSA). El representante de BDSBAS en materia de cooperación internacional sobre SBAS es la Oficina China de Navegación Satelital (abreviado CSNO en inglés). Esta entidad se responsabiliza de los servicios de construcción y operación de BeiDou con aplicaciones a la navegación por satélite. En total, los servicios específicos que ofrece son:



- La construcción y puesta en operación de infraestructuras para GNSS como estaciones de referencia terrestres;
- La realización de test y simulaciones en tierra sobre la construcción y puesta en operación de nuevos satélites BeiDou;
- La gestión del soporte al usuario sobre el estado y el rendimiento del sistema y la comunicación sobre dudas referentes a BeiDou o BDSBAS;
- Cooperación y promoción internacional de BeiDou y sus aplicaciones [31].

Al igual que JRANSA, CSNO se encarga del aspecto informativo de BDSBAS y la cooperación internacional, por lo que representa a BDSBAS en el IWG. La información sobre los planes futuros de este SBAS se limita a las presentaciones y los informes producidos por CSNO sobre el estado de su implementación e informes internacionales que lo conciernen. Aunque esta información es escasa, podemos afirmar que, a diferencia de otros SBAS previamente mencionados, BDSBAS ya trabaja con frecuencia dual en las bandas B1C y B2A de BeiDou. Por ello, podemos esperar que la meta más inmediata es la certificación y puesta en operación completa de BDSBAS, la cual está proyectada para el año 2022.

g. KARI: representante de KASS

El instituto de Investigación Aeroespacial Coreano (abreviado KARI en inglés) se encarga de toda la rama de investigación, no solo en materia de satélites, sino también en relación con la aviación, las lanzaderas espaciales y la exploración espacial. Algunas de las áreas de investigación específicas son:



- Las aeronaves de ala fija, los rotores y los vehículos aéreos no tripulados;
- El proyecto KOMPSAT, que consta de una red de 7 satélites de baja órbita y 3 satélites de órbita geoestacionaria con finalidades de observación terrestre;
- El desarrollo de satélites de bajo paso y bajas dimensiones para fotografías terrestres de alta resolución;
- La construcción de Naro, la primera lanzadera coreana, y el desarrollo actual de la lanzadera Nuri;
- El desarrollo de tecnologías para la exploración lunar [32].

Siendo el principal responsable de la investigación coreana de aplicaciones satelitales, representa a KASS en el IWG. Una particularidad de KASS es que su desarrollo posterior con respecto a los SBAS actuales ha permitido la implementación de la banda L5 junto con la banda L1 desde las fases iniciales de su desarrollo. Es por ello por lo que, tras finalizar su certificación en cuanto a servicios de SoL proyectada para finales de 2022, se espera que KASS sea un SBAS de frecuencia dual operativo.

h. Geoscience Australia y LINZ: representantes de SPAN

Al ser un proyecto acordado y desarrollado bilateralmente por Australia y Nueva Zelanda, SPAN es representado en el IWG por una entidad de cada país.



Australian Government
Geoscience Australia



**Land Information
New Zealand**
Toitū te whenua

Geoscience Australia es una organización gestionada por el gobierno de Australia que gestiona una multitud de sectores relacionados con la industria y las ciencias de la Tierra (de manera similar al ministerio japonés que opera MSAS, no el que lo representa en el IWG): transporte, agricultura, aviación, espacio, geodesia [33]...

Paralelamente, Información Terrestre Nueva Zelanda (abreviado LINZ en inglés) gestiona una multitud de aspectos relacionados con el espacio terrestre y marítimo neozelandés. Algunos ejemplos de los servicios de información que ofrecen son:

- Datos topográficos, geodésicos, aéreos, de elevación...
- Predicciones y bases de datos de oleaje, avisos y almanaques marítimos, información astronómica...
- Servicios relacionados con compraventa de terreno y su regulación asociada [34].

Como vemos, no son organizaciones con un alto grado de especialización en aspectos técnicos satelitales, sino que gestionan aspectos relacionados con sus aplicaciones prácticas. En cuanto a la meta de SPAN, se prevé finalizar la certificación del SBAS entre 2023 y 2024. Para esas fechas, su servicio abierto operará en las bandas de frecuencia L1 y L5, pero su servicio crítico solo operará en la banda L1. En cuanto a la futura implementación de la banda L5 en el servicio

crítico, se mencionan planes para estudiar la posibilidad de certificarlo como un sistema de frecuencia dual, pero no sería posible antes de 2025, según las proyecciones.

i. *ASECNA: representante de ASECNA SBAS*

Por último, ASECNA SBAS es operado por la Agencia para la Seguridad de la Navegación Aérea en África y Madagascar (abreviado ASECNA). Pese a ser la organización que gestiona la navegación aérea en el espacio aéreo africano, únicamente cuenta con la representación de 17 países concentrados en torno al oeste de la África sahariana y subsahariana. Algunas de las responsabilidades de ASECNA son:



- La publicación de información y previsiones relacionadas con el tráfico aéreo y la meteorología en términos aeronáuticos;
- La gestión de escuelas de formación para la aviación civil;
- La organización del espacio aéreo y la provisión de servicios de navegación aérea dentro del mismo;
- La instalación y mantenimiento de infraestructuras necesarias para la comunicación, la navegación y la vigilancia dentro del espacio aéreo definido [35].

Claramente, es la entidad que representa los intereses de ASECNA SBAS en el IWG. En cuanto a su desarrollo, los primeros test exitosos en cuanto a su servicio abierto se han realizado en 2020, mientras que el servicio crítico sigue en proceso de certificación. Además, se prevé que pueda garantizar servicios de búsqueda y rescate en torno a 2024. En cuanto a el uso de frecuencia dual, no consta ningún plan futuro a corto plazo.

3.1.2. Los objetivos del grupo de trabajo sobre la interoperabilidad

El principal objetivo del grupo de trabajo sobre la interoperabilidad es el de introducir las nuevas mejoras tecnológicas que se desarrollan a la largo de los años de manera conjunta. Esto resulta ser una ventaja notable para los SBAS que todavía no se encuentran operativos, puesto que pueden hacer los cambios que estimen convenientes y adaptarse al grado de tecnología actual durante su fase de implementación. De esta manera, se promueve la interoperabilidad de unos SBAS con otros para ofrecer una transición aparentemente fluida entre un servicio y otro.

El IWG promueve también la cooperación y la comunicación entre los distintos organismos representantes de cada SBAS. Esto concierne a la cooperación en aspectos tecnológicos y operacionales mencionados previamente, pero también supone un medio para cada organismo de proponer modificaciones en ciertos ámbitos o incluso nuevos requisitos de manera multilateral.

Por otra parte, las reuniones del IWG permiten que los SBAS en desarrollo presenten el estado de implementación o de certificación en el que se hallan e incluso las proyecciones sobre la

realización de las etapas del desarrollo de los SBAS. Esto es un gran beneficio para ciertas entidades, ya que no publican de manera oficial ningún documento que exprese, de manera técnica, las novedades de sus SBAS.

Por último, se discuten y se comparten los nuevos avances y tecnologías ligados a cada SBAS en materia de investigación y desarrollo. Por todas estas razones, podemos afirmar que, gracias al IWG, la interoperabilidad de los SBAS es asegurada constantemente y bajo la supervisión de todas las organizaciones representantes de SBAS del mundo. Se puede decir que es un esfuerzo conjunto y globalizado.

3.1.3. La reunión 36 del IWG

Al querer introducir los nuevos avances y las metas futuras de la interoperabilidad de todos los SBAS, es conveniente explicar los temas comentados durante la última reunión documentada del IWG. Esta es la reunión 36, organizada en febrero de 2020 en Delhi (India). El emplazamiento de las reuniones está siempre ubicado en un país miembro de alguna de las organizaciones representantes de un SBAS, por lo que la AAI ha decidido acogerla en esta ocasión. De hecho, la reunión 37 debía acogerse por ASECNA en octubre de 2020, en Madagascar. Sin embargo, a raíz de la pandemia de COVID-19, se debió prorrogar y actualmente no hay información sobre la fecha en la que se debe llevar a cabo.

Dentro de la estructura del IWG, se definen dos subgrupos cuya finalidad es comentar aspectos más concretos de la interoperabilidad de los SBAS: estos son el subgrupo de tecnologías (TSG) y el subgrupo de operaciones (OSG). Esto permite agilizar las conversaciones entre entidades representantes para poder cooperar paralelamente durante la reunión sobre temas especializados.

El subgrupo de tecnologías se encarga principalmente de los aspectos técnicos relacionados con cada SBAS: mensajes, frecuencias, soluciones tecnológicas asociadas a la comunicación entre estaciones y satélites... Las conversaciones y presentaciones de los aspectos tecnológicos considerados en la actualidad incluían los informes y análisis del progreso de la implementación de frecuencia dual y de sistemas multi-constelación en SBAS actuales y futuros, así como las actualidades de los sistemas de recepción y transmisión de señales de SBAS.

Por otra parte, el subgrupo de operaciones se encarga principalmente de los aspectos relacionados con los progresos en la aprobación y la mejora del rendimiento de los SBAS para procedimientos de aproximación y navegación aérea. En esta ocasión, la actualidad de las operaciones con SBAS se centraba en el progreso de la aprobación de procedimientos de aproximación LPV en aeropuertos japoneses y los planes futuros para la implementación de aproximaciones de precisión empleando tecnologías SBAS en aeropuertos europeos, indios... [36]

En definitiva, cada entidad representante ha tenido la oportunidad de presentar sus progresos en cuanto a las proyecciones del desarrollo tecnológico y operacional de su SBAS respectivo.

3.2. El desarrollo actual de SBAS con frecuencia dual

3.2.1. El concepto de frecuencia dual

Hemos comentado de manera muy superficial la idea de hacer uso de dos bandas de frecuencia y los SBAS que están desarrollando esta idea. Sin embargo, es conveniente analizar este concepto con más detalle, al ser el aspecto más actual en materia de investigación y desarrollo de interoperabilidad y mejora de prestaciones de SBAS.

Hacer uso de una frecuencia dual significa que las señales transmitidas y recibidas por el canal se reparten en dos bandas de frecuencia distintas, tanto a nivel de satélites como de estaciones de referencia. En sus inicios, los SBAS actualmente operativos se diseñaron para comunicar en la banda de frecuencia L1, cuya frecuencia central es 1575.42 MHz y su ancho de banda es de 20.46 MHz, y está destinada para uso civil. Sin embargo, entre 1998 y 1999, se estudió la posibilidad de incluir una banda de frecuencias usada exclusivamente para aplicaciones de seguridad aérea, al encontrarse en constante desarrollo. Esta banda pasó a llamarse L5, cuya frecuencia central es 1176.45 MHz y tiene el mismo ancho de banda que L1. Cabe destacar que todas las frecuencias centrales de las bandas GPS son múltiplos de 10.23 MHz, siendo L1 el múltiplo 154 y L5 el múltiplo 115.

Podríamos pensar que, desde el punto de vista técnico, la implementación de una nueva banda de frecuencia implica únicamente añadir los medios tecnológicos para la transmisión y recepción de señales en la nueva banda y los sistemas que combinen las correcciones obtenidas por ambas bandas. No obstante, esta no es ni mucho menos la diferencia entre ambas bandas de frecuencia. A continuación, se muestran las diferencias de especificaciones técnicas significativas al cambiar de una banda a otra [37].

	L1	L5
Frecuencia central (MHz)	1575.42	1176.45
Tasa de chip (MHz)	1.023	10.23
Chips de longitud del código primario	1023	10230
Grado de polinomios generadores	10	13
Polinomio generador 1 (G1 y XA respectivamente)	$X^{10} + X^3 + 1$	$X^{13} + X^{12} + X^{10} + X^9 + 1$
Polinomio generador 2 (G2i y XBi respectivamente)	$X^{10} + X^9 + X^8 + X^6 + X^3 + X^2 + 1$	$X^{13} + X^{12} + X^8 + X^7 + X^6 + X^4 + X^3 + X^2 + X + 1$
Potencia recibida mínima (dBW)	-158.5	-157.9

Tabla 11. Diferencias técnicas significativas entre la banda L1 y la banda L5

Se espera una potencia recibida mayor en la banda L5, puesto que una frecuencia central menor resulta en unas pérdidas de espacio libre globalmente menores. A partir de la tabla anterior, podemos deducir que la implementación de la nueva banda de frecuencia no es para nada evidente dada la diferencia de longitud y de generación del código. Además de esto, la banda L5 transmite dos códigos distintos en cuadratura denominados I5 y Q5, cuya nomenclatura

proviene de la nomenclatura convencional dada a las componentes de una señal en cuadratura: “I” proveniente de “In-phase” y “Q” proveniente de “Quadrature”, con una desviación de fase de 90 grados con respecto a la componente I.

Por todas estas razones, no podemos superponer la estructura de la generación y transmisión de señales de SBAS a través de la banda L1 y la estructura de la banda L5. La segunda banda de frecuencias que va a componer la frecuencia dual de los SBAS será pues notablemente más compleja desde el punto de vista técnico, pero su implementación homogénea en todos los SBAS asegurará que estos sistemas permanezcan siendo interoperables.

3.2.2. Los beneficios de la frecuencia dual

El beneficio más inmediato de la frecuencia dual es la redundancia que otorga al sistema de transmisión y recepción de mensajes. Al igual que para los sistemas aeronáuticos y la aviónica, los sistemas basados en satélites pueden verse beneficiados por la mejora de la seguridad que los subsistemas redundantes pueden proporcionar. Al tener dos bandas de frecuencia, podemos confiar en las señales transmitidas por una sola banda en el caso de un fallo de integridad en la otra banda, puesto que se trataría de un sistema equivalente a los sistemas de frecuencia única actuales (aunque la equivalencia no es total en el caso de operar únicamente en la banda L5, como hemos comentado anteriormente).

La redundancia de bandas de frecuencia juega un papel mayor, por ejemplo, en un evento puntual de interferencias electromagnéticas (abreviado EMI en inglés). Puede darse el caso de que una EMI de origen natural como una fulguración solar esté proyectada hacia uno o varios de los satélites de un SBAS de frecuencia dual. En ese caso, una parte del circuito eléctrico del satélite vería afectada temporalmente o incluso dañada permanentemente, pero puede darse el caso en el que el circuito asociado a una de las bandas permanezca plenamente operativo.

Un ejemplo de fulguración solar que afectó a ciertos satélites fue el del 6 de diciembre de 2006. Este día, una fulguración solar de clase X6.5 se dirigió hacia la Tierra, afectando tanto dispositivos de comunicación en la parte iluminada de la Tierra como satélites encontrados entre la Tierra y el Sol (ilustración 35 [38]). Esta fulguración afectó a frecuencias entre 1 GHz y 2GHz, pero tuvo potencias significativas entre 1.2 GHz y 1.6 GHz, con un máximo de un millón de unidades de flujo solar en torno a la frecuencia de 1.4 GHz [39].

Esto supuso un grave problema para la operación de WAAS, puesto que la banda L1 se encuentra dentro del rango de frecuencias afectado severamente por las interferencias electromagnéticas resultantes. En la ilustración 36, podemos observar como, minutos después de la fulguración, la relación señal a ruido registrada por un receptor de WAAS en banda L1 disminuye sustancialmente durante aproximadamente 20 minutos en comparación con la relación señal a ruido registrada el 5 de diciembre de 2006 (curva azul). La degradación de señal a ruido provocada por la fulguración alcanza en varias ocasiones los 15 dB, lo cual dificulta enormemente la integridad de los datos transmitidos. De igual manera, muchos satélites de la constelación GPS y muchas estaciones de referencia cayeron por debajo de los mínimos de rendimiento operacional.

Añadir una segunda banda de frecuencia separada de aproximadamente 0.4 GHz, podría evitar problemas en la operación de SBAS, únicamente en caso de que una de las bandas no se encuentre dentro del rango de frecuencias afectado por interferencias electromagnéticas de este tipo (o bien la potencia de la fulguración en la banda no sea suficiente para llevar al SBAS por debajo de los mínimos operacionales).

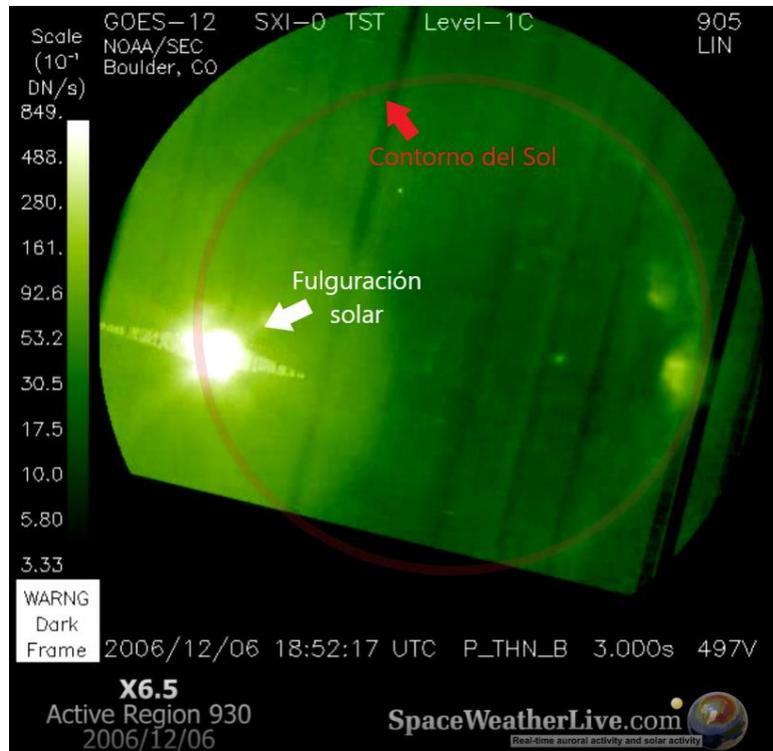


Ilustración 35. Observación espacial de la fulguración solar del 6 de diciembre de 2006

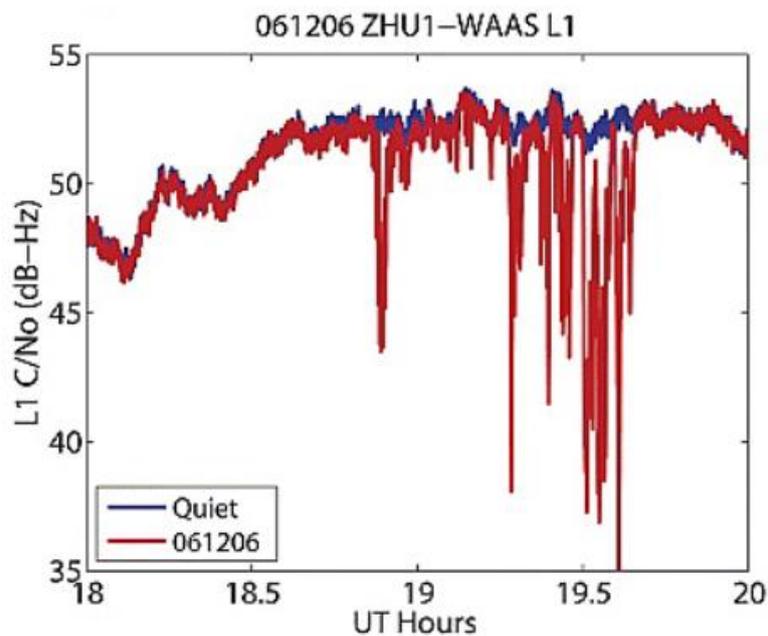


Ilustración 36. Comparación de la relación señal a ruido de un día estándar con el día 6 de diciembre de 2006

Cabe destacar que existen interferencias electromagnéticas de origen artificial como descargas electrostáticas, interferencias entre satélites en proximidad o productos de intermodulación entre señales de las bandas L1 y L5.

Por otra parte, el beneficio principal de operar con dos bandas de frecuencia es la reducción e incluso eliminación de la incertidumbre asociado a errores ionosféricos y sus gradientes en ciertas regiones. Con una sola banda de frecuencia, el efecto de la ionosfera en el retardo de la señal para las zonas externas del mapa de disponibilidad de los SBAS es tal que no podemos determinar con niveles de integridad suficientes su impacto en las medidas. El uso de frecuencia dual permitiría reducir los valores del retardo vertical para IGP donde son superiores a los tres metros en el mensaje tipo 26 e incluso ampliar la máscara de red ionosférica de puntos del mensaje tipo 18.

Consecuentemente, reducir la incertidumbre asociada a errores ionosféricos permite elevar los niveles de integridad de dichas regiones a niveles aceptables para realizar aproximaciones en zonas que no estaban incluidas en el mapa de disponibilidad del SBAS. Esto no afecta solo a zonas externas del mapa de disponibilidad sino también internas, puesto que mitigar en mayor medida el efecto de la ionosfera permite garantizar mayores niveles de integridad en aproximaciones de precisión con un mayor nivel de criticidad. Esto podría permitir, en un futuro, la aprobación del uso de SBAS para aproximaciones de precisión de categoría más alta, lo que expandiría en gran medida la cantidad de aproximaciones realizadas con SBAS en aeropuertos que lo permiten.

Indirectamente, obtener errores ionosféricos aceptables en zonas externas del mapa de disponibilidad permite aumentar considerablemente el área de cobertura con disponibilidad superior al 99% de SBAS con frecuencia dual. Por tanto, al tener una mayor superficie cubierta por más de un SBAS, la interoperabilidad a nivel de la disponibilidad mejora notablemente gracias al uso de dos bandas de frecuencia.

A continuación, podemos ver una modelización del mapa de disponibilidad global de SBAS bajo las siguientes hipótesis:

- Asumimos que todos los SBAS hacen uso de frecuencia dual;
- Se incluyen los SBAS actuales con su proyección de disponibilidad con frecuencia dual;
- Se establecen estaciones en las zonas cubiertas por SDCM, SPAN, ASECNA y SACCSA (no incluimos estaciones para BDSBAS ni KASS).

Observamos como la mejora de disponibilidad tras la implementación de los SBAS mencionados y el uso de frecuencia dual es notable [4]. Tan solo viendo el límite de cobertura de WAAS y EGNOS, no se aprecia ninguna transición en la que la disponibilidad baje del 99%. Si a esto le añadimos una cobertura de disponibilidad en torno al 67.57% de la Tierra, vemos claramente un aumento en los niveles de interoperabilidad entre SBAS previsto para los próximos años.

Sin embargo, la noción de frecuencia dual para SBAS suele venir acompañada por la noción de multi-constelación, puesto que se están llevando a cabo los procedimientos necesarios para implementar ambas estructuras al mismo tiempo.

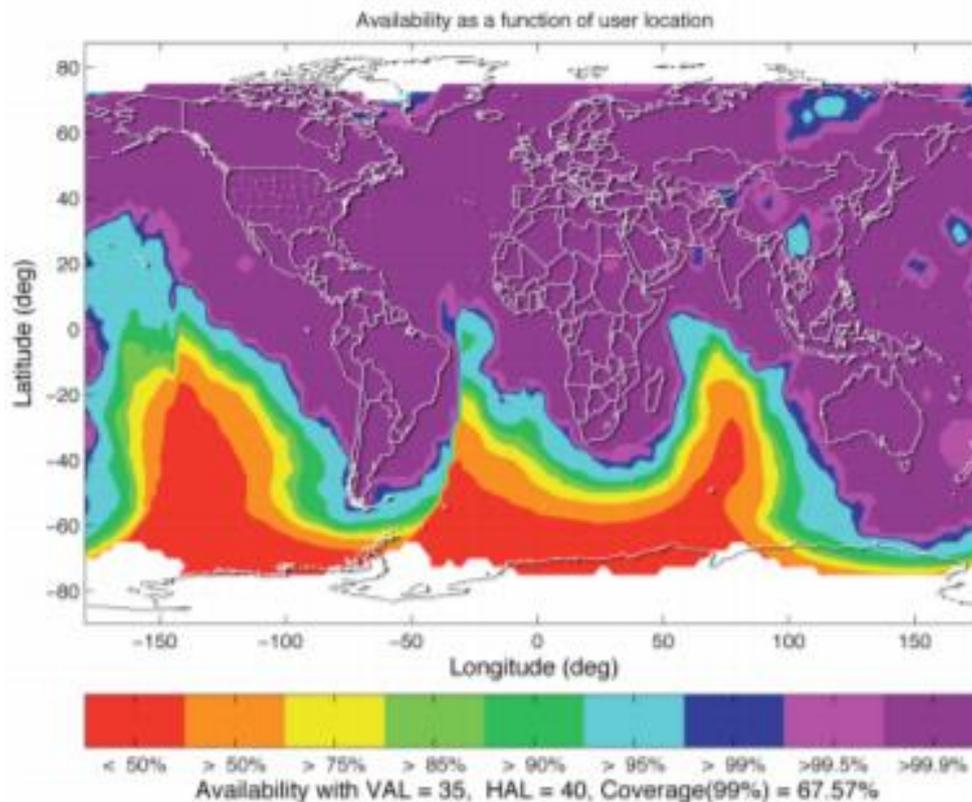


Ilustración 37. Proyección de la disponibilidad mundial futura si los SBAS operan en frecuencia dual

3.2.3. Los SBAS DFMC

a. El concepto y los beneficios de los SBAS DFMC

Un SBAS Multi-Constelación de Frecuencia Dual (abreviado DFMC en inglés) es un SBAS que transmite y recibe señales en dos bandas de frecuencia a través de satélites pertenecientes a más de una constelación.

Actualmente, los avances para implementar la banda L5 vienen acompañados por la implementación de otra constelación para la aumentación de los servicios de SBAS. La mayoría de SBAS actuales y en desarrollo proporcionan aumentación para satélites de la constelación GPS, por lo que hay intereses en ofrecer servicio por medio de la constelación asociada a la nacionalidad del operador de SBAS, si existe tal constelación. Además de los beneficios citados previamente, los sistemas DFMC ofrecen dos beneficios principales con respecto a sistemas de constelación única.

Por una parte, un fallo relacionado con una característica de los satélites de una constelación puede propagarse hasta dificultar la operación de los SBAS en caso de que aumente a esta única constelación. Este tipo de fallos se denominan “core fault” o “fallos del núcleo”, puesto que están asociados algún defecto en el núcleo de la estructura de la constelación y se propagan a todos los satélites. Añadir un segunda constelación al SBAS tendría la función de aumentar la redundancia del sistema, puesto que podemos operar exclusivamente con una de las dos

constelaciones en caso de que la otra tenga un fallo del núcleo. Este concepto es similar a la redundancia que obtenemos con el fallo de una de las bandas de frecuencia de la frecuencia dual.

Por otra parte, un factor a tener en cuenta para estimaciones de posición y parámetros derivados es la dilución de precisión (abreviado DOP en inglés). La DOP establece un índice del error que se obtiene exclusivamente considerando la posición y el tiempo de los relojes del satélite con respecto al receptor. Como podemos ver en la siguiente ilustración, obtenemos distintas áreas de tolerancia de la posición para un caso de dos satélites estimando la posición en un plano de dos dimensiones [40]. Cuando los satélites se encuentran relativamente próximos, el área de tolerancia definido por la intersección entre los márgenes superior e inferior de la pseudodistancia entre cada satélite hasta el receptor es notablemente mayor que el área de tolerancia impuesta por satélites relativamente más alejados. Visualmente, podemos deducir que esto conlleva a desviaciones mayores en la posición.

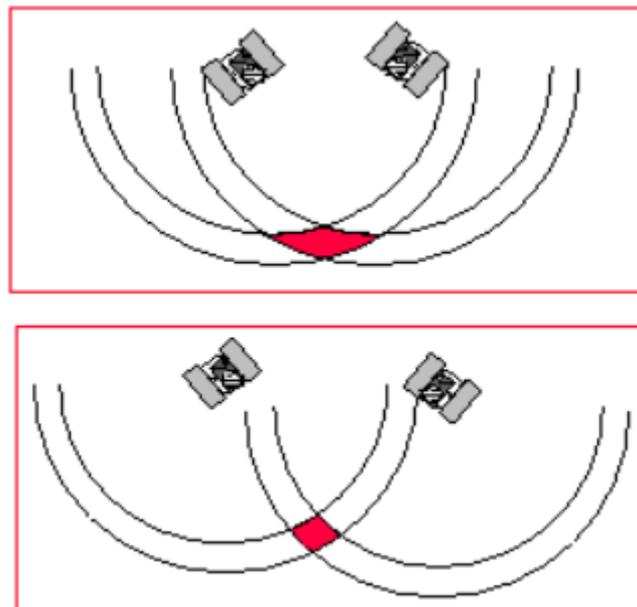


Ilustración 38. Representación comparativa bidimensional de DOP según la cercanía de los satélites

Este caso bidimensional se denomina más concretamente dilución de precisión horizontal (abreviado HDOP en inglés). Si nos interesamos en la tercera componente de la posición en un plano tridimensional, estaríamos haciendo referencia a la dilución de posición vertical (abreviado VDOP en inglés). Esta dilución de posición se puede visualizar en la ilustración 39, donde vemos que obtenemos mejores resultados en la estimación de la posición si utilizamos satélites con ángulos de elevación con mayor disparidad. Estas nociones están representadas matemáticamente por las covarianzas en la estimación de la posición de cada una de las componentes, por lo que depende también del sistema de coordenadas utilizado. La raíz cuadrada de la suma de las covarianzas en cada componente es lo que forma la dilución de precisión de la posición (abreviado PDOP en inglés), la cual corresponde a la combinación de la dilución de posición horizontal y la dilución de posición vertical.

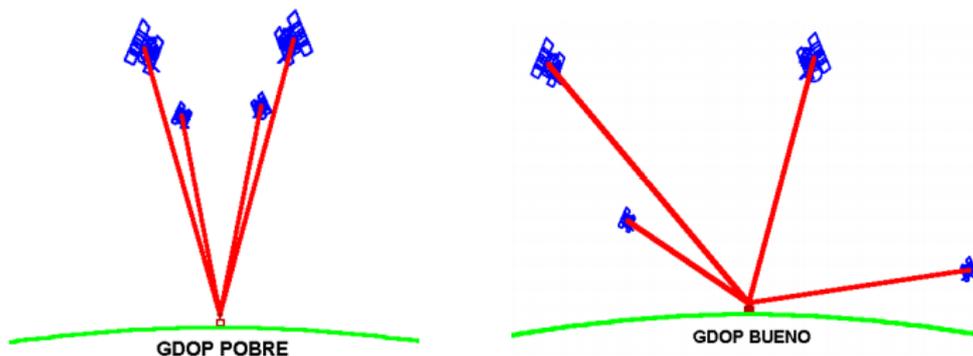


Ilustración 39. Representación comparativa tridimensional de DOP según la geometría de los satélites

Si consideramos ahora una cuarta dimensión temporal basándonos en el grado de disparidad de los tiempos de los relojes de los satélites y el reloj del receptor (dicho de otra manera, su covarianza), tendríamos la dilución de posición temporal (abreviado TDOP en inglés). La combinación de la PDOP y la TDOP compone la dilución de posición geométrica (abreviado GDOP en inglés).

La GDOP es considerada, por ejemplo, para la sustitución de un satélite cuya señal se haya perdido. Según los estándares mínimos de rendimiento operacional de RTCA, cuando la señal de un satélite se pierda durante menos de 30 segundos, los satélites restantes utilizados para el posicionamiento deben de tener una GDOP inferior a 7 para que se consideren aptos durante la readquisición de la señal.

Para ilustrar este beneficio, vamos a simular un caso en el que un SBAS multi-constelación obtenga mejores diluciones de precisión que un SBAS de constelación única. Este ejemplo está desarrollado mediante el programa “Nova for Windows”, el cual permite visualizar trayectorias y coberturas de satélites, así como una multitud de parámetros asociados a cada satélite que no utilizaremos en esta ocasión. El programa permite también establecer observadores en cualquier localización para realizar estudios de visibilidad.

Este programa no ha sido actualizado desde aproximadamente 2014, por lo que la determinación de las trayectorias y parámetros de los satélites se basa principalmente en las proyecciones de las trayectorias de su base de datos en el tiempo. Por lo tanto, las localizaciones de los satélites reales pueden diferir ligeramente de las localizaciones simuladas en Nova, el ejemplo es puramente ilustrativo de una situación ficticia que puede darse en la realidad. Además, los satélites operativos de fechas posteriores a 2014 no estarán incluidos en el programa y los satélites retirados a partir de 2014 seguirán figurando en la lista de satélites de Nova.

Vamos a imaginar que tenemos un SBAS multi-constelación que aumenta la constelación GPS y la constelación GLONASS (estas constelaciones han sido seleccionadas porque son las constelaciones con mayor número de satélites en 2014). Un paso previo a la simulación es filtrar los satélites disponibles en Nova con los que se encuentran en estado operativo actualmente. La tabla siguiente resume los satélites seleccionados en la aplicación en función de su disponibilidad en el programa y su estado operativo actual.

Satélites GPS operativos simulados en Nova		Satélites GLONASS operativos simulados en Nova	
Bloque IIR	2, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 13	Bloque 36-M	Kosmos 2432, 2433
Bloque IIRM	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8	Bloque 37-M	Kosmos 2434, 2436
Bloque IIF	1, 2, 3, 4	Bloque 40-M	Kosmos 2456, 2457
		Bloque 41-M	Kosmos 2460, 2461
		Bloque 42-M	Kosmos 2464
		Bloque 44-M	Kosmos 2475, 2476, 2477
		Bloque 47S-M	Kosmos 2485

Tabla 12. Satélites operativos de GPS y GLONASS que figuran en Nova

Vamos a establecer un observador en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universidad Politécnica de Valencia (ETSID), con coordenadas {39.4804N, 0.3383W}. Establecemos una hora fija para la simulación en torno a las 19 horas y 55 minutos UTC del día 26 de mayo de 2021. Estableciendo el observador, la hora y los satélites disponibles de la tabla 12, obtenemos el siguiente mapa de coberturas bidimensional.



Ilustración 40. Simulación de la cobertura de todos los satélites operativos con un observador en la ETSID

A partir de las coberturas de este mapa, vamos a establecer dos casos. En el primer caso, el SBAS aumenta exclusivamente la constelación GPS. Suponemos que la localización de la ETSID se estima pues en base a cuatro satélites GPS cuya zona de cobertura incluya la localización de la ETSID y cuyo servicio esté disponible. Para el primer caso, los cuatro satélites seleccionados vienen incluidos en la siguiente tabla.

Satélites seleccionados para el caso 1
GPS BIIR-1
GPS BIIR-2
GPS BIIR-6
GPS BIIR-13

Tabla 13. Satélites seleccionados para el primer caso

Si filtramos los satélites seleccionados para el caso de una única constelación GPS, obtenemos la geometría que visualizamos en las ilustraciones 41 y 42.



Ilustración 41. Mapa rectangular con la HDOP de los satélites del primer caso



Ilustración 42. Mapa tridimensional de cobertura de los satélites del primer caso

La dilución de precisión obtenida, tanto en dos dimensiones como en el mapa tridimensional parecen razonables para realizar estimaciones de posición. Sin embargo, los satélites GPS BIIR-6 y GPSBIIR-13 están próximos entre sí en el mapa bidimensional, por lo que su GDOP no será tan buena como la GDOP del resto del sistema.

En el segundo caso, vamos a asumir que el SBAS aumenta tanto a la constelación GLONASS como a la constelación GPS. Además, asumimos que el satélite KOSMOS 2464 perteneciente a GLONASS se encuentra disponible para realizar una estimación de posición de la ETSID en el instante de tiempo estudiado. Si procedemos a sustituir el satélite GPS BIIRN-6 por el satélite de GLONASS mencionado, obtenemos los siguientes resultados.



Ilustración 43. Mapa rectangular con la HDOP de los satélites del segundo caso



Ilustración 44. Mapa tridimensional de cobertura de los satélites del segundo caso

En este caso, los satélites están alejados entre sí y tienen ángulos de elevación con mayor disparidad, lo que resulta en una GDOP mejor.

La ventaja de un SBAS multi-constelación con respecto a la dilución de precisión no es más que ofrecer una mayor cantidad de satélites capaces de determinar una posición, lo que ofrece más configuraciones que mejoren la GDOP para la medida. Esto sería equiparable a aumentar la cantidad de satélites de la constelación GPS, pero esta opción es notablemente menos práctica que añadir los satélites de una nueva constelación existente al sistema. Además, obtenemos una TDOP mejor, puesto que el tiempo GPS y el tiempo GLONASS están definidos de manera distinta.

b. El futuro de los SBAS DFMC asegurado por sus desarrollos actuales

Como hemos comentado, el principal desarrollo técnico de los SBAS actuales para elevar su grado de interoperabilidad es la implementación de la frecuencia dual y la aumentación de satélites pertenecientes a múltiples constelaciones [41].

Por una parte, EGNOS está implementando la aumentación de las bandas L1 y L5 de GPS y las bandas E1 y E5a de GALILEO, cuyas frecuencias son equivalentes. ASECNA SBAS prevé aumentar las mismas bandas y constelaciones alrededor de 2030, una vez pueda garantizar el servicio en la banda L1 de GPS.

De manera similar a EGNOS, SDCM y BDSBAS prevén ofrecer servicio en dos bandas de frecuencia empleando la constelación GPS y la constelación asociada a su nacionalidad. Estas son GLONASS y BeiDou respectivamente.

Por otra parte, el caso de MSAS es ligeramente distinto. El plan de MSAS es hacer la transición de satélites MTSAT actuales a satélites QZSS (que ya tienen PRN reservados en bandas utilizadas por GPS) para componer la estructura del SBAS. Las bandas de frecuencia utilizadas serían L1 y L5, de nuevo.

Por último, WAAS, GAGAN Y KASS no tienen planes de operar con constelaciones de satélites distintas de GPS, aunque GAGAN considerará su desarrollo si las ventajas operacionales observadas una vez los SBAS DFMC estén operativos son notables. Para los tres SBAS, la prioridad es pasar a una estructura de frecuencia dual: GAGAN prevé su implementación entre 2025 y 2028, mientras que WAAS planea introducir satélites que funcionen con frecuencia dual para poder ofrecer simultáneamente los servicios con los satélites actuales en la banda L1 y los servicios planeados con los nuevos satélites en las bandas L1 y L5; KASS prevé que el servicio inicie con frecuencia dual entre 2022 y 2023 [42].

Una vez estén operativos todos los sistemas SBAS DFMC o SBAS de frecuencia dual, se prevé una cobertura global del 92.65% para aproximaciones LPV [4], lo cual ofrecería la disponibilidad requerida para realizar aproximaciones de precisión en cualquier aeropuerto del mundo. Vemos pues como los desarrollos técnicos van a permitir progresos operacionales en el tráfico y la seguridad aérea.

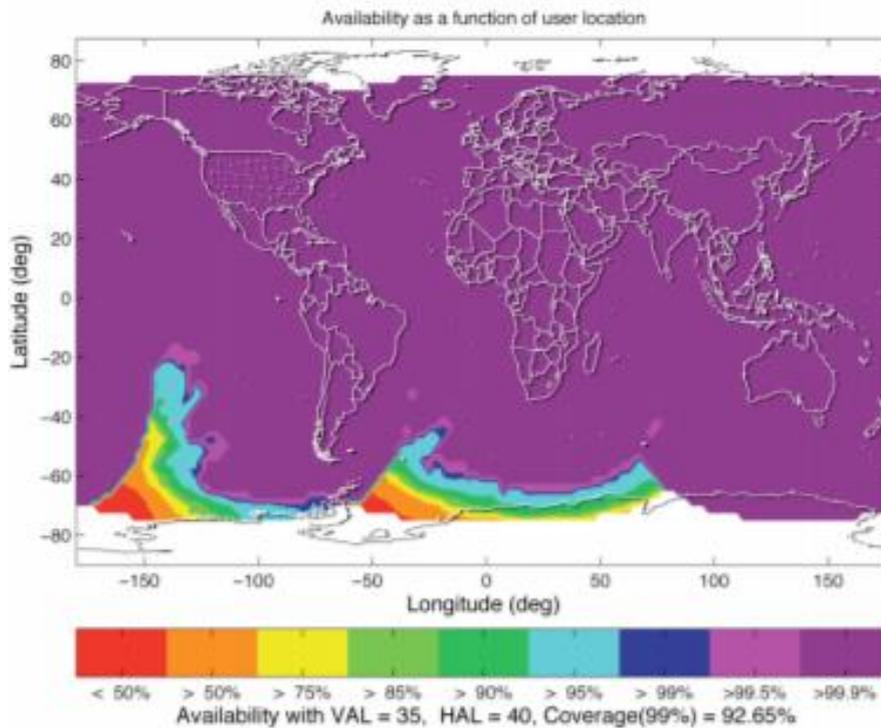


Ilustración 45. Proyección de la disponibilidad mundial futura si los SBAS son DFMC

3.3. Los desarrollos operacionales en aproximaciones con SBAS

3.3.1. Las aproximaciones LPV garantizadas mediante SBAS

A nivel operacional, los SBAS pueden garantizar que se cumplen requisitos del nivel más estricto en cuanto a procedimientos de aproximación de precisión con guiado vertical. Si bien MSAS cumple esencialmente los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad para aproximaciones de no precisión, la finalidad de una gran mayoría de los SBAS es poder ofrecer un método para realizar aproximaciones LPV que, de otro modo, no serían posibles.

Además, garantizar este tipo de procedimientos de aproximación para aeropuertos que no tienen capacidades de aproximación mediante ILS es todavía más importante, puesto que el guiado vertical en instantes de muy baja visibilidad se ve bastante perjudicado sin estos medios u otros medios de aumentación. Estos aeropuertos son prioritarios para disponer de algún medio con suficiente precisión para guiado vertical, por lo que la mayoría de los aeropuertos que tienen aproximaciones LPV habilitadas son aeropuertos sin ILS.

En la actualidad, la mayoría de procedimientos de aproximación LPV son garantizados en suelo estadounidense por WAAS. Estados Unidos tiene actualmente 4078 procedimientos de aproximación LPV aprobados en 1960 aeropuertos, de los cuales 1191 aeropuertos no tienen ILS. Paralelamente, este SBAS garantiza un total de 538 aproximaciones LPV en Canadá. La información sobre las especificaciones asociadas a cada una de las aproximaciones LPV garantizadas por WAAS se puede consultar en la página oficial de la FAA [43].



Ilustración 46. Aproximaciones LPV publicadas en territorio canadiense

Por otro lado, EGNOS tiene un total de 531 aproximaciones LPV en una multitud de países de Europa, contando tanto las aproximaciones LPV habilitadas como las que se encuentran en estado de desarrollo. El país europeo con mayor número de aproximaciones de este tipo es Suiza, con 89 LPVs. A continuación, podemos observar el mapa de distribución de aproximaciones LPV según en el país, el cual está disponible de forma interactiva en la página web de EGNOS, junto con las especificaciones de cada una de estas aproximaciones [44].



Ilustración 47. Aproximaciones LPV publicadas en Europa

3.3.2. Una inversión que no convence a las aerolíneas

Si bien hemos visto, un gran número de aproximaciones LPV en América del Norte y Europa gracias a los SBAS, los desarrollos técnicos que van a provocar un enorme auge de la disponibilidad global no parecen venir a la par con el aumento de aproximaciones LPV en el mundo, sino todo lo contrario.

Analizando las fechas de publicación de aproximaciones LPV en Estados Unidos de la ilustración 47, nos percatamos de que la tendencia en los últimos años ha disminuido desde 2009, habiendo una clara diferencia entre las 531 publicaciones de 2009 y las 34 publicaciones a lo largo de 2020 (los datos utilizados para la composición de la gráfica se encuentran disponibles en el anexo G). Cabe destacar que no hemos considerado el número de aproximaciones publicadas durante 2021 al no haber finalizado el año pero, entre enero y abril de 2021, el número de aproximaciones publicadas es de 4 (por ello, las proyecciones de aproximaciones LPV publicadas durante la totalidad del año 2021 son pesimistas). Si además comparamos esta tendencia con la de la ilustración 48 concluimos que, pese a una tendencia aproximadamente constante en el número de operaciones totales en aeropuertos estadounidenses, los intereses de las aerolíneas para habilitar aproximaciones LPV en sus vuelos a disminuido en años recientes (la información del número anual de operaciones en Estados Unidos se encuentra disponible en el anexo H [45]). Esta diferencia se acentúa todavía más cuando la comparamos con la tendencia creciente de tráfico internacional en aeropuertos estadounidenses de la ilustración 49 (la información del tráfico anual de pasajeros internacionales en Estados Unidos se encuentra disponible en el anexo I [46]).

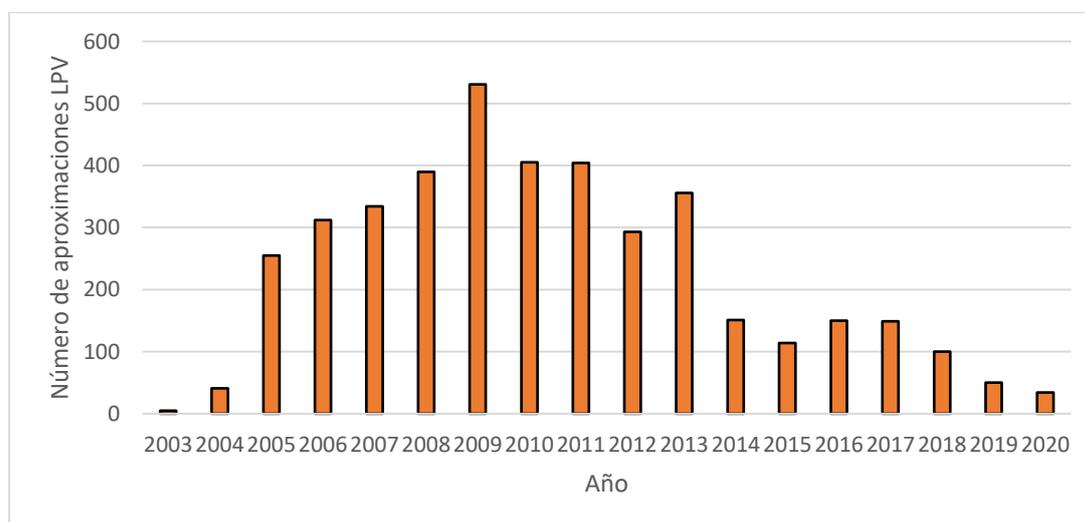


Ilustración 48. Número de aproximaciones LPV publicadas en Estados Unidos según el año

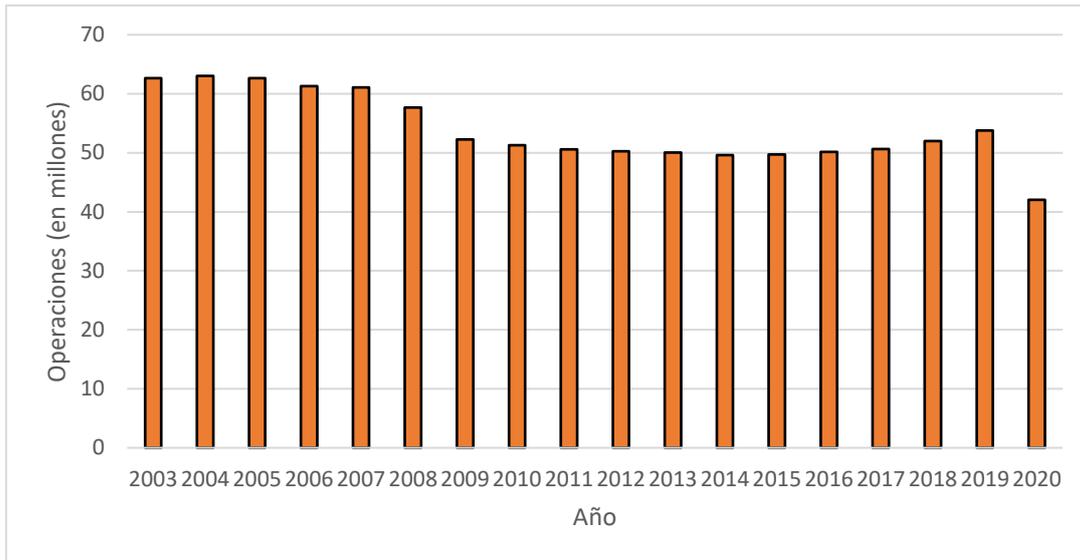


Ilustración 49. Operaciones totales en aeropuertos estadounidenses según el año

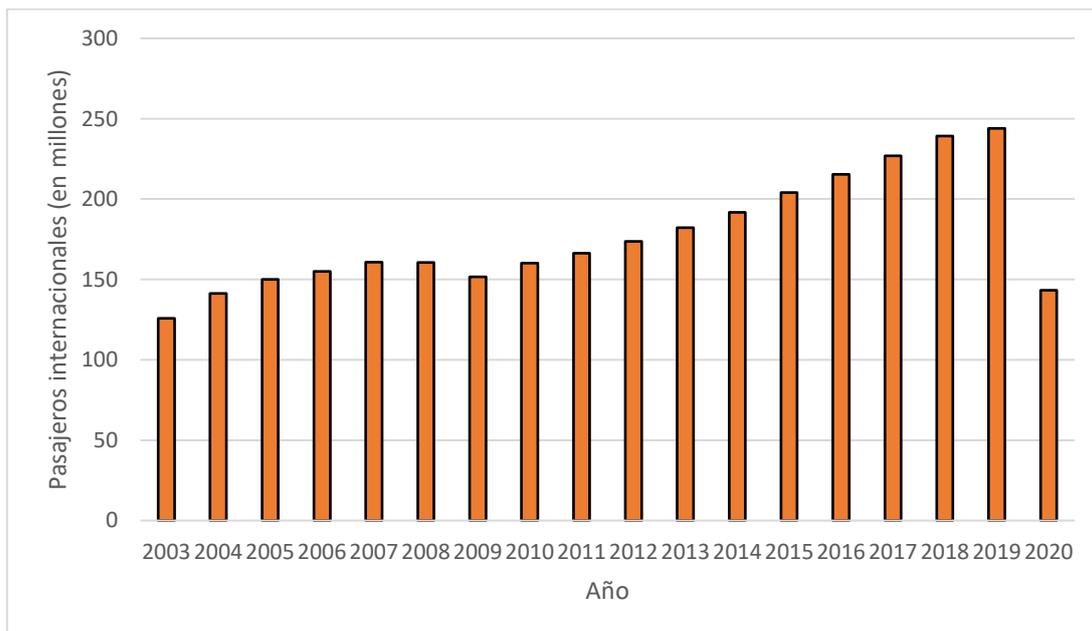


Ilustración 50. Tráfico de pasajeros internacionales en Estados Unidos según el año

A la vista de estas estadísticas, podemos concluir que la publicación de nuevas aproximaciones LPV no están teniendo mucho éxito en la actualidad. Esto no se puede relacionar ni con una disminución de operaciones, ni con una disminución de tráfico de pasajeros (salvo para el año 2020).

Un ejemplo que puede ilustrar las causas de este hecho es el de India. No hemos hablado de la publicación de aproximaciones LPV garantizadas por MSAS ya que no tienen actualmente la certificación necesaria para garantizar los requisitos de precisión, integridad, continuidad y

disponibilidad que exige este tipo de aproximaciones. Sin embargo, la certificación de GAGAN incluye la capacidad de realizar aproximaciones APV-I. Los requisitos de límite de alerta para aproximaciones APV-I son 40 metros en el plano horizontal y 50 metros en el plano vertical, lo cual coincide con las aproximaciones LPV de menor precisión.

Sin embargo, pese a los intentos de publicidad de la seguridad de las aproximaciones facilitadas por GAGAN en eventos como la reunión 36 del IWG (donde hubo una presentación de GAGAN frente a las principales aerolíneas con vuelos en India), las aerolíneas no han estado convencidas de los beneficios utilizar GAGAN para aproximaciones LPV frente al coste de implementar los sistemas de a bordo que habiliten este tipo de aproximaciones. Este coste se sumaría al coste de los sistemas embarcados de ILS instalados en la mayoría de la flota de las principales aerolíneas, que habilita aproximaciones con unos niveles de seguridad razonables en 52 pistas indias con sistema ILS operativo. Es por ello que no figura todavía ninguna publicación de aproximación LPV en territorio indio y puede ser un motivo principal de la disminución de publicaciones en otros países como hemos visto en Estados Unidos.

Sin embargo, India ha exigido recientemente, por medio del apartado 14.d de la Norma de Aviación Civil Nacional [47], que todos los aviones registrados en India tengan los sistemas necesarios para habilitar operaciones mediante GAGAN. Por ello, se prevé que este mandato motive a las aerolíneas a solicitar aproximaciones LPV, habiendo realizado ya la inversión necesaria.

Vemos pues la extrema importancia de incentivar las aproximaciones LPV. Sin aerolíneas que soliciten este tipo de aproximaciones, la utilidad de los desarrollos técnicos masivos que se van a realizar durante los próximos años serán, como mínimo, redundantes con respecto a otras soluciones actuales para aproximaciones de menor precisión.

II. PLIEGO DE CONDICIONES

1. Condiciones generales

En este apartado, introducimos las condiciones generales a las que debe estar sujeto un ingeniero o estudiante de ingeniería durante la realización de un trabajo de fin de grado. Estas condiciones hacen referencia a la disposición del entorno de trabajo y la actitud durante la realización del trabajo que permite minimizar cualquier riesgo durante su realización, ya sean retardos en su finalización o impedimentos mayores que conlleven riesgos de salud para la persona.

Para este propósito, el Real Decreto 488/1997 de 14 de abril establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización. Las disposiciones a considerar serían pues las siguientes:

Artículo 1. Objeto.

1. El presente Real Decreto establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización.
2. Las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, se aplicarán plenamente al conjunto del ámbito contemplado en el apartado anterior.
3. Quedan excluidos del ámbito de aplicación de este Real Decreto:
 - a) Los puestos de conducción de vehículos o máquinas.
 - b) Los sistemas informáticos embarcados en un medio de transporte.
 - c) Los sistemas informáticos destinados prioritariamente a ser utilizados por el público.
 - d) Los sistemas llamados portátiles, siempre y cuando no se utilicen de modo continuado en un puesto de trabajo.
 - e) Las calculadoras, cajas registradoras y todos aquellos equipos que tengan un pequeño dispositivo de visualización de datos o medidas necesario para la utilización directa de dichos equipos.
 - f) Las máquinas de escribir de diseño clásico, conocidas como máquinas de ventanilla.

Artículo 2. Definiciones.

A efectos de este Real Decreto se entenderá por:

- a) Pantalla de visualización: una pantalla alfanumérica o gráfica, independientemente del método de representación visual utilizado.
- b) Puesto de trabajo: el constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona/máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato.

c) Trabajador: cualquier trabajador que habitualmente y durante una parte relevante de su trabajo normal utilice un equipo con pantalla de visualización.

Artículo 3. Obligaciones generales del empresario.

1. El empresario adoptará las medidas necesarias para que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización no suponga riesgos para su seguridad o salud o, si ello no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo.

En cualquier caso, los puestos de trabajo a que se refiere el presente Real Decreto deberán cumplir las disposiciones mínimas establecidas en el anexo del mismo.

2. A efectos de lo dispuesto en el primer párrafo del apartado anterior, el empresario deberá evaluar los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, teniendo en cuenta en particular los posibles riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, así como el posible efecto añadido o combinado de los mismos.

La evaluación se realizará tomando en consideración las características propias del puesto de trabajo y las exigencias de la tarea y entre éstas, especialmente, las siguientes:

- a) El tiempo promedio de utilización diaria del equipo.
- b) El tiempo máximo de atención continua a la pantalla requerido por la tarea habitual.
- c) El grado de atención que exija dicha tarea.

3. Si la evaluación pone de manifiesto que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización supone o puede suponer un riesgo para su seguridad o salud, el empresario adoptará las medidas técnicas u organizativas necesarias para eliminar o reducir el riesgo al mínimo posible. En particular, deberá reducir la duración máxima del trabajo continuado en pantalla, organizando la actividad diaria de forma que esta tarea se alterne con otras o estableciendo las pausas necesarias cuando la alternancia de tareas no sea posible o no baste para disminuir el riesgo suficientemente.

4. En los convenios colectivos podrá acordarse la periodicidad, duración y condiciones de organización de los cambios de actividad y pausas a que se refiere el apartado anterior.

Artículo 4. Vigilancia de la salud.

1. El empresario garantizará el derecho de los trabajadores a una vigilancia adecuada de su salud, teniendo en cuenta en particular los riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, el posible efecto añadido o combinado de los mismos, y la eventual patología acompañante. Tal vigilancia será realizada por personal sanitario competente y según determinen las autoridades sanitarias en las pautas y protocolos que se elaboren, de conformidad con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 37 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los servicios de prevención. Dicha vigilancia deberá ofrecerse a los trabajadores en las siguientes ocasiones:

- a) Antes de comenzar a trabajar con una pantalla de visualización.

b) Posteriormente, con una periodicidad ajustada al nivel de riesgo a juicio del médico responsable.

c) Cuando aparezcan trastornos que pudieran deberse a este tipo de trabajo.

2. Cuando los resultados de la vigilancia de la salud a que se refiere el apartado 1 lo hiciese necesario, los trabajadores tendrán derecho a un reconocimiento oftalmológico.

3. El empresario proporcionará gratuitamente a los trabajadores dispositivos correctores especiales para la protección de la vista adecuados al trabajo con el equipo de que se trate, si los resultados de la vigilancia de la salud a que se refieren los apartados anteriores demuestran su necesidad y no pueden utilizarse dispositivos correctores normales.

Artículo 5. Obligaciones en materia de información y formación.

1. De conformidad con los artículos 18 y 19 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, el empresario deberá garantizar que los trabajadores y los representantes de los trabajadores reciban una formación e información adecuadas sobre los riesgos derivados de la utilización de los equipos que incluyan pantallas de visualización, así como sobre las medidas de prevención y protección que hayan de adoptarse en aplicación del presente Real Decreto.

2. El empresario deberá informar a los trabajadores sobre todos los aspectos relacionados con la seguridad y la salud en su puesto de trabajo y sobre las medidas llevadas a cabo de conformidad con lo dispuesto en los artículos 3 y 4 de este Real Decreto.

3. El empresario deberá garantizar que cada trabajador reciba una formación adecuada sobre las modalidades de uso de los equipos con pantallas de visualización, antes de comenzar este tipo de trabajo y cada vez que la organización del puesto de trabajo se modifique de manera apreciable.

Artículo 6. Consulta y participación de los trabajadores.

La consulta y participación de los trabajadores o sus representantes sobre las cuestiones a que se refiere este Real Decreto se realizarán de conformidad con lo dispuesto en el apartado 2 del artículo 18 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

Disposición transitoria única. Plazo de adaptación de los equipos que incluyan pantallas de visualización.

Los equipos que incluyan pantallas de visualización puestos a disposición de los trabajadores en la empresa o centro de trabajo con anterioridad a la fecha de entrada en vigor del presente Real Decreto deberán ajustarse a los requisitos establecidos en el anexo en un plazo de doce meses desde la citada entrada en vigor.

Disposición final primera. Elaboración de la Guía Técnica para la evaluación y prevención de riesgos.

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, elaborará y mantendrá actualizada una Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos que incluyan pantallas de visualización.

Disposición final segunda. Habilitación normativa.

Se autoriza al Ministro de Trabajo y Asuntos Sociales para dictar, previo informe de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, las disposiciones necesarias en desarrollo de este Real Decreto y, específicamente, para proceder a la modificación del anexo del mismo para aquellas adaptaciones de carácter estrictamente técnico en función del progreso técnico, de la evolución de las normativas o especificaciones internacionales o de los conocimientos en el área de los equipos que incluyan pantallas de visualización.

ANEXO

Disposiciones mínimas

Observación preliminar: las obligaciones que se establecen en el presente anexo se aplicarán para alcanzar los objetivos del presente Real Decreto en la medida en que, por una parte, los elementos considerados existan en el puesto de trabajo y, por otra, las exigencias o características intrínsecas de la tarea no se opongan a ello.

En la aplicación de lo dispuesto en el presente anexo se tendrán en cuenta, en su caso, los métodos o criterios a que se refiere el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto de los Servicios de Prevención.

1. Equipo

a) Observación general.

La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.

b) Pantalla.

Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones.

La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad.

El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno.

La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.

Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla.

La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

c) Teclado.

El teclado deberá ser inclinable e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda que no provoque cansancio en los brazos o las manos.

Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos.

La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos.

La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización.

Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

d) Mesa o superficie de trabajo.

La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.

El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.

El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.

e) Asiento de trabajo.

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable.

La altura del mismo deberá ser regulable.

El respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable.

Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

2. Entorno

a) Espacio.

El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio suficiente para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.

b) Iluminación.

La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos niveles adecuados de iluminación y unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, habida cuenta del carácter del trabajo, de las necesidades visuales del usuario y del tipo de pantalla utilizado.

El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial, deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos en la pantalla u otras partes del equipo.

c) Reflejos y deslumbramientos.

Los puestos de trabajo deberán instalarse de tal forma que las fuentes de luz, tales como ventanas y otras aberturas, los tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla.

Las ventanas deberán ir equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

d) Ruido.

El ruido producido por los equipos instalados en el puesto de trabajo deberá tenerse en cuenta al diseñar el mismo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.

e) Calor.

Los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.

f) Emisiones.

Toda radiación, excepción hecha de la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.

g) Humedad.

Deberá crearse y mantenerse una humedad aceptable.

3. Interconexión ordenador/persona

Para la elaboración, la elección, la compra y la modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:

a) El programa habrá de estar adaptado a la tarea que deba realizarse.

b) El programa habrá de ser fácil de utilizar y deberá, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados y previa consulta con sus representantes.

- c) Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.
- d) Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptados a los operadores.
- e) Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.

FIN DE REAL DECRETO 448/1997

Además de las condiciones óptimas descritas en el Real Decreto 448/1997, se debe supervisar la realización del trabajo por un tutor responsable nombrado con anterioridad. Esta persona debe tener los conocimientos suficientes relativos al sector de los sistemas de aumentación aplicados a la navegación aérea, con el fin de asegurar la integridad de la información expuesta a lo largo del trabajo.

Por último, la persona responsable de la realización del trabajo debe tener los conocimientos previos necesarios que le permitan entender los conceptos necesarios para la realización del trabajo.

2. Condiciones técnicas

Las condiciones técnicas describen los requerimientos necesarios para la realización del trabajo en términos de soportes informáticos, programas y otras utilidades de carácter técnico. Comprobamos así la viabilidad de los medios utilizados con respecto a las especificaciones mínimas más estrictas.

2.1. Software

A continuación, se ofrece una lista detallada con la información referente a los programas utilizados. Esta lista se estructura en orden cronológico, según su uso durante la realización del trabajo.

- Microsoft Office: paquete ofimático utilizado para la elaboración del soporte de trabajo y las tablas expuestas a lo largo del documento.
- Navegadores Google Chrome y FileZilla: soportes de búsqueda de contenido web en formato http y ftp respectivamente.
- Microsoft Edge: soporte de búsqueda de contenido web usado exclusivamente para visualizar contenido en formato pdf.
- MATLAB: plataforma de programación utilizada para dar soporte a ciertas aplicaciones utilizadas con fines de visualización de contenido.
- MAAST: conjunto de herramientas de uso público para MATLAB con fines de simulación de disponibilidad de SBAS según el escenario seleccionado.
- Paint 3D: programa de diseño de imágenes usado para indicaciones puntuales en las ilustraciones expuestas durante el trabajo.

- SBAS MeNTOR: herramienta de creación o decodificación de mensajes de SBAS en formato ems.
- Google Earth: programa de visualización tridimensional de la Tierra basado en imágenes satelitales.
- Nova for Windows: programa de seguimiento de satélites con órbita terrestre usado para determinar coberturas de un número limitado de satélites.

2.2. Hardware

Los requerimientos mínimos más estrictos del software citado previamente corresponden a los programas Matlab y Google Earth [48] [49]. A continuación, se identifica una lista de especificaciones mínimas junto con el programa al cual corresponde la especificación:

- Velocidad de procesador: 1 GHz (Google Earth).
- RAM: 4 GB (Matlab).
- RAM de video (Tarjeta gráfica): 16 MB (Google Earth).
- Sistema operativo: Windows 7 o posterior (Matlab y Google Earth).
- Espacio en disco duro: 3GB (Matlab).

La totalidad del trabajo ha sido realizada utilizando un ordenador portátil Lenovo Legion Y520-15IKBN. A continuación, ofrecemos una lista de las especificaciones del dispositivo en las condiciones en las cuales se ha realizado el trabajo:

- Velocidad de procesador: 2.8 GHz.
- RAM: 16 GB.
- RAM de video (Tarjeta gráfica): 4 GB.
- Sistema operativo: Windows 10.
- Espacio en disco duro medio: 745 GB.

Como podemos comprobar, las especificaciones del hardware utilizado son notablemente mejores que las especificaciones mínimas más estrictas, por lo que el hardware utilizado es válido para la elaboración del trabajo.

2.3. Conexión a internet

La utilización de una conexión a internet estable es imprescindible para la consulta de documentos relacionados con el trabajo, la descarga y uso de los programas utilizados y sus ficheros adicionales e incluso la comunicación con el tutor que supervisa el trabajo, puesto que ambos no comparten el mismo entorno de trabajo. Se estima que la disponibilidad de la conexión a internet durante el horario de realización del trabajo no debe ser menor del 90% para evitar retardos significativos con los procedimientos asociados a las tareas que requieren conexión. Con este mismo pretexto, la velocidad de bajada tendría que ser superior a 5 Mb por segundo y la velocidad de subida tendría que ser superior a 1 Mb por segundo. La conexión utilizada ha tenido una disponibilidad aproximada superior al 99% durante las horas de trabajo. La velocidad de bajada mínima monitorizada durante su disponibilidad ha sido de 16.32 Mb por

segundo y su velocidad mínima de subida ha sido de 10.78 Mb por segundo, por lo que la conexión a internet utilizada cumple los estándares impuestos.

2.4. Documentos oficiales

Para la realización del trabajo, es necesario obtener acceso a una copia de los siguientes documentos oficiales:

- RTCA DO-229 – *Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment.*
- ICAO DFMC SBAS SARPs – Sub Group (DS2).
- ICAO NSP CONOPS – DFMC GNSS.

Cualquier versión de los documentos citados es apta, ya que los contenidos estudiados durante el trabajo están incluidos en la primera versión de todos ellos. Sin embargo, dada la naturaleza de los documentos, la persona encargada de realizar el trabajo tiene que tener un nivel de inglés apto para la comprensión de estos, obviando la comprensión técnica de los conceptos incluidos.

III. PRESUPUESTO

1. Desglose de costes

Este apartado pretende reflejar de manera precisa los costes de los distintos componentes necesarios para la realización del trabajo *Estudio de los criterios y desafíos de interoperabilidad de SBAS a nivel mundial*. La duración total de la realización del proyecto ha sido de 14 semanas con una carga de trabajo en torno a 25 horas semanales. Estos valores no son más que una estimación que refleja el total de horas de trabajo, por lo que el escenario real ha tenido variabilidades en cuanto a la carga de trabajo en horas semanales.

1.1. Costes de software y hardware

En primer lugar, debemos computar el coste de los programas y los soportes utilizados según su tiempo de uso con respecto a su coste. Esto debe tener en cuenta varios factores, como el valor de la compra del producto, el valor residual (o valor de venta tras su periodo de amortización), el periodo de amortización del producto y el tiempo trabajado.

La siguiente fórmula relaciona todos estos parámetros para estimar la tasa horaria de cada producto [50]:

$$t_h = \frac{VC-VR}{n \cdot h}$$

VC, VR: Valor de Compra, Valor de Venta (euros)
h: tiempo trabajado (horas/año)
n: periodo de amortización del producto (años)

Una vez calculada la tasa horaria, podemos calcular el coste del producto dividiéndola por el número de horas dedicadas al proyecto.

El tiempo trabajado en horas por año se calcula de la siguiente manera:

$$h = \text{carga de trabajo semanal} * \left(\frac{\text{semanas}}{\text{año}} - \frac{\text{días festivos}}{\text{año}} * \frac{\text{semanas}}{\text{día}} \right)$$

Con una carga de trabajo semanal de 25 horas por semana, 52.143 semanas en el año 2021 y con 37 días festivos en 2021, podemos determinar el tiempo trabajado por año:

$$h = 25 * \left(52.143 - 37 * \frac{1}{7} \right) = 1171.43 \text{ horas/año}$$

En cuanto al soporte, estimamos que su valor residual es igual al 25% de su valor de compra, mientras que los valores residuales del software son nulos, puesto que se trata de suscripciones o compras permanentes sin posibilidad de venta posterior. A continuación, mostramos una tabla con el desglose de los costes de hardware y software. En este desglose, solo están incluidos los programas cuyo coste no es nulo, puesto que son los únicos que contribuyen al presupuesto total. Además, este coste no refleja las licencias educativas gratuitas para estudiantes que ofrece la Universidad Politécnica de Valencia, por lo que suponemos que no disponemos de dichas licencias. Por último, el coste de las licencias que estén disponibles de manera mensual se calcula con un valor inicial igual a la compra de cuatro licencias mensuales con un periodo de amortización de 0.33 años.

Descripción	Periodo de amortización total (años)	Tiempo trabajado (horas/año)	Valor de compra (euros)	Valor residual (euros)	Tasa horaria (euros/hora)
Ordenador Lenovo Legion Y520-15IKBN	5	1171.43	1000.00	250	0.13
Microsoft Office (4 licencias mensuales)	0.25	1171.43	28.00	0	0.10
MATLAB (licencia anual)	1	1171.43	800.00	0	0.68
TOTAL			1828.00	250	0.91

Tabla 14. Parámetros de cálculo de la tasa horaria de software y hardware

Descripción	Horas dedicadas al trabajo (horas)	Tasa horaria (euros/hora)	Coste total (euros)
Ordenador Lenovo Legion Y520-15IKBN	350	0.13	45.50
Microsoft Office (4 licencias mensuales)	350	0.10	35.00
MATLAB (licencia anual)	350	0.68	238.00
TOTAL		0.91	318.50

Tabla 15. Cómputo de coste total del hardware y el software

1.2. Costes de entorno de trabajo

El entorno de trabajo en el cual se ha realizado el trabajo cuenta con dos otras personas ajenas a él, por lo que supondremos que los costes totales asociados a cada característica se dividen por tres. Por una parte, el coste total de alquiler es de 800 euros mensuales, pero también han de tenerse en cuenta los costes de manutención. Para las tres personas que componen el entorno de trabajo, el coste mensual de la luz y el sistema eléctrico es de 80 euros, el coste mensual del acceso al agua es de 35 euros y el coste mensual del acceso a internet es de 60 euros.

Además, es necesario tener en cuenta que estos precios no son aplicables semanalmente. Por lo tanto, para 14 semanas de trabajo, el coste del entorno de trabajo se tiene que aplicar a un total de 4 meses de amortización. La siguiente tabla resume los costes descritos.

Descripción	Periodo de amortización total (meses)	Coste mensual (euros/mes)	Coste total (euros)
Alquiler	4	266.67	1066.67
Luz	4	26.67	106.67
Agua	4	11.67	46.67
Internet	4	20.00	80.00
TOTAL		325.00	1300.00

Tabla 16. Cómputo de coste total del entorno de trabajo

1.3. Coste de documentos oficiales

Tendremos que añadir el coste de los documentos oficiales utilizados al presupuesto total. En este caso, el único documento cuyo acceso no es público es el documento RTCA MOPS DO-229D, el cual ha sido utilizado para extraer información de una gran parte del trabajo, por lo que su coste no puede ser obviado. Este coste es unitario y permanente, por lo que no depende del tiempo utilizado. El coste del documento es de 301.60 euros desde la página web oficial de RTCA.

1.4. Coste de personal

Un personal cualificado es una parte imprescindible para la realización de este trabajo, pero también supone una gran parte del presupuesto total. En este caso, supondremos que el trabajo ha sido realizado por un ingeniero titulado. El tutor del trabajo es un profesor contratado doctor, por lo que su salario es más elevado que el del personal que realiza el trabajo, pero su tiempo dedicado al trabajo es menor. A continuación, se detalla el coste de personal en función de los salarios medios por hora asumidos para cada uno de los componentes del personal.

Descripción	Horas dedicadas al trabajo (horas)	Salario (euros/hora)	Coste total (euros)
Ingeniero licenciado	350	14.00	4900.00
Profesor contratado doctor	30	25.00	750.00
TOTAL			5650.00

Tabla 17. Cómputo de coste de personal

2. Presupuesto total del trabajo

Finalmente, calculamos el presupuesto total sumando los costes totales individuales de cada apartado anterior. El resultado de este cómputo se muestra a continuación.

Descripción	Coste (euros)
Coste de hardware y software	318.50
Coste de entorno de trabajo	1300.00
Coste de documentos oficiales	301.60
Coste personal	5650.00
TOTAL	7570.10

Tabla 18. Presupuesto total de la realización del trabajo

En definitiva, el presupuesto total de la realización del trabajo *Estudio de los criterios y desafíos de interoperabilidad de SBAS a nivel mundial* asciende a SIETE MIL QUINIENTOS SETENTA EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS.

IV. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Tras estudiar la interoperabilidad de los SBAS actuales desde varios puntos de vista, hemos podido analizar tanto sus limitaciones como sus puntos fuertes.

En primer lugar, la interoperabilidad a nivel de la disponibilidad no es especialmente óptima hoy en día. La presencia de cuatro SBAS operativos en una única banda de frecuencia y para la aumentación de una sola constelación resulta en zonas de disponibilidad del servicio focalizadas en regiones inconexas de la Tierra: América del Norte, Europa, India y Japón. Estas zonas de disponibilidad están notablemente limitadas por el UDRE y el GIVE, puesto que el área de cobertura de los satélites y la localización de las estaciones de referencia tienen el propósito de optimizar el rendimiento de los SBAS para la zona sobre la que están diseñados. Por lo tanto, para los procedimientos con requisitos más estrictos (como aproximaciones de precisión), dos SBAS actuales no tienen el nivel de disponibilidad suficiente para dar servicio a un mismo usuario con una localización dada para un mismo instante.

Sin embargo, la interoperabilidad a nivel de la disponibilidad va a progresar en los próximos años a pasos agigantados por dos motivos principales.

Por una parte, el desarrollo de nuevos SBAS con zonas de disponibilidad que no estaban previamente cubiertas por las zonas de disponibilidad de los SBAS va a permitir obtener una cobertura global de servicios SBAS notablemente mayor. Además, las zonas de disponibilidad planeadas para estos SBAS tendrán conexión entre sí e incluso con SBAS ya existentes: podemos tomar el ejemplo de la interconexión entre EGNOS y SDCM, entre SDCM y BDSBAS, entre BDSBAS y MSAS o incluso entre WAAS y SACCSA. Esto podría permitir que un mismo usuario pueda transitar entre las zonas de disponibilidad de dos SBAS distintos sin que haya una interrupción aparente del servicio.

Por otra parte, si la interconexión entre dos zonas de disponibilidad no es completamente segura, la introducción de nuevos avances tecnológicos en todos los SBAS, independientemente de su fecha de implementación, va a afianzar la cobertura global de los servicios SBAS y la interoperabilidad entre ellos.

Estos avances consisten en ampliar la operación a una nueva banda de frecuencia utilizada exclusivamente para fines de seguridad aérea por la constelación GPS: la banda L5. El uso de dos bandas de frecuencia distintas permite disminuir la incertidumbre provocada por altos gradientes ionosféricos en los límites externos de la zona de disponibilidad de un SBAS, lo que permite aumentarla notablemente. Asimismo, añadir una banda de frecuencia nueva ofrece redundancia al sistema, lo que lo vuelve menos vulnerable a eventos puntuales que afectan a una sola de estas bandas, como las interferencias electromagnéticas.

Además de este avance, la mayoría de SBAS aumentarán dos constelaciones de satélites diferentes. Esto hace que la dilución de precisión de las medidas disminuya notablemente, lo que aumentaría efectivamente el nivel de precisión en zonas que no alcanzan los requisitos necesarios y, por tanto, permitiría mejorar aún más la disponibilidad de los SBAS.

Paralelamente, la estructura de los tipos de mensajes de corrección y posicionamiento de los SBAS tiene actualmente un grado de interoperabilidad muy alto, puesto que todos los SBAS utilizan el mismo número y posición de bits para transmitirlos. La ventaja de esto es que la estructura de los mensajes se puede considerar universal, puesto que conociendo la definición de los tipos de mensajes de un único SBAS, se puede interpretar el contenido de los mensajes de absolutamente cualquier SBAS actual o futuro. Además, estos mensajes tienen bits

reservados, lo que permite implementar modificaciones en todos los SBAS en función de las necesidades de los SBAS en desarrollo.

Por último, todos los avances relacionados con la interoperabilidad permitirían globalizar la disponibilidad de aproximaciones de precisión como LPV, las cuales tienen requisitos muy estrictos que se podrán cumplir previsiblemente para cualquier aeropuerto. Esto permite que el alto grado de interoperabilidad futuro logre grandes avances operacionales para la aviación.

En definitiva, en torno a 2030, se prevé que la cobertura global de los SBAS con disponibilidad suficiente para aproximaciones de precisión sea superior al 90%, en comparación con una cobertura actual de menos del 10%.

V. ANEXOS

ANEXO A: Localización de los puntos de la red ionosférica mundial y bits en la máscara

		Bits in Mask
Band 0		
180 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N, 85N	1 to 28
175 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	29 to 51
170 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	52 to 78
165 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	79 to 101
160 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	102 to 128
155 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
150 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
145 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 1		
140 W	85S, 75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 28
135 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	29 to 51
130 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	52 to 78
125 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	79 to 101
120 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	102 to 128
115 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
110 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
105 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 2		
100 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
95 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
90 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N, 85N	51 to 78
85 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	79 to 101
80 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	102 to 128
75 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
70 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
65 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 3		
60 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
55 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
50 W	85S, 75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 78
45 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	79 to 101
40 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	102 to 128
35 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
30 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
25 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 4		
20 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
15 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
10 W	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
5 W	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
0	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N, 85N	101 to 128
5 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
10 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
15 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201

Band 5		
20 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
25 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
30 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
35 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
40 E	85S, 75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	101 to 128
45 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	129 to 151
50 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	152 to 178
55 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 6		
60 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
65 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
70 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
75 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
80 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	101 to 127
85 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	128 to 150
90 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N, 85N	151 to 178
95 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 7		
100 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
105 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
110 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
115 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
120 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	101 to 127
125 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	128 to 150
130 E	85S, 75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	151 to 178
135 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	179 to 201
Band 8		
140 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	1 to 27
145 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	28 to 50
150 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	51 to 77
155 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	78 to 100
160 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	101 to 127
165 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	128 to 150
170 E	75S, 65S, 55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N, 65N, 75N	151 to 177
175 E	55S, 50S, 45S, ..., 45N, 50N, 55N	178 to 200
Band 9		
60 N	180W, 175W, 170W, ..., 165E, 170E, 175E	1 to 72
65 N	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	73 to 108
70 N	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	109 to 144
75 N	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	145 to 180
85 N	180W, 150W, 120W, ..., 90E, 120E, 150E	181 to 192
Band 10		
60 S	180W, 175W, 170W, ..., 165E, 170E, 175E	1 to 72
65 S	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	73 to 108
70 S	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	109 to 144
75 S	180W, 170W, 160W, ..., 150E, 160E, 170E	145 to 180
85 S	170W, 140W, 110W, ..., 100E, 130E, 160E	181 to 192

Tabla 19. Distribución de coordenadas de los IGP mundiales según sus bloques correspondientes

ANEXO B: Localización de los IGP de WAAS

Región IGP mundial	Bit en la máscara	Latitud Norte	Longitud Este	Región IGP mundial	Bit en la máscara	Latitud Norte	Longitud Este
0	23	45.0	180.0	9	81	65.0	260.0
0	24	50.0	180.0	9	82	65.0	270.0
0	25	55.0	180.0	9	83	65.0	280.0
0	48	40.0	185.0	9	84	65.0	290.0
0	49	45.0	185.0	9	85	65.0	300.0
0	50	50.0	185.0	9	86	65.0	310.0
0	51	55.0	185.0	9	87	65.0	320.0
0	73	40.0	190.0	9	109	70.0	180.0
0	74	45.0	190.0	9	110	70.0	190.0
0	75	50.0	190.0	9	111	70.0	200.0
0	76	55.0	190.0	9	112	70.0	210.0
0	93	15.0	195.0	9	113	70.0	220.0
0	94	20.0	195.0	9	114	70.0	230.0
0	95	25.0	195.0	9	115	70.0	240.0
0	97	35.0	195.0	9	116	70.0	250.0
0	98	40.0	195.0	9	117	70.0	260.0
0	99	45.0	195.0	9	118	70.0	270.0
0	100	50.0	195.0	9	119	70.0	280.0
0	101	55.0	195.0	9	120	70.0	290.0
0	118	15.0	200.0	9	121	70.0	300.0
0	119	20.0	200.0	9	122	70.0	310.0
0	120	25.0	200.0	9	123	70.0	320.0
0	122	35.0	200.0	9	145	75.0	180.0
0	123	40.0	200.0	9	146	75.0	190.0
0	124	45.0	200.0	9	147	75.0	200.0
0	125	50.0	200.0	9	148	75.0	210.0
0	126	55.0	200.0	9	149	75.0	220.0
0	143	15.0	205.0	9	150	75.0	230.0
0	144	20.0	205.0	9	151	75.0	240.0
0	145	25.0	205.0	9	152	75.0	250.0
0	147	35.0	205.0	9	153	75.0	260.0
0	148	40.0	205.0	9	154	75.0	270.0
0	149	45.0	205.0	9	155	75.0	280.0
0	150	50.0	205.0	9	181	85.0	180.0
0	151	55.0	205.0	9	182	85.0	210.0
0	168	15.0	210.0	9	183	85.0	240.0
0	169	20.0	210.0	9	184	85.0	270.0

Tabla 20. Fragmento de la localización de los IGP utilizados por WAAS en MAAST

ANEXO C: Localización de los IGP de EGNOS

Región IGP mundial	Bit en la máscara	Latitud Norte	Longitud Este
2	78	85.0	270.0
3	25	55.0	300.0
3	26	65.0	300.0
3	27	75.0	300.0
3	50	55.0	305.0
3	71	30.0	310.0
3	72	35.0	310.0
3	73	40.0	310.0
3	74	45.0	310.0
3	76	55.0	310.0
3	77	65.0	310.0
3	78	75.0	310.0
3	95	25.0	315.0
3	96	30.0	315.0
3	97	35.0	315.0
3	98	40.0	315.0
3	99	45.0	315.0
3	100	50.0	315.0
3	101	55.0	315.0
3	120	25.0	320.0
3	121	30.0	320.0
3	122	35.0	320.0
3	123	40.0	320.0
3	124	45.0	320.0
3	125	50.0	320.0
3	126	55.0	320.0
3	127	65.0	320.0
3	128	75.0	320.0
3	144	20.0	325.0
3	145	25.0	325.0
3	146	30.0	325.0
3	147	35.0	325.0
3	148	40.0	325.0
3	149	45.0	325.0
3	150	50.0	325.0
3	151	55.0	325.0
3	168	15.0	330.0

Región IGP mundial	Bit en la máscara	Latitud Norte	Longitud Este
5	171	30.0	50.0
5	172	35.0	50.0
5	173	40.0	50.0
5	174	45.0	50.0
5	175	50.0	50.0
5	176	55.0	50.0
5	177	65.0	50.0
5	178	75.0	50.0
5	194	20.0	55.0
5	195	25.0	55.0
5	196	30.0	55.0
5	197	35.0	55.0
5	198	40.0	55.0
5	199	45.0	55.0
5	200	50.0	55.0
5	201	55.0	55.0
6	19	25.0	60.0
6	20	30.0	60.0
6	21	35.0	60.0
6	22	40.0	60.0
6	23	45.0	60.0
6	24	50.0	60.0
6	25	55.0	60.0
6	26	65.0	60.0
6	27	75.0	60.0
6	45	30.0	65.0
6	46	35.0	65.0
6	47	40.0	65.0
6	48	45.0	65.0
6	49	50.0	65.0
6	50	55.0	65.0
6	75	55.0	70.0
6	76	65.0	70.0
6	77	75.0	70.0
6	126	65.0	80.0
6	127	75.0	80.0
6	178	85.0	90.0

Tabla 21. Fragmento de la localización de los IGP utilizados por EGNOS en MAAST

ANEXO D: Localización de las estaciones RIMS consideradas para EGNOS

Latitud	Longitud	Localización
56.8	10.0	Alberg (Dinamarca)
38.3	-28.0	Islas Azores (Portugal)
13.03	77.50	Bangalore (India)
52.32	13.25	Berlín (Alemania)
27.92	-15.38	Islas Canarias (España)
37.47	15.07	Catania (Italia)
52.0	-8.0	Cork (Irlanda)
34.0	11.0	Djerba (Túnez)
65.17	-14.27	Egilsstadir (Islandia)
31.05	28.52	El Daba (Egipto)
60.7	17.1	Gävle (Suecia)
55.7	-4.1	Glasgow (Reino Unido)
39.48	32.48	Golbasi (Turquía)
-25.9	27.7	Hartebeeshoek (Sudáfrica)
69.41	30.02	Kirkenes (Noruega)
5.10	-52.4	Kourou (Guyana Francesa)
61.04	28.15	Lappeenranta (Finlandia)
38.5	-9.0	Lisboa (Portugal)
32.4	-17.1	Madeira (Portugal)
36.7	-4.5	Málaga (España)
46.072	-64.77	Moncton (Canadá)
20.54	-17.01	Nouadhibou (Mauritania)
39.55	2.73	Palma de Mallorca (España)
48.0	2.50	París (Francia)
64.1	-21.6	Reykjavik (Islandia)
42.0	14.0	Roma Fucino (Italia)
42.8	-8.3	Santiago de Compostela (España)
37.9	13.2	Scanzano (Italia)
29	1.20	Singapur (Singapur)
43.0	23.0	Sofía (Bulgaria)
50.53	-1.17	Swanwick (Reino Unido)
43.42	1.50	Toulouse (Francia)
31.8	34.8	Tel Aviv (Israel)
52.2	21.0	Varsovia (Polonia)

Tabla 22. Localización de las RIMS registradas en MAAS

ANEXO E: Mapas de disponibilidad de SBAS actuales

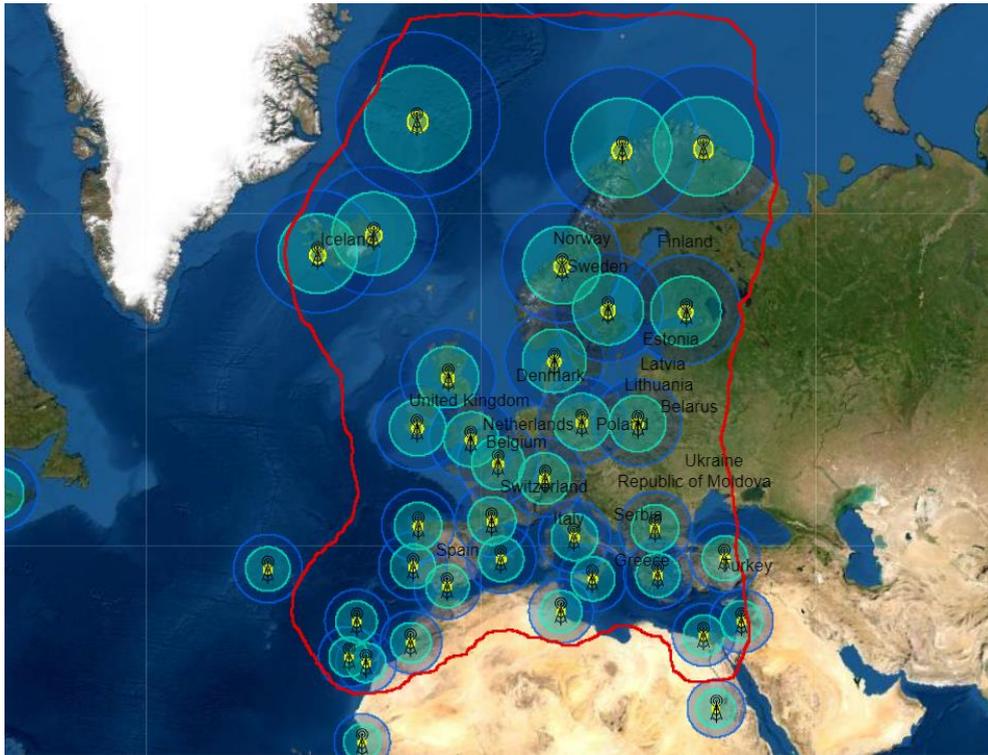


Ilustración 51. Contorno de disponibilidad para aproximaciones de precisión de EGNOS

WAAS LPV Coverage Contours
04/07/21
Week 2152 Day 3

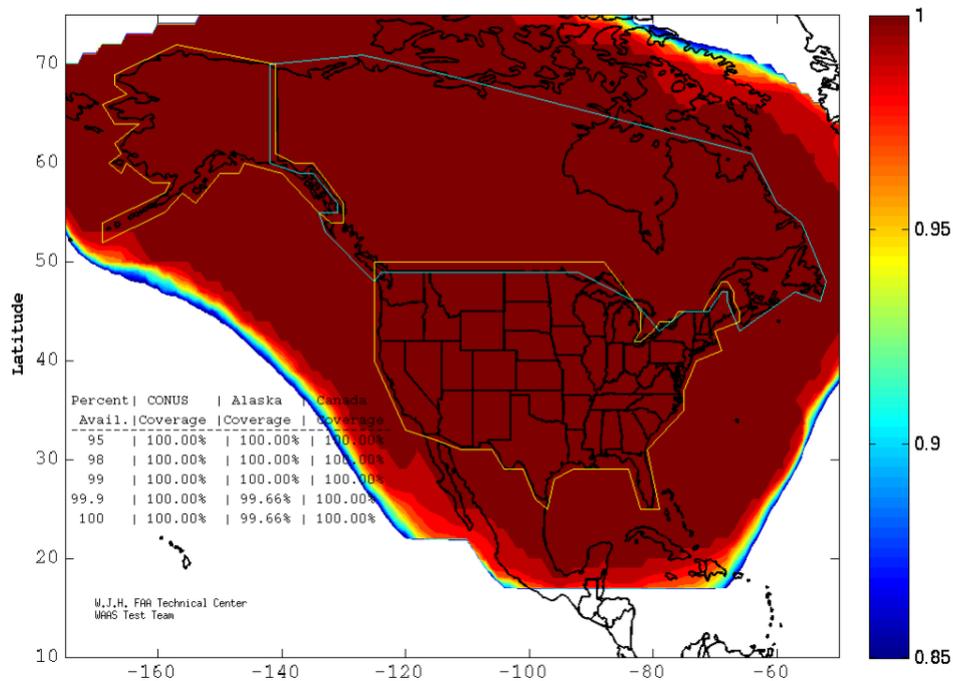


Ilustración 52. Disponibilidad para aproximaciones de precisión de WAAS

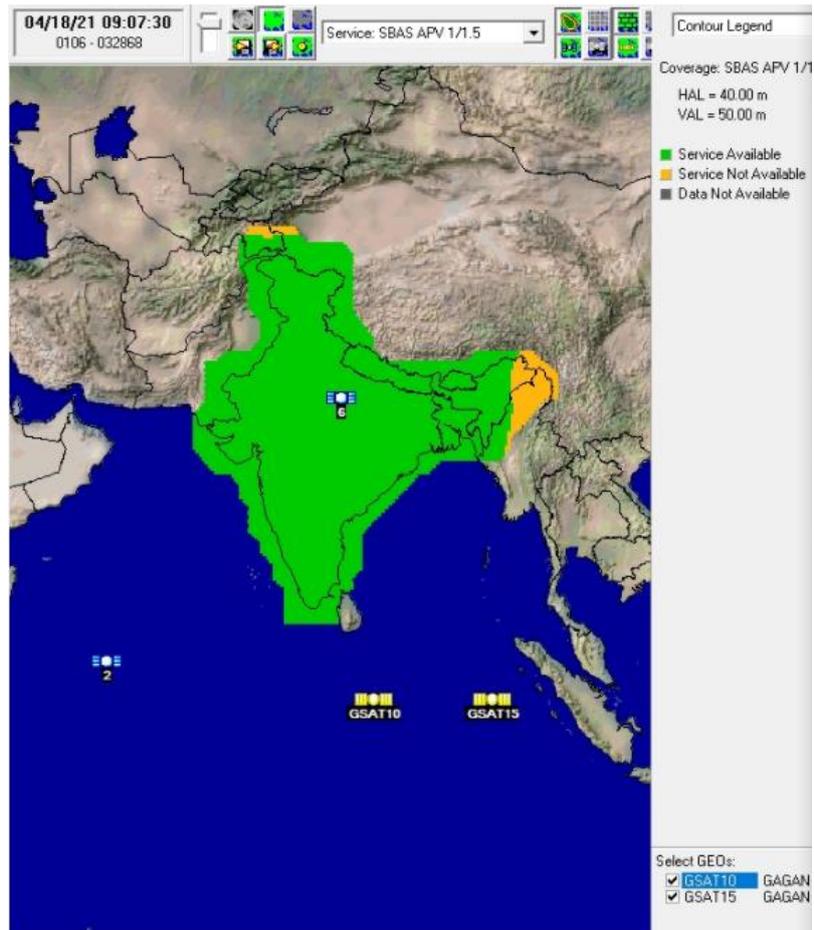


Ilustración 53. Disponibilidad para aproximaciones APV-I de GAGAN

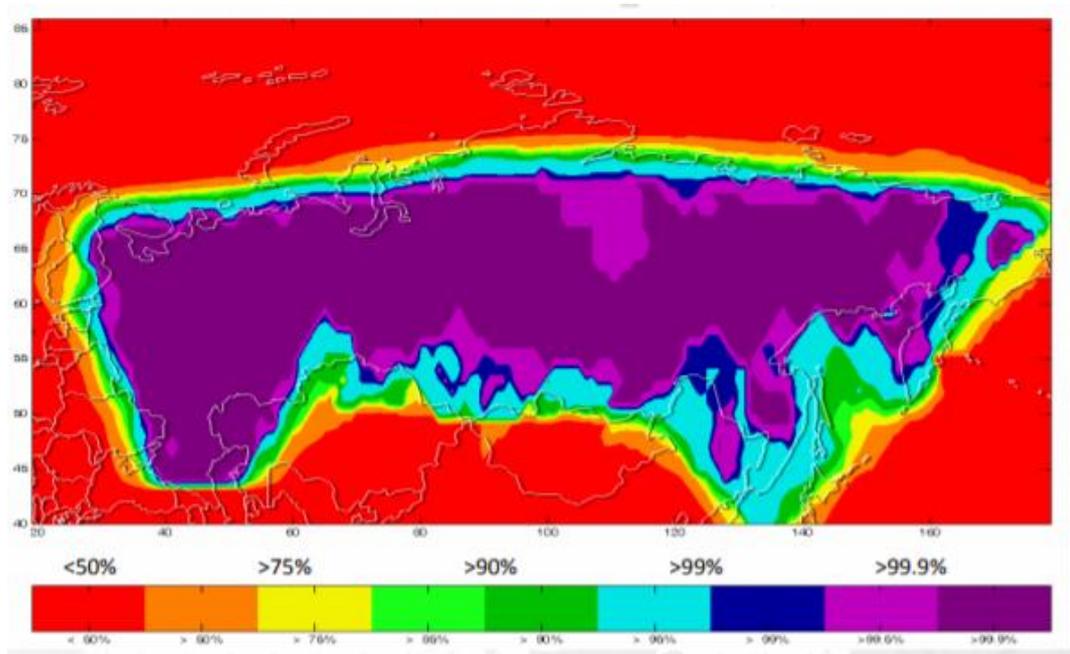


Ilustración 54. Disponibilidad para aproximaciones de precisión de SDCM (2015)

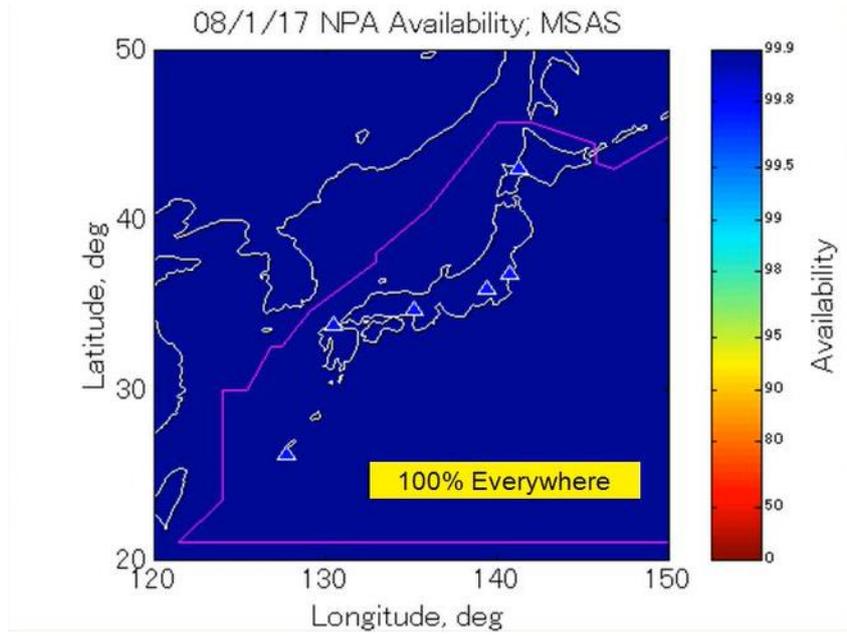


Ilustración 55. Disponibilidad para aproximaciones de no precisión de MSAS

ANEXO F: Código de MATLAB asociado a la visualización de la región definida en MT27

Script principal

```
1 -   clc; clear all; close all;  
2 -   addpath(' ../kml', ' ../geo');  
3  
4 -   %% Coordenadas de los vértices  
5 -   %Coordenada 1  
6 -   region(1).lat = sex2dec('720000N');  
7 -   region(1).lon= sex2dec('0400000E');  
8  
9 -   %Coordenada 2  
10 -  region(3).lat = sex2dec('200000N');  
11 -  region(3).lon= sex2dec('0400000W');  
12  
13 -  %Coordenada 3  
14 -  region(2).lat = sex2dec('720000N');  
15 -  region(2).lon= sex2dec('0400000W');  
16  
17 -  %Coordenada 4  
18 -  region(4).lat = sex2dec('200000N');  
19 -  region(4).lon= sex2dec('0400000E');  
20 -  %% Altitud de los vértices  
21 -  for i=1:length(region)  
22 -      region(i).alt=1000;  
23 -  end  
24 -  %% Atributos de la superficie  
25 -  attr.label='Region MT27';  
26 -  attr.labelscale=1;  
27 -  attr.labelcolor='ffffeeee';  
28 -  attr.iconurl='http://maps.google.com/mapfiles/kml/paddle/wht-circle.png';  
29 -  attr.iconscale=1.0;  
30 -  attr.extrude=true;  
31  
32 -  % Upper surface  
33 -  attr.color='225500ff';  
34 -  attr.fill=true;  
35 -  attr.altmode='clampToGround'; %'clampToGround', 'relativeToGround'  
36  
37 -  % Edges  
38 -  attr.edgewidth=1;  
39 -  attr.edgecolor='ffffffff';  
40  
41 -  kmlwrite_polygon(region, 'Region_MT27.kml', attr);
```

Ilustración 56. Código del script principal de MATLAB para la visualización del mensaje tipo 27

Función de conversión de coordenadas “sex2dec”

```
1  function x=sex2dec(rfs)
2
3  if upper(rfs(1))>=65
4      x=sextodec1(rfs);
5  else
6      x=sextodec2(rfs);
7  end
8  end
9
10 function x=sextodec1(rfs)
11 % Format 'N039°29''22.00"
12 % Format 'W028°30''54.00"
13 try
14     deg=str2num(rfs(2:4));
15     min=str2num(rfs(6:7));
16     seg=str2num(rfs(9:13));
17     x=deg+min/60+seg/3600;
18     if rfs(1)=='W' || rfs(1)=='S'
19         x=-x;
20     elseif isempty(deg) || isempty(min) || isempty(seg)
21         x=[];
22     end
23 catch
24     x=[];
25 end
26 end
27
28 function x=sextodec2(dms)
29 % Format 402959N / ddmms for latitude
30 % Format 0005020W / ddmms for longitude
31 % dms=dms(end-6:end);
32 try
33     p=upper(dms(end));
34     if p=='W' || p=='E'
35         deg=str2num(dms(1:3));
36         min=str2num(dms(4:5));
37         sec=str2num(dms(6:end-1));
38     else
39         deg=str2num(dms(1:2));
40         min=str2num(dms(3:4));
41         sec=str2num(dms(5:end-1));
42     end
43     x=deg+min/60+sec/3600;
44     if p=='W' || p=='S'
45         x=-x;
46     elseif isempty(deg) || isempty(min) || isempty(sec)
47         x=[];
48     end
49 catch
50     x=[];
51 end
52 end
```

Ilustración 57. Código de conversión de formato de coordenadas de MATLAB

ANEXO G: Aproximaciones LPV en función del año en Estados Unidos

Año de publicación inicial	Número de aproximaciones LPV publicadas
2003	5
2004	41
2005	255
2006	312
2007	334
2008	390
2009	531
2010	405
2011	404
2012	293
2013	356
2014	151
2015	114
2016	150
2017	149
2018	100
2019	50
2020	34

Tabla 23. Aproximaciones LPV publicadas en Estados Unidos según el año de publicación inicial

La información ha sido extraída de la tabla que contiene toda la información sobre las aproximaciones LPV de Estados Unidos, accesible en la página web de la FAA [43]. El número de aproximaciones asociadas a cada año de publicación inicial se determina con un recuento de las filas del documento tras filtrar las aproximaciones para cada uno de los años, sabiendo que el primer año de publicación es 2003.

ANEXO H: Operaciones totales en aeropuertos estadounidenses en función del año

Año	Operaciones totales en aeropuertos estadounidenses
2003	62,649,415
2004	63,044,647
2005	62,664,540
2006	61,274,959
2007	61,050,336
2008	57,686,267
2009	52,239,072
2010	51,278,629
2011	50,598,454
2012	50,264,308
2013	50,015,348
2014	49,625,102
2015	49,726,875
2016	50,132,284
2017	50,628,476
2018	51,993,809
2019	53,778,227
2020	42,018,414

Tabla 24. Operaciones totales en aeropuertos estadounidenses según el año

La información ha sido extraída de la plataforma del Sistema de Actividad de Tráfico Aéreo de la FAA (abreviado ATADS en inglés), en el apartado de operaciones en aeropuertos [45]. Los parámetros establecidos para la selección de datos en la plataforma son los siguientes:

Output

- Display: Standard report
- Options: Show Itinerant + Show Local
- Format: MS Excel

Dates

- From: 2003
- To: 2020
- Calendar year
- All days

Facilities: Sin selección (All airports)

Filters: No filters

Groupings: Date

ANEXO I: Tráfico anual de pasajeros internacionales en Estados Unidos en función del año

Año	Tráfico de pasajeros internacionales en Estados Unidos	Incremento con respecto al año anterior
2003	125,794,083	0.2%
2004	141,370,494	12.38%
2005	150,112,493	6.18%
2006	155,016,510	3.27%
2007	160,847,762	3.76%
2008	160,600,669	-0.15%
2009	151,536,388	-5.64%
2010	160,163,877	5.69%
2011	166,423,155	3.91%
2012	173,730,529	4.39%
2013	182,208,001	4.88%
2014	191,682,766	5.20%
2015	204,008,411	6.43%
2016	215,429,884	5.60%
2017	226,977,312	5.36%
2018	239,243,247	5.40%
2019	243,996,012	1.99%
2020	143,310,511	-41.27%

Tabla 25. Tráfico de pasajeros internacionales en Estados Unidos según el año

La información ha sido extraída de los informes anuales del departamento de transporte de los Estados Unidos correspondientes al mes de diciembre de cada año [46]. Cada uno de estos informes contiene el tráfico de pasajeros internacionales del mismo año y de los dos años anteriores. Además, las cifras de un mismo año varían ligeramente entre el informe de ese mismo año y los informes de los dos años posteriores. Por lo tanto, para cada año, se ha elegido siempre el valor que figura en el último informe. Por ejemplo, el valor correspondiente al año 2006 se ha obtenido del informe de 2008, ya que se entiende que es un valor más representativo del valor real. El último informe correspondiente al mes de diciembre es el de 2019, por lo que los valores de 2018 y 2019 se han obtenido a partir de ese mismo.

En cuanto a 2020, el informe más reciente es el de septiembre de 2020, por lo que el valor que figura es una proyección del tráfico anual registrado hasta septiembre, aplicándole un incremento de 0.30583. Este incremento es la proporción del tráfico entre octubre y diciembre de 2019 sobre el total del tráfico anual obtenido hasta septiembre de 2019. Debido a la irregularidad del tráfico aéreo observado a lo largo de 2020, no es seguro que esta proyección refleje el valor real obtenido una vez se publique el informe de diciembre de 2020, por lo que este valor es puramente ilustrativo.

Intervalo de tiempo	Tráfico de pasajeros internacionales en Estados Unidos
enero 2020 - septiembre 2020	109,746,683
octubre 2020 - diciembre 2020 (proyección)	33,563,828
Total 2020	143,310,511

Tabla 26. Proyección del tráfico de pasajeros internacionales en Estados Unidos para los últimos tres meses de 2020

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Stanford Engineering. (2001). *Matlab Algorithm Availability Simulation Tool – User’s Guide*. Versión 0.1. Stanford (Estados Unidos).
- [2] Stanford Engineering. (2019). *Chapter 14 Satellite Based Augmentation Systems (SBAS)*. Stanford (Estados Unidos).
- [3] Nie, Z. Zhou, P. Liu, F. Wang, Z. Gao, Y. (2019). *Evaluation of Orbit, Clock and Ionospheric Corrections from Five Currently Available SBAS L1 Services: Methodology and Analysis*. Qingdao (China).
- [4] Walter, T. Blanch, J. Enge, P. (2021). *Coverage Improvement for Dual Frequency SBAS*. Stanford (Estados Unidos).
- [5] Bakry El-Arini, M. (2008). *Tropospheric Corrections for GNSS Receivers*. Santiago (Chile).
- [6] RTCA, Inc. (2006). *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning system/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment – RTCA DO-229D*. Washington, D.C. (Estados Unidos)
- [7] Página web oficial de SDCM. *Control de la Exactitud de la Información Correctiva*. Último acceso: marzo 2021. Disponible en:
<https://sdcm.ru/%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8C/?uid=2>
- [8] Roturier, B. Chatre, E. Ventura-Traveset, J. (2006). *The SBAS Integrity Concept Standardised by ICAO. Application to EGNOS*. Bruselas (Bélgica).
- [9] Página web oficial de EGNOS. *Rendimiento histórico del servicio “Safety of Life”*. Último acceso: abril 2021. Disponible en:
https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/services/safety-life-service/historical
- [10] Página web oficial de FAA. *Gráfico de Disponibilidad LPV de las Últimas 24 Horas*. Último acceso: abril 2021. Disponible en:
https://www.nstb.tc.faa.gov/24Hr_WaasLPV.htm
- [11] Sernov, V. (2015). *GNSS GLONASS Augmentation System-SDCM. Status and Development*. Krasnoyarsk (Rusia).
- [12] Página web oficial de GAGAN. *Servicios APV-1 y RNP 0.1 en Tiempo Real*. Último acceso: abril 2021. Disponible en:
<http://gagan.aai.aero/gagan/content/apv-1-rnp-01-services>
- [13] Página web oficial de MLIT. *Sistema Aeronáutico de Satélites*. Último acceso: abril 2021. Disponible en:
https://www.mlit.go.jp/koku/15_hf_000105.html
- [14] ICAO. (2016). *Global Air Navigation Plan – Doc 9750-AN/963*. Quinta edición. Montreal (Canadá).
- [15] IWG. (2020). *Global SBAS Status*. Delhi (India).
- [16] Página web oficial de QZSS. *Índice mundial de satélites de posicionamiento*. Último acceso: abril 2021. Disponible en:
<https://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html>

- [17] National Coordination Office for Space-Based Positioning. (2020). *L1 C/A PRN Code Assignments*. Edición Octubre 2020. Washington D.C. (Estados Unidos).
- [18] Space and Missiles Systems Center. (2020). *NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces – IS-GPS-200*. Revisión L, 14 mayo 2020. El Segundo (Estados Unidos).
- [19] Página web oficial de EGNOS. *Información sobre EDAS*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/services/about-edas
- [20] Wikipedia (autores variados). (2021). *Lista de satélites GPS*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_GPS_satellites
- [21] ICAO. (2018). *DFMC SBAS SARP Sub Group (DS2) Part B – DS2/WP*. Versión 2.0. Montreal (Canadá).
- [22] EndRun Technologies. (2021). *Segundos intercalares*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
<https://endruntechnologies.com/support/leap-seconds>
- [23] Página web oficial de EGNOS. *Tiempo real*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/egnos_system_realtime
- [24] Inside GNSS. (2020). *SBAS Interoperability – The Latest Developments*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
<https://insidegnss.com/sbas-interoperability-the-latest-developments/>
- [25] Página web oficial de FAA. (2020). *Navegación satelital – WAAS*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/
- [26] Página web oficial de ESA. *Datos sobre ESA*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: http://www.esa.int/About_Us/Corporate_news/ESA_facts
- [27] Página web oficial de AAI. *Organización de AAI*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: <https://www.aai.aero/en/corporate/organization>
- [28] Página web oficial de JRANSA. *Objetivos y funciones*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
<http://www.jransa.or.jp/jigyuu/gaiyou2.html>
- [29] ICAO. (2018). *MSAS Status and Future Plan – AN-Conf/13-WP/249*. Montreal (Canadá).
- [30] Página web oficial de RSS. *Estructura*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
<http://russianspacesystems.ru/holding/struktura/#1461870837761-4b5e56ba-d1d8>
- [31] Página web oficial de CSNO. *Sobre la organización*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en:
<http://www.csno-tarc.cn/>
- [32] Página web oficial de KARI. *Sobre nosotros*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: https://www.kari.re.kr/kor/sub01_01.do

- [33] Página web oficial de Geoscience Australia. *Nuestros proyectos*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: <https://www.ga.gov.au/about/projects>
- [34] Página web oficial de LINZ. Varios apartados consultados. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: <https://www.linz.govt.nz/>
- [35] Página web oficial de ASECNA. *Presentación/Misiones*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: <https://asecnaonline.asecna.aero/index.php/fr/2014-03-31-16-47-51/2014-03-31-16-53-08/presentation-missions>
- [36] FAA. (2020). *SatNav News – Volume 68*. Edición invierno 2020. Washington D.C. (Estados Unidos).
- [37] Oxley, A. (2017). *Uncertainties in GPS Positioning – Chapter 5 – GPS Modernization*. Primera edición.
- [38] SpaceWeatherLive. (2006). *Archivo de la actividad solar del miércoles 6 de diciembre de 2006*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2006/12/06/xray.html>
- [39] Cerruti, A.P. Kintner Jr., P.M. Gary, D.E. Manucci, A.J. Meyer, R.F. Doherty, P. Coster, A.J. (2008). *Effect of Intense December 2006 Solar Radio Bursts on GPS Receivers*. Nueva York (Estados Unidos).
- [40] Quintanilla García, I. (2020). *Conceptos Generales DOP – Ingeniería Aeroespacial – Universidad Politécnica de Valencia*. Valencia (España).
- [41] ICAO NSP. (2018). *Concept of Operations for Dual-Frequency Multi-Constellation Global Navigation Satellite System*. CONOPS versión 6.4. Montreal (Canadá).
- [42] Won, D. (2016). *SBAS DFMC 도입의 의미*. Daejeon (República de Corea).
- [43] Página web oficial de FAA. *Navegación satelital – Aproximaciones GPS/WAAS*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/approaches/
- [44] Página web oficial de EGNOS. *Mapa de procedimientos LPV*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/resources-tools/lpv-procedures-map
- [45] Página web oficial de ATADS/Operations Network. *Operaciones en aeropuertos*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: <https://aspm.faa.gov/opsnet/sys/Airport.asp>
- [46] Página web oficial del Departamento de Transporte de los Estados Unidos. *Informes estadísticos del tráfico aéreo internacional de pasajeros y mercancías en los Estados Unidos*. Último acceso: mayo 2021. Disponible en: <https://www.transportation.gov/policy/aviation-policy/us-international-air-passenger-and-freight-statistics-report>

[47] Ministry of Civil Aviation – Government of India. (2016). *National Civil Aviation Policy*. Nueva Delhi (India).

[48] MathWorks. (2020). *System Requirements – Release 2020a – Windows*. Natick (Estados Unidos).

[49] Google Earth Help. *Instalar y Desinstalar Google Earth Pro – Requisitos del Sistema*. Último acceso: junio 2021. Disponible en:

<https://support.google.com/earth/answer/21955?hl=en#zippy=%2Cwindows-system-configuration>

[50] Furquet Gascón, M.C. (2016). *Estudio y análisis de la certificación y diseño de un SBAS (Satellite Based Augmentation System) para aeropuertos/heliódromos*. Valencia (España).