

CURSO 2017/2018



TRABAJO DE FIN DE GRADO



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Metodología operacional para la validación y el diseño de procedimientos en aeropuertos con sistema EGNOS

Autor: Joaquín Campos Clemente

Fecha: julio de 2018

Tutor: Ph. D. Israel Quintanilla García

Cotutor: Ph. D. Pedro Yuste Pérez

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

RESUMEN

Este trabajo fin de grado trata sobre la metodología operacional para validar y diseñar procedimientos en aeropuertos con sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS). Más en concreto, se tratará en profundidad dicha metodología en aeródromos con sistema EGNOS, el SBAS europeo.

El proceso de validación que se estudiará se llevará a cabo haciendo uso de los datos de la antena GNSS de Mallorca.

Para llevar a cabo este proceso de validación a largo y corto plazo, se expondrán los fundamentos teóricos de los sistemas GNSS que existen en la actualidad incluyendo sus características técnicas, prestaciones, evolución histórica, etcétera. Además se realizará una explicación sobre los sistemas de aumentación actuales haciendo especial hincapié en los SBAS, y más concretamente en EGNOS. Se analizarán sus fundamentos matemáticos, estructura funcional, mensaje de navegación y prestaciones de cara a saber si es posible que cumpla con los requisitos establecidos por la OACI para la navegación PBN.

Por último, con ayuda de los informes del ESSP y cierto software específico de procesamiento de datos, se llevarán a cabo los primeros pasos de la validación de los procedimientos, dejando para otros proyectos las fases finales de ensayos de vuelos reales.

Palabras clave: EGNOS, SBAS, GNSS, aeronavegación, PBN, validación, diseño de procedimientos

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas me gustaría hacer un pequeño agradecimiento a las personas e instituciones que me han apoyado durante mi etapa universitaria que culmina con la realización y defensa de este trabajo fin de grado.

En primer lugar, me gustaría agradecer a la Universitat Politècnica de València las herramientas y recursos que me han otorgado para mi formación como ingeniero. Quiero hacer una especial mención a mi escuela, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño y a la gran mayoría de su personal docente que se ha preocupado por nuestra educación y se ha implicado fuertemente en nuestro desarrollo educativo y profesional.

Por supuesto, quiero destacar la convivencia con mis compañeros de promoción que siempre han estado cerca en las épocas amargas y en los momentos más alegres. En especial, gracias a Paula, Ángela, Javier, Jesús y Mario. A pesar de que pasen etapas en que no estemos físicamente juntos, sé que nunca nos separaremos.

No puedo olvidarme del tutor de este trabajo, el Dr. Israel Quintanilla García, que desde el primer momento que lo conocí me inspiró una gran fuente de conocimientos y su gran pasión por la aeronavegación y las técnicas más vanguardistas en el sector de la navegación aérea.

En el ámbito personal, quiero agradecer a mi familia, especialmente a mis padres, todos los esfuerzos que han realizado para que sea una persona educada y con la mejor de las formaciones. Gracias por lo que me habéis transmitido y por la pasión y orgullo con los que habéis seguido cada paso que he dado en mi vida. Todo lo que soy es gracias a vosotros.

Por último, no puedo olvidarme de la persona más especial de mi vida. Gracias Sonia por caminar conmigo, por dar luz a mis días más oscuros y por nunca tener miedo a recorrer nuevos caminos juntos.

OBJETIVOS

La realización de este trabajo tiene como objetivo principal llevar a cabo una simulación del proceso de validación y certificación de procedimientos en aeropuertos con EGNOS.

Para poder cumplir satisfactoriamente con el objetivo principal, se establecen una serie de objetivos secundarios:

- Presentar las distintas constelaciones GNSS del planeta, así como su funcionamiento básico y su evolución histórica.
- Analizar los tipos de sistemas de aumentación disponibles en navegación por satélite.
- Estudiar en profundidad los sistemas de aumentación basados en satélites, haciendo especial hincapié en EGNOS, el SBAS europeo. Dado que EGNOS es la piedra angular de este proyecto, se establece como objetivo un análisis exhaustivo de su arquitectura interna, sus servicios, los mensajes que transmite, etc.
- Introducir el concepto de navegación PBN, incluyendo la explicación de los requisitos que existen e indicando claramente cuales son los valores impuestos por la OACI para cada tipo de operación.

Solamente una vez cumplidos estos objetivos secundarios se podrá acceder a la consecución del objetivo principal. Para llevar a cabo el proceso de validación habrá que realizar tres etapas: una toma de datos a largo plazo, una toma de datos a corto plazo y una fase final de ensayos de vuelo, la cual no será objeto de este trabajo fin de grado.

ÍNDICE

Resumen	3
Agradecimientos	4
Objetivos	5
Índice	6
Listado de acrónimos	9
Listado de figuras	12
Listado de tablas	14

BLOQUE I: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

0. Introducción	16
1. Sistemas GNSS	18
1.1. Descripción	18
1.2. Constelaciones GNSS	20
1.2.1. GPS-NAVSTAR	20
1.2.2. GLONASS	22
1.2.3. GALILEO	26
1.2.4. BeiDou COMPASS	33
1.2.5. NAVIC	34
1.2.6. QZSS	35
2. Sistemas de aumentación	37
3. SBAS	40
3.1. Fundamentos matemáticos	41
3.2. SBAS actuales	42
3.2.1. EGNOS	42
3.2.2. WAAS	42
3.2.3. MSAS	43
3.2.4. GAGAN	43
4. EGNOS	44
4.1. Introducción	44
4.2. Arquitectura	44
4.2.1. Segmento espacial	45
4.2.2. Segmento terrestre	46
4.2.3. Segmento usuario	47

4.3. Tratamiento de datos	48
4.3.1. Ciclo de procesamiento.....	48
4.3.2. Ciclo de validación	49
4.4. Mensajes de EGNOS.....	50
4.4.1. Estructura.....	50
4.4.2. Tipos de mensajes	50
4.4.2.1. Mensajes de información del satélite	52
4.4.2.1. Mensajes de información ionosférica	54
4.4.2.1. Otros mensajes	55
4.5. Servicio de EGNOS	56
4.5.1. <i>Open Service (OS)</i>	56
4.5.2. <i>Safety of Life (SoL)</i>	56
4.5.3. <i>EGNOS Commercial Data Distribution Service</i>	56
5. PBN	57
5.1. Requisitos PBN.....	58
5.1.1. Precisión	58
5.1.2. Integridad	58
5.1.3. Continuidad	60
5.1.4. Disponibilidad.....	61
5.1.5. Recopilación numérica de requisitos PBN	61
 BLOQUE II: VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS	
6. Validación de procedimientos con EGNOS	64
6.1. Resultados a largo plazo	64
6.1.1. Precisión	64
6.1.2. Integridad	65
6.1.3. Continuidad	66
6.1.4. Disponibilidad.....	67
6.1.5. Conclusiones de la toma de datos a largo plazo	68
6.2. Resultados a corto plazo	69
6.2.1. 18 de junio de 2018.....	69
6.2.2. 19 de junio de 2018.....	73

6.2.3. 20 de junio de 2018.....	77
6.2.4. 21 de junio de 2018.....	81
6.2.5. 22 de junio de 2018.....	85
6.3. Ensayos de vuelo.....	88
7. Conclusiones	89
8. Bibliografía	90
BLOQUE III: PLIEGO DE CONDICIONES Y PRESUPUESTO	
9. Pliego de condiciones.....	93
9.1. Condiciones generales	93
9.1.1. General	93
9.1.2. Real Decreto 488/1997 de 14 de abril	94
9.2. Condiciones de especificaciones técnicas.....	100
9.2.1. Especificaciones de materiales y equipos	100
10. Presupuesto.....	101
10.1. Introducción	101
10.2. Estado de las mediciones	102
10.3. Costes unitarios	102
10.4. Coste total	103

LISTADO DE ACRÓNIMOS

AAIM	<i>Aircraft Autonomous Integrity Monitoring</i>
ABAS	<i>Aircraft Based Augmentation System</i>
AL	<i>Alert Limit</i>
AOR	<i>Atlantic Ocean Region</i>
A/S	<i>Anti-Spoofing</i>
APV-I	<i>Non-precision Approach with Vertical Guidance</i>
ASQF	<i>Application Specific Qualification Facility</i>
C	<i>Civil</i>
C/A	<i>Coarse and Acquisition</i>
CFF	<i>Central Control Facility</i>
CDDS	<i>Commercial Data Distribution Service</i>
C/NAV	<i>Commercial Navigation Message</i>
CONUS	<i>Contiguous United States</i>
CS	<i>Control Segment</i>
CS	<i>Commercial Service</i>
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DVP	<i>Development & Verification Platform</i>
EDAS	<i>EGNOS Data Access Service</i>
EEUU	<i>Estados Unidos</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
ENT	<i>EGNOS Network Time</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESSP	<i>European Satellite Services Provider</i>
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
ETSID	<i>Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño</i>
EWAN	<i>EGNOS Wide Area Network</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FDE	<i>Fault Detection and Exclusion</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
F/NAV	<i>Free Navigation Message</i>
GAGAN	<i>GPS Aided GEO Augmented Navigation</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GCC	<i>Galileo Control Center</i>
GCS	<i>Galileo Control System</i>
GEO	<i>Geostationary Orbit</i>
GIVD	<i>Grid Ionospheric Vertical Delay</i>
GIVE	<i>Grid Ionospheric Vertical Error</i>
GIVEI	<i>Grid Ionospheric Vertical Error Indicator</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GMS	<i>Galileo Mission System</i>
G/NAV	<i>Governmental Navigation Message</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRAS	<i>Ground-based Regional Augmentation System</i>
GRSP	<i>Galileo Reference Service Provider</i>
GSS	<i>Galileo Sensor Station</i>

GTRF	<i>Galileo Terrestrial Reference Frame</i>
HAL	<i>Horizontal Alert Limit</i>
HNSE	<i>Horizontal Navigation System Error</i>
HPE	<i>Horizontal Position Estimation</i>
HPL	<i>Horizontal Position Level</i>
HSI	<i>Horizontal Safety Index</i>
IAC	<i>International and Analysis Center</i>
IGP	<i>Ionospheric Grid Points</i>
IGS	<i>International Ground Stations</i>
IGSO	<i>Inclined GeoSynchronous Orbit</i>
I/NAV	<i>Integrity Navigation Message</i>
IODF	<i>Issue of Data Ephemeris</i>
IODF	<i>Issue of Data Fast Corrections</i>
IOR	<i>Indian Ocean Region</i>
IR	<i>Integrity Risk</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organization</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JMA	<i>Japanese Meteorological Agency</i>
LAAS	<i>Local Area Augmentation System</i>
LNAV	<i>Lateral Navigation</i>
LP	<i>Localizer Performance</i>
LPV	<i>Localizer Performance with Vertical Guidance</i>
M	<i>Militar</i>
MCC	<i>Mission Control Centers</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MOPS	<i>Minimum Operational Performance Standard</i>
MSAS	<i>MTSAT Satellite Augmentation System</i>
MTSAT	<i>Multi-functional Transport Satellites</i>
NAVIC	<i>Navigation Indian Constellation</i>
NLES	<i>Navigation Land Earth Stations</i>
NPA	<i>Non Precision Approach</i>
OACI	<i>Organización de Aviación Civil Internacional</i>
OS	<i>Open Service</i>
PA	<i>Precision Approach</i>
PACF	<i>Performance Assesment & Check-out Facility</i>
PBN	<i>Performance Based Navigation</i>
PE	<i>Position Error</i>
PNT	<i>Positioning, Navigation and Timing</i>
PL	<i>Protection Level</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PRC	<i>Pseudorange Corrections</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
P/Y	<i>Precision/Secure</i>
PZ-90	<i>Parametry Zemli 1990 goda</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RAIM	<i>Receiver Autonomous Integrity Monitoring</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RIMS	<i>Ranging Integrity Monitoring Stations</i>
RNAV	<i>aRea NAVigation</i>
RNP	<i>Required Navigation Performance</i>

RRC	<i>Rangerate Corrections</i>
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
SA	<i>Selected Availability</i>
SAR	<i>Search and Rescue Service</i>
SARPs	<i>Standard and Recommended Practices</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SDCM	<i>System for Differential Corrections and Monitoring</i>
SNAS	<i>Satellite Navigation Augmentation System</i>
SoL	<i>Safety of Life</i>
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
SS	<i>Space Segment</i>
TAL	<i>Time to Alert</i>
TFG	Trabajo Fin de Grado
TT&C	<i>Telemetry, Tracking and Control Station</i>
UDRE	<i>User Differential Range Error</i>
UDREI	<i>User Differential Range Error Indicator</i>
UE	Unión Europea
UERE	<i>User Equivalent Range Error</i>
ULS	<i>Galileo Uplink Stations</i>
UPV	Universitat Politècnica de València
URE	<i>User Receiver Error</i>
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
UTC	<i>Universal Time Coordinate</i>
UTCop	<i>Universal Time Clock</i>
US	<i>User Segment</i>
VAL	<i>Vertical Alert Limit</i>
VNAV	<i>Vertical Navigation</i>
VNSE	<i>Vertical Navigation System Error</i>
VPE	<i>Vertical Position Estimation</i>
VPL	<i>Vertical Position Level</i>
VSI	<i>Vertical Safety Index</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS84	<i>World Geodesic System 1984</i>

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Evolución global del número de pasajeros transportados en transporte aéreo	16
Figura 2. Status de implementación de procedimientos SBAS en Europa.....	17
Figura 3. Esquema de la arquitectura GPS	19
Figura 4. Logotipo del sistema GPS NAVSTAR	20
Figura 5. Estructura interna del mensaje GPS	21
Figura 6. Gráfica del error GPS antes y después de la desactivación de la disponibilidad selectiva	22
Figura 7. Logotipo de GLONASS	22
Figura 8. Status de la constelación de GLONASS el 11 de mayo de 2018.....	23
Figura 9. Mapa de disponibilidad del sistema GLONASS el 11 de mayo de 2018.....	23
Figura 10. Representación del URE en cada satélite GLONASS	24
Figura 11. Representación del URE de los satélites GLONASS visibles desde una ubicación concreta	24
Figura 12. Comparación valores DOP entre GPS, GLONASS y el uso de ambos conjuntamente.	24
Figura 13. Mapa con la localización de las estaciones de referencia de Galileo.	26
Figura 14. Status actual de los satélites de Galileo.....	27
Figura 15. Estructura del mensaje F/NAV	29
Figura 16. Estructura del mensaje I/NAV	30
Figura 17. Logotipo de BeiDou COMPASS	33
Figura 18. Estructura de NAVIC	34
Figura 19. Logotipo QZSS	35
Figura 20. Esquema sistemas GBAS	38
Figura 21. Mapa con los sistemas SBAS en el mundo.....	39
Figura 22. Logotipo EGNOS.....	44
Figura 23. Esquema arquitectura EGNOS	44
Figura 24. Estructura de los satélites Inmarsat	45
Figura 25. Estructura del satélite ESA-Artemis	45
Figura 26. Mapa con las instalaciones del segmento terrestre de EGNOS	47
Figura 28. Diferencias entre navegación convencional, RNAV y RNP.....	57
Figura 29. Ejemplo de Diagrama Stanford	60
Figura 30. Situaciones de integridad del sistema	60
Figura 31. Mapa de disponibilidad de EGNOS en mayo de 2018	64
Figura 32. Histograma con los valores de HSI en mayo de 2018	66
Figura 33. Histograma con los valores de VSI en mayo de 2018.....	66
Figura 34. Mapa del riesgo de continuidad en mayo de 2018.....	67
Figura 35. Mapa de disponibilidad del 18 de junio de 2018	69
Figura 36. Mapa de continuidad del 18 de junio de 2018.....	70
Figura 37. Mapa del HPL del 18 de junio de 2018	70
Figura 38. Mapa del VPL del 18 de junio de 2018.....	71
Figura 39. Gráfica del HPL y HPE del 18 de junio de 2018.....	71
Figura 40. Gráfica del VPL y VPE del 18 de junio de 2018	72
Figura 41. Mapa de disponibilidad del 19 de junio de 2018	73
Figura 42. Mapa de continuidad del 19 de junio de 2018.....	73
Figura 43. Mapa del HPL del 19 de junio de 2018	74

Figura 44. Mapa del VPL del 19 de junio de 2018.....	74
Figura 45. Gráfica del HPL y HPE del 19 de junio de 2018.....	75
Figura 46. Gráfica del VPL y VPE del 19 de junio de 2018	75
Figura 47. Mapa de disponibilidad del 20 de junio de 2018	77
Figura 48. Mapa de continuidad del 20 de junio de 2018.....	77
Figura 49. Mapa del HPL del 20 de junio de 2018	78
Figura 50. Mapa del VPL del 20 de junio de 2018.....	78
Figura 51. Gráfica del HPL y HPE del 20 de junio de 2018.....	79
Figura 52. Gráfica del VPL y VPE del 20 de junio de 2018	79
Figura 53. Mapa de disponibilidad del 21 de junio de 2018	81
Figura 54. Mapa de continuidad del 21 de junio de 2018.....	81
Figura 55. Mapa del HPL del 21 de junio de 2018	82
Figura 56. Mapa del VPL del 21 de junio de 2018.....	82
Figura 57. Gráfica del VPL y VPE del 21 de junio de 2018	83
Figura 58. Gráfica del HPL y HPE del 21 de junio de 2018.....	83
Figura 59. Mapa de disponibilidad del 22 de junio de 2018	85
Figura 60. Mapa de continuidad del 22 de junio de 2018.....	85
Figura 61. Mapa del HPL del 22 de junio de 2018	86
Figura 62. Mapa del VPL del 22 de junio de 2018.....	86
Figura 63. Gráfica del HPL y HPE del 22 de junio de 2018.....	87
Figura 64. Gráfica del VPL y VPE del 22 de junio de 2018	87

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación de los satélites GLONASS y sus señales portadoras.	25
Tabla 2. Características de los mensajes de Galileo.....	28
Tabla 3. Datos enviados en los mensajes F/NAV e I/NAV.....	29
Tabla 4. Tipos de datos enviados según el tipo de mensaje de Galileo.....	30
Tabla 5. Prestaciones del servicio abierto de Galileo.....	31
Tabla 6. Prestaciones del servicio público regulado de Galileo.....	31
Tabla 7. Prestaciones del servicio de búsqueda y rescate de Galileo.....	32
Tabla 8. Prestaciones del <i>Safety of Life</i> de Galileo.....	32
Tabla 9. Prestaciones del <i>Safety of Life</i> de Galileo.....	50
Tabla 10. Tipos de mensajes de EGNOS.....	51
Tabla 11. Valores de integridad según fase de vuelo.....	61
Tabla 12. Requerimientos de prestaciones según el tipo de operación.....	62
Tabla 13. Resultados de disponibilidad a largo plazo.....	65
Tabla 14. Resultados de precisión a largo plazo.....	65
Tabla 15. Resultados de índices de seguridad en mayo de 2018.....	67
Tabla 16. Resultados de riesgo de continuidad a largo plazo.....	68
Tabla 17. Resultados requerimientos del 18 de junio de 2018.....	72
Tabla 18. Resultados requerimientos del 19 de junio de 2018.....	76
Tabla 19. Resultados requerimientos del 20 de junio de 2018.....	80
Tabla 20. Resultados requerimientos del 21 de junio de 2018.....	84
Tabla 21. Resultados requerimientos del 22 de junio de 2018.....	88
Tabla 22. Recursos necesarios para la ejecución del proyecto.....	102
Tabla 23. Coste total del proyecto.....	103

BLOQUE I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

0. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las técnicas tradicionales de navegación aérea basadas en radioayudas continúan dominando un mercado que sigue al alza año tras año. Esta tendencia creciente en el número anual de operaciones aéreas (Figura 1) propone ciertos retos al sector a fin de aumentar la capacidad operativa total optimizando el espacio aéreo cada vez más. Esta optimización del cielo trae de la mano retos medioambientales debido al gran impacto que las emisiones provocadas por los aviones tienen en el planeta.

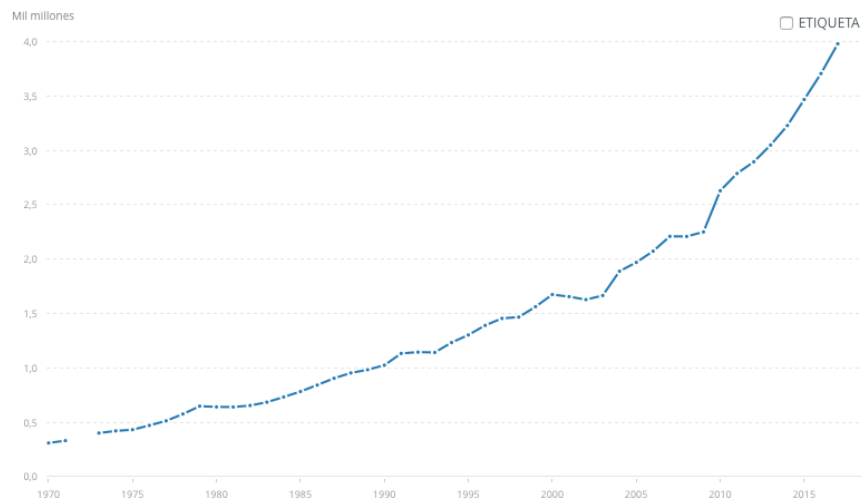


Figura 1. Evolución global del número de pasajeros transportados en transporte aéreo

El desarrollo de los sistemas de navegación GNSS como Galileo, GLONASS y GPS ha posibilitado el uso de métodos basados en navegación por satélite en operaciones aéreas. El uso de estos sistemas de navegación junto a los sistemas de aumentación (ABAS, SBAS, GBAS) permiten el cumplimiento de los requisitos impuestos por la OACI para garantizar la seguridad.

Estos sistemas de aumentación están ya implantados y actualmente nos encontramos en una fase de desarrollo, validación y diseño de procedimientos en aeródromos y helipuertos. Concretamente en Europa, la Comisión Europea junto a Eurocontrol y la ESA han apostado por el sistema de aumentación SBAS EGNOS para que en un futuro muy cercano sustituya a los métodos tradicionales como medio de navegación principal.

La implantación de EGNOS como sistema de navegación principal permitirá un uso más optimizado del espacio aéreo, lo cual se traducirá en una mayor capacidad operativa y unas rutas con trayectorias más directas que implicarán directamente una menor emisión de gases de efecto invernadero y un mayor rendimiento económico.

Este trabajo fin de grado incidirá en la evolución de los sistemas GNSS centrándose principalmente en el sistema de aumentación europeo EGNOS. Como núcleo principal se realizarán los primeros pasos para la validación de procedimientos en aeropuertos para operaciones APV-I con EGNOS, de manera que fuese posible aumentar la red de

aeródromos que ya disponen de estos procedimientos. Como se observa en la Figura 2, esta red está muy desarrollada en países como Francia y Alemania, pero no está nada consolidada en otros como España o Reino Unido, naciones sobre las cuales se enfocarán los esfuerzos en los próximos años para ampliar el uso de EGNOS como medio de navegación.

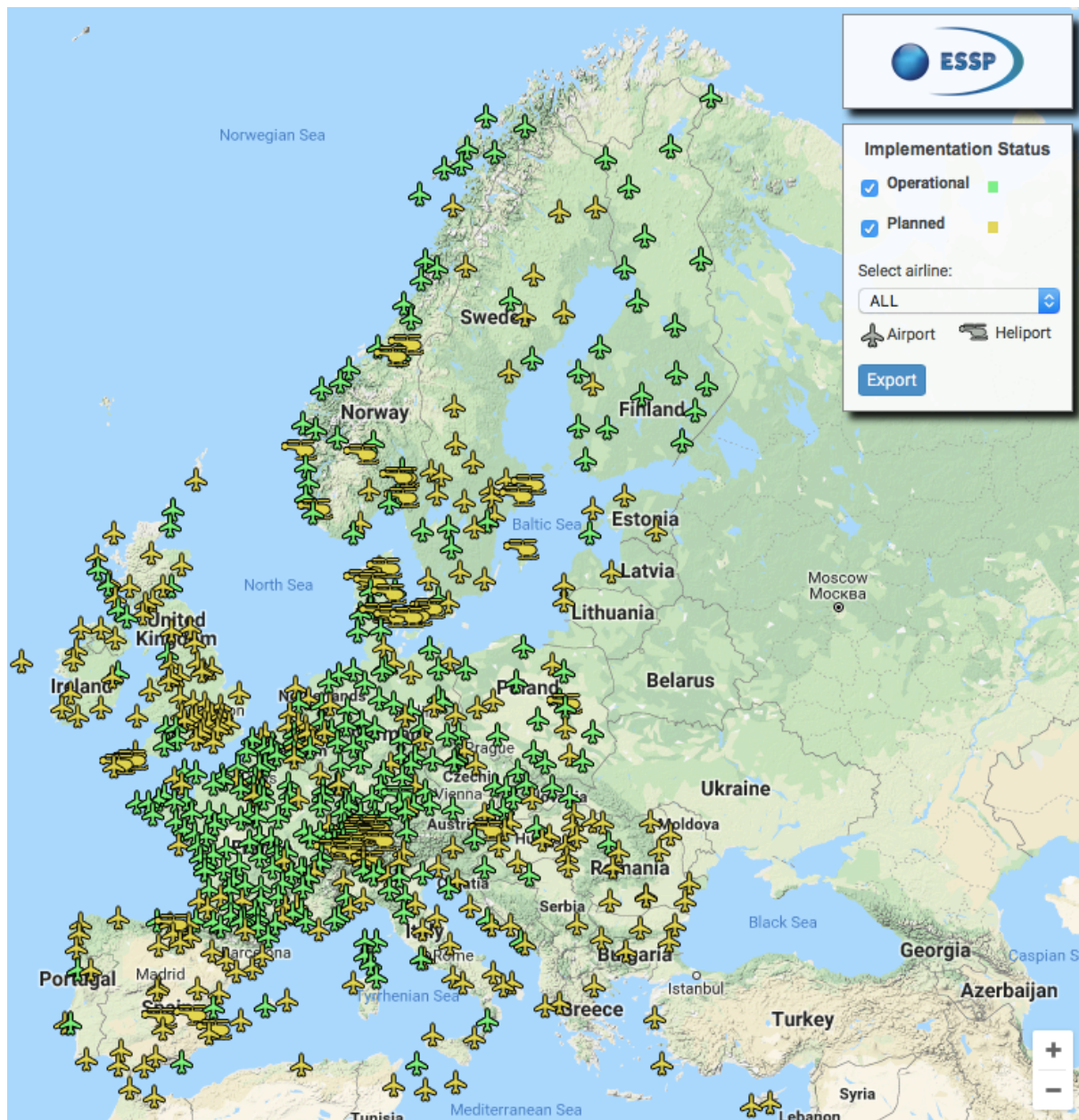


Figura 2. Status de implementación de procedimientos SBAS en Europa

1. SISTEMAS GNSS

1.1. DESCRIPCIÓN

Un sistema global de navegación por satélite (GNSS) se define como una constelación de satélites capaces de proporcionar señales desde el espacio las cuales transmiten datos de posicionamiento y tiempo a los receptores GNSS. Dichos receptores determinan sus coordenadas geográficas gracias al uso de estos datos con fines de navegación, transporte, geodésicos, hidrográficos, agrícolas y otras actividades diversas.

Estos sistemas proporcionan cobertura global a los usuarios con gran exactitud, en cualquier parte del planeta y a cualquier hora del día sin importar las condiciones climatológicas. Ejemplos de sistemas globales de navegación por satélite son el NAVSTAR *Global Positioning System* (GPS-EEUU), el *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* ruso (GLONASS-Federación Rusa), Galileo (Europa) y *BeiDou Navigation Satellite System* (China).

Los sistemas GNSS se apoyan en sistemas inerciales de posicionamiento para su funcionamiento. El más extendido es el WGS84 (*World Geodetic System 1984*). A pesar de esta tendencia, el sistema inercial de uso oficial en España es el ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) que, con todo, es totalmente compatible con el WGS84.

Los sistemas de navegación global se componen por tres segmentos bien diferenciados: el segmento espacial, el segmento terrestre y el segmento usuario.

- **Segmento espacial (SS).** Este segmento está compuesto por la constelación de satélites que orbitan alrededor de la Tierra. Cada usuario requiere de cuatro satélites para un correcto uso, ya que solamente de esta manera se pueden obtener los valores de posición (x , y , z) y la desviación temporal del reloj. Estos satélites tienen como característica la alta precisión de sus relojes internos, los cuales proporcionan medidas de tiempo muy exactas que garantizan una desviación temporal muy pequeña y así se pueden obtener medidas de posición correctas.

Estos satélites que forman la constelación del sistema GNSS se pueden dividir en dos tipos: satélites de navegación y satélites de comunicación; si bien estos últimos no son un elemento estrictamente necesario para el funcionamiento del sistema GNSS.

Por una parte, los satélites de navegación están dispuestos en diferentes planos orbitales para así garantizar que los usuarios reciban señal de al menos los cuatro satélites que son condición necesaria para un buen funcionamiento. A pesar de que solo se requieren cuatro satélites para operar, el número de satélites visibles en cada zona debe ser mayor para tener señales redundantes que otorguen robustez al sistema en caso de avería de alguno de ellos. Además, la existencia de un mayor número de satélites en una determinada zona permite un posicionamiento más preciso.

Por otra parte, los satélites de comunicación se encargan de enviar aumentos de señal en ciertas áreas geográficas. Estos satélites son de tipo geostacionario y su función es enviar al usuario de cada respectivo sistema GNSS las correcciones correspondientes calculadas por los centros de control del segmento terrestre. Ejemplo de estos sistemas de aumentación que se verán más adelante son el WASS de EEUU, el EGNOS en Europa o el MFSAS de Japón y Australia.

- **Segmento de control (CS).** El segmento de control, también llamado segmento terrestre, se compone de tres elementos: la estación maestra de control, las antenas terrestres y las estaciones de seguimiento. Se encarga de la monitorización del estado actual de los satélites y también de actualizar y corregir la información que llega de la constelación para chequear si el sistema está funcionando correctamente. Está constituido por un conjunto de estaciones repartidas por la superficie terrestre, y de posición conocida, las cuales obtienen la posición de los satélites como si de un usuario se tratasen e introducen las correcciones correspondientes.
- **Segmento usuario (US).** El segmento usuario está constituido por todos los equipos usados, ya sea de manera permanente o esporádica, para la recepción de las señales emitidas por los satélites y que son empleados para el posicionamiento, navegación o para la determinación del tiempo con precisión.

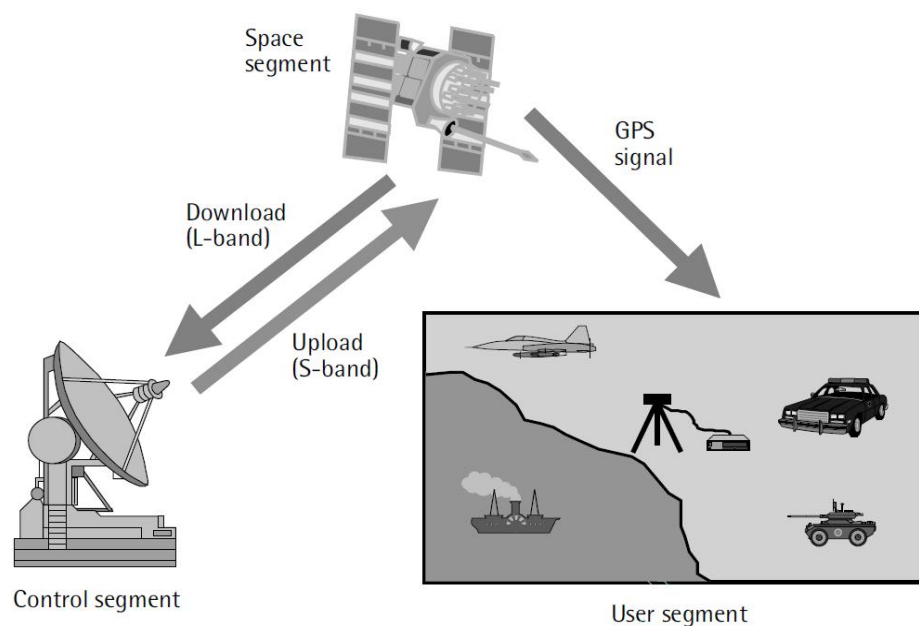


Figura 3. Esquema de la arquitectura GPS

Tal y como se ha indicado previamente, existen en el globo terrestre distintas constelaciones operativas, algunas de ellas completamente operativas y otras en fase de desarrollo. A pesar de contar con infraestructuras diferenciadas y tener servicios restringidos, el servicio abierto (OS) de la gran mayoría de ellas es compatible entre sí y el usuario final puede hacer uso de satélites de distintas constelaciones para obtener un funcionamiento más rápido y robusto a la hora de obtener su posicionamiento.

1.2. CONSTELACIONES GNSS

1.2.1. GPS-NAVSTAR

El Global Positioning System (GPS) es el sistema de navegación GNSS estadounidense. Este sistema comenzó a desarrollarse en la década de 1970 con un propósito operacional de carácter militar. Está diseñado para operar en todo el mundo con un mínimo de 4 satélites visibles. La puesta en órbita de los satélites del primer bloque (Block I NAVSTAR), actualmente fuera de uso, se llevó a cabo entre los años 1978 y 1985. Tras el lanzamiento de estos satélites, la capacidad operacional completa no se consiguió hasta 1995.



Figura 4. Logotipo del sistema GPS NAVSTAR

Por lo que respecta a sus características técnicas, la señal GPS está compuesta por dos portadoras en la banda de frecuencia L. A partir de la frecuencia maestra f_0 de 10,23 MHz se obtienen las portadoras L1 de 1575,4 MHz y L2 de 1227,6 MHz. Estas dos señales portadoras modulan a su vez tres tipos de códigos.

- **Código C/A (*Coarse and Acquisition Code*):** es el código de acceso libre que se transmite a través de la portadora L1. Se trata de mensajes PRN característicos de cada satélite que el usuario conoce para poder de esta manera saber exactamente cuál es el satélite al que está observando. Cada mensaje PRN es único y solo se autocorrelaciona consigo mismo para evitar errores en la identificación de los satélites.
- **Código P (*Precision Code*):** es el código de precisión transmitido a través de las portadoras L1 y L2. Su uso se restringe a aplicaciones militares y consiste en un código PRN de mucha mayor longitud que el código de acceso libre. Se repite semanalmente y tiene una autocorrelación muy alta que elimina cualquier tipo de ambigüedad.
- **Mensaje de navegación:** se transmite modulado a través de las portadoras L1 y L2. Este mensaje consta de 1500 bits de longitud repartidos en 5 subtramas de 300 bits que, a su vez, se dividen en 10 palabras de 30 bits. La primera subtrama contiene información sobre la fecha del GPS referente al número de semana e información

para corregir el tiempo del GPS respecto al del satélite, así como el status actual del satélite y su salud. Por su parte, las subtramas 2 y 3 contienen los datos de efemérides y las subtramas 4 y 5 contienen partes del almanaque. Cada mensaje tiene 1/25 parte del almanaque, razón por la cual el receptor debe procesar 25 veces el mensaje de navegación para recibir el almanaque completo.

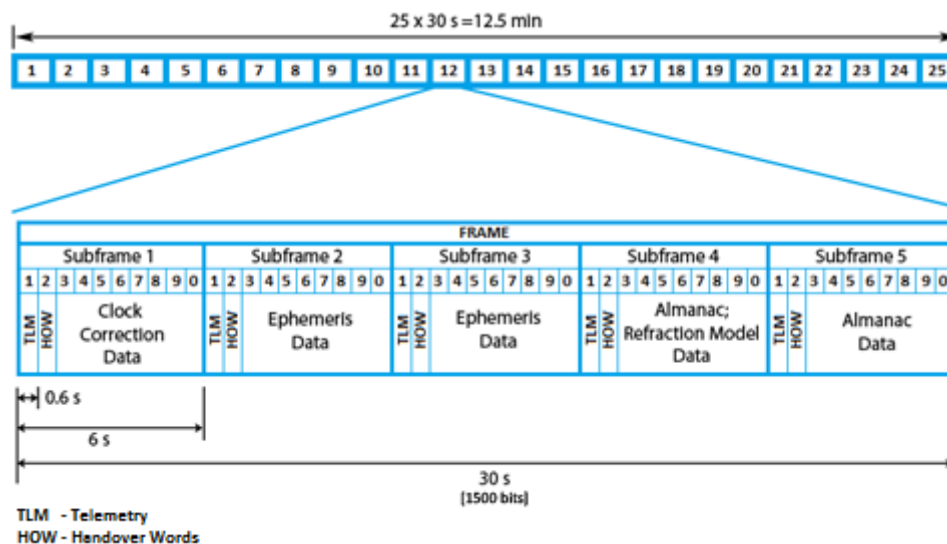


Figura 5. Estructura interna del mensaje GPS

El sistema GPS suministra dos tipos de servicio: el PPS (*Precise Positioning System*) y el SPS (*Standard Positioning System*). Para el servicio de precisión, utilizado en ámbito militar, se han usado métodos de protección como son la disponibilidad selectiva y el *anti-spoofing*.

- **Disponibilidad selectiva (SA):** método de degradación de la señal de forma intencionada para restar precisión a los usuarios civiles del sistema GPS debido al miedo de que la señal fuese usada por enemigos con objetivos militares. Para eliminar la exactitud de la medida se introdujeron errores aleatorios en la señal; estos se provocaban haciendo oscilar el reloj del satélite y truncando los datos de la efemérides. La disponibilidad selectiva se desactivó en el año 2000 y desde ese momento se redujo considerablemente el error en el posicionamiento, tal y como se puede observar en la figura 6.



SA Transition -- 2 May 2000

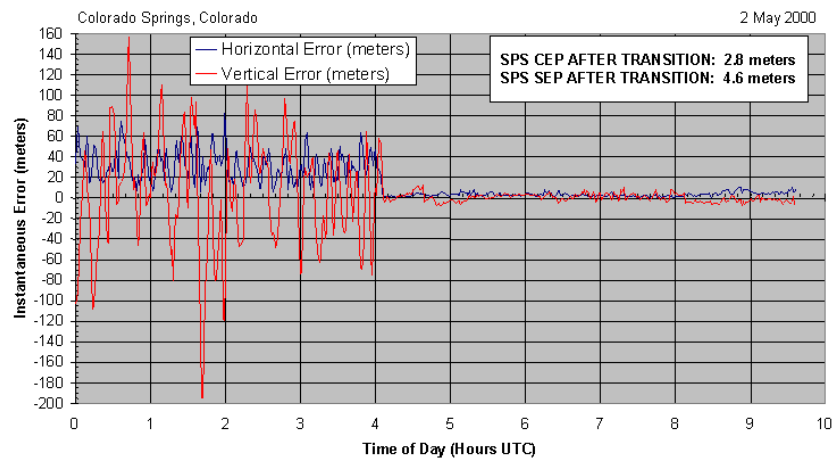


Figura 6. Gráfica del error GPS antes y después de la desactivación de la disponibilidad selectiva

- **Anti-spoofing (AIS):** las técnicas *anti-spoofing* tratan de paliar los efectos del spoofing, que consiste en la suplantación de la señal GPS por una señal inventada. Ante esta circunstancia, el receptor no sabe reconocer la señal errónea y es posicionado en un lugar distinto del real. Para eliminar estos sucesos se encripta el código P combinándolo con un código W que genera el código Y. El código Y encriptado se modula con las dos portadoras L1 y L2.

De estas dos técnicas de protección del PPS está vigente el *anti-spoofing*, pues, como se ha indicado, la disponibilidad selectiva fue desactivada en el año 2000.

1.2.2. GLONASS



Figura 7. Logotipo de GLONASS

El GLONASS (*Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema*) es el sistema GNSS de la Federación Rusa. Los primeros satélites de la constelación se pusieron en órbita en 1982 y comenzó a estar operativo en 1996. Tras una crisis económica en los años 90, los satélites operativos se redujeron a 8. Con la llegada del nuevo milenio, el gobierno ruso tuvo como prioridad el restablecimiento del sistema e invirtió suficientes fondos para restaurar su operatividad. En este plan gubernamental se pusieron como objetivos el

restablecimiento del segmento orbital a 24 satélites; la modernización de los satélites, dotándolos de más prestaciones y mayor vida útil; reemplazar los satélites obsoletos por satélites más modernos y proveer al sistema GLONASS de servicio de búsqueda y salvamento (SAR).

A pesar de que en sus comienzos funcionaba con el sistema geodésico ruso PZ-90, a partir del 2007 se adaptó de acuerdo al sistema ITRF2000, totalmente compatible con el WGS84.

De acuerdo con el servicio oficial de GLONASS, en la actualidad hay 25 satélites en la constelación, de los cuales 23 están operativos, 1 en mantenimiento y otro en fase de prueba de vuelo.

GLONASS CONSTELLATION STATUS, 11.05.2018

Total satellites in constellation	25 SC
Operational	23 SC
In commissioning phase	-
In maintenance	1 SC
Under check by the Satellite Prime Contractor	-
Spares	-
In flight tests phase	1 SC

Figura 8. Status de la constelación de GLONASS el 11 de mayo de 2018

A través del Centro de Información y Análisis de Posicionamiento, Navegación y Tiempo (IAC PNT) se pueden conocer datos del rendimiento operacional del GLONASS, como por ejemplo, la disponibilidad.

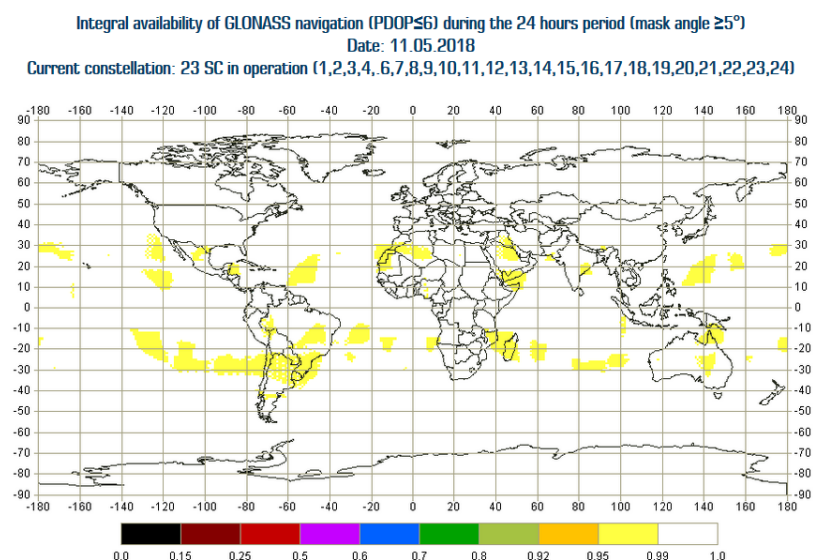


Figura 9. Mapa de disponibilidad del sistema GLONASS el 11 de mayo de 2018

Como se puede observar en el diagrama, los datos de disponibilidad son buenos en todo el globo y resultan excelentes en altas latitudes. Este comportamiento es totalmente deseado debido a la posición geográfica rusa.

Asimismo son accesibles los datos de los errores del usuario receptor (URE) de toda la red de satélites y la media de los últimos 5 minutos (Figura 10). Otra posibilidad es monitorizar el URE de los satélites observador desde una posición concreta (Figura 11). También se pueden visualizar los errores geométricos en una posición concreta de GLONASS, GPS y del resultado de usar ambas constelaciones de manera simultánea (Figura 12).

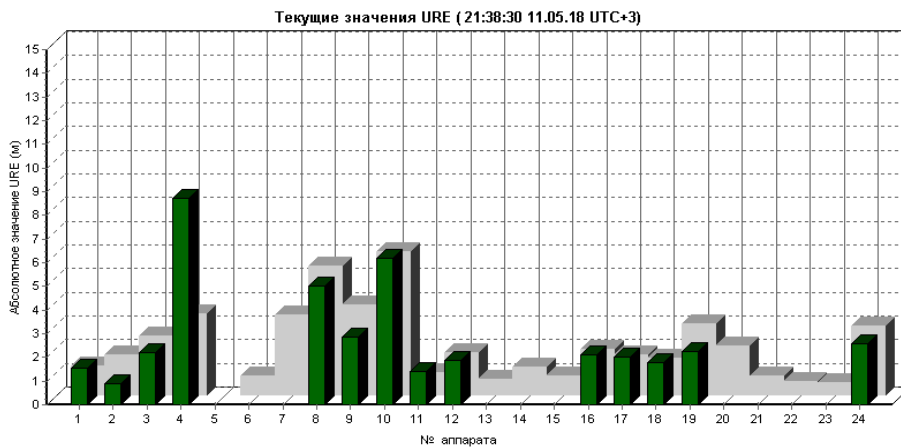


Figura 10. Representación del URE en cada satélite GLONASS

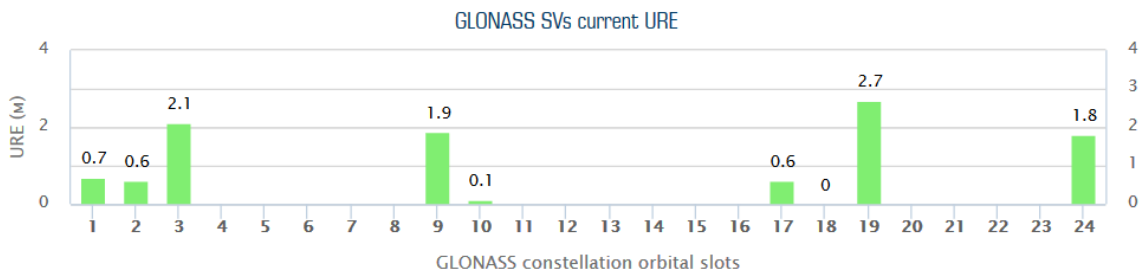


Figura 11. Representación del URE de los satélites GLONASS visibles desde una ubicación concreta

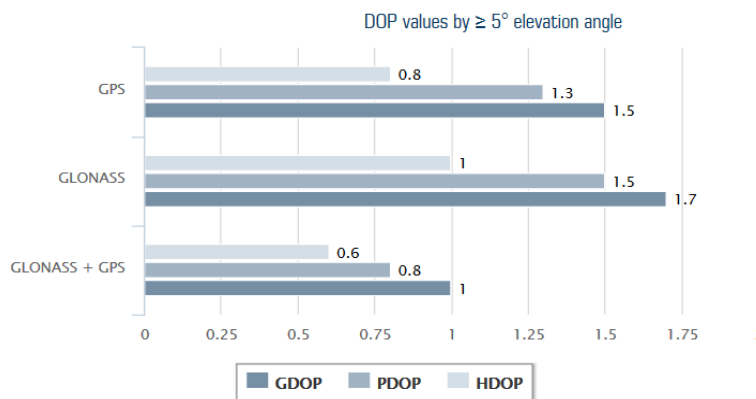


Figura 12. Comparación valores DOP entre GPS, GLONASS y el uso de ambos conjuntamente.

Por lo que respecta a la señal de los satélites de GLONASS, hay dos tipos de señal: la señal abierta L1OF/L2OF y la señal de alta precisión L1SF/L2SF. Las frecuencias fundamentales de las portadoras son $L_1 = 1602 \text{ MHz}$ y $L_2 = 1246 \text{ MHz}$. Ambas portadoras usan acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), siguiendo los satélites el siguiente patrón de frecuencias:

$$L_1 = 1602 \text{ MHz} + n \times 0.5625 \text{ MHz}, \text{ con } n \in [-7,6]$$

$$L_2 = 1246 \text{ MHz} + n \times 0.4375 \text{ MHz}, \text{ con } n \in [-7,6]$$

Recientemente ha comenzado a operar la señal L3 que trabaja con acceso múltiple por división de código. Además los satélites de nueva generación comenzarán a usar este tipo de multiplexación para las portadoras L1 y L2 (Tabla 1)

Satellite series	Launch	Current status	Clock error	FDMA signals		CDMA signals		
				1602 + $n \times 0.5625 \text{ MHz}$	1246 + $n \times 0.4375 \text{ MHz}$	1600.995 MHz	1248.06 MHz	1202.025 MHz
GLONASS	1982–2005	Out of service	5×10^{-13}	L1OF, L1SF	L2SF			
GLONASS-M	2003–2018	In service	1×10^{-13}	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF			L3OC ‡
GLONASS-K1	2011, 2014	In service	$5 \times 10^{-14} \dots 1 \times 10^{-13}$	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF			L3OC
GLONASS-K2	2018–2024	Design phase	$5 \times 10^{-15} \dots 5 \times 10^{-14}$	L1OF, L1SF	L2OF, L2SF	L1OC, L1SC	L2OC, L2SC	L3OC
GLONASS-KM	2025–	Research phase		L1OF, L1SF	L2OF, L2SF	L1OC, L1SC	L2OC, L2SC	L3OC, L3SC

Tabla 1. Recopilación de los satélites GLONASS y sus señales portadoras.

Los servicios ofrecidos por GLONASS son similares a los del GPS, contando con un servicio de precisión y uno estándar. Además, después de un acuerdo gubernamental, también da soporte militar al ejército indio. Se prevé también de dotar al sistema con un servicio de rescate y búsqueda.

- **Servicio estándar (SP):** servicio abierto a cualquier usuario del mundo. En los comienzos era proporcionado por la señal G1 modulada por la portadora L1, pero con la inclusión de los satélites de la fase GLONASS-M se incorporó también una segunda señal civil en la banda G2 (portadora L2). Actualmente también es accesible al público civil la señal G3 (GLONASS-K).
- **Servicio de alta precisión (HP):** servicio restringido con fines militares. Este servicio se presta a través de las señales G1 y G2 y se emite en cuadratura de fase con la señal del servicio abierto. Se retransmite con la misma onda portadora pero con un ancho de banda 10 veces mayor. Tras un acuerdo con el gobierno indio, se pactó que India financiase parte de los costes de la modernización de la infraestructura de GLONASS a cambio de tener acceso a la señal militar.
- **Servicio de rescate y búsqueda (SAR):** no operativo.

1.2.3. GALILEO

Galileo es el sistema GNSS promovido por la Comisión Europea. A diferencia de las otras constelaciones GNSS, Galileo tiene un origen civil y busca dotar a Europa de independencia a la hora de tener un sistema de posicionamiento global preciso que pueda operar en cualquier circunstancia. A pesar de buscar un sistema independiente del GPS y GLONASS, es totalmente interoperable con ellos. Además ofrece mayor precisión que los sistemas predecesores.

El marco de referencia de Galileo (GTRF) ha sido desarrollado por el Proveedor de Servicio de Referencia Geodésico Galileo (GRSP). Este marco de referencia incluye las estaciones sensor de Galileo (GSS), así como las estaciones sensor internacionales (IGS) que son usadas para alinear el ITRF. Con el uso de estos dos tipos de estaciones se consigue una red muy densa (Figura 13) que permite resultados muy exactos.

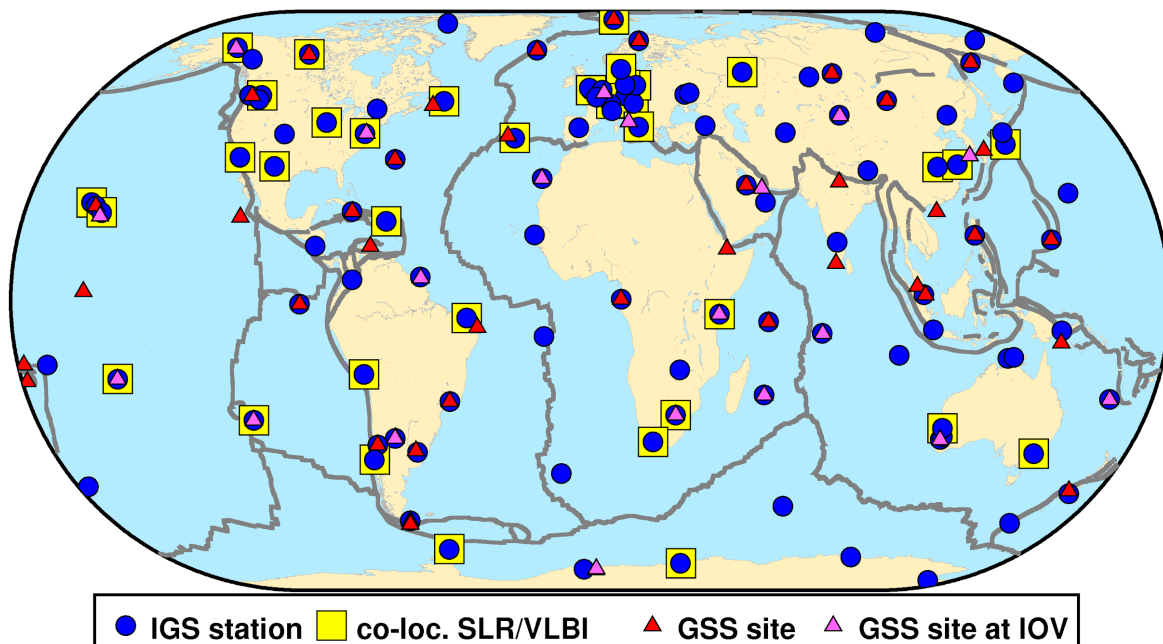


Figura 13. Mapa con la localización de las estaciones de referencia de Galileo.

Por lo que respecta a la arquitectura de Galileo, el sistema está compuesto por cinco componentes:

- **Componente global (Segmento espacial):** está formada por la constelación de satélites MEO que dan cobertura a Galileo. Los satélites orbitan en tres planos orbitales equidistantes en grupos de nueve satélites igualmente espaciados en cada plano más un satélite de repuesto, para sumar un total de 30 satélites en la constelación. Actualmente hay 13 satélites operativos, 2 en fase de pruebas y 4 a la espera de ser lanzados.

Satellite Name	SV ID	Status	Orbital Slot	Clock ¹	Active NAGU	NAGU Type ²	NAGU Subject										
GSAT0101	11	NOT USABLE	B05	RAFS	2018009	PLN_MANV	PLANNED MANOEUVRE FROM 2018-05-08 UNTIL 2018-05-20										
GSAT0102	12	USABLE	B06	PHM													
GSAT0103	19	USABLE	C04	PHM													
GSAT0104	20	NOT AVAILABLE	C05	RAFS	2014014	UNP_UNUFN	UNAVAILABLE FROM 2014-05-27 UNTIL FURTHER NOTICE										
GSAT0201	18	TESTING	Ext01	PHM	2016029	GENERAL	TESTING OF GSAT0201										
GSAT0202	14	TESTING	Ext02	PHM	2016030	GENERAL	TESTING OF GSAT0202										
GSAT0203	26	USABLE	B08	PHM													
GSAT0204	22	NOT USABLE	B03	RAFS	2017045	GENERAL	GSAT0204 REMOVED FROM ACTIVE SERVICE ON 2017-12-08 UNTIL FURTHER NOTICE FOR CONSTELLATION MANAGEMENT PURPOSES										
GSAT0205	24	USABLE	A08	PHM													
GSAT0206	30	USABLE	A05	PHM													
GSAT0207	07	USABLE	C06	PHM													
GSAT0208	08	USABLE	C07	PHM													
GSAT0209	09	USABLE	C02	PHM													
GSAT0210	01	USABLE	A02	PHM													
GSAT0211	02	USABLE	A06	PHM													
GSAT0212	03	USABLE	C08	PHM													
GSAT0213	04	USABLE	C03	PHM													
GSAT0214	05	USABLE	C01	PHM													
GSAT0215	21	UNDER COMMISSIONING	A03		2017047	GENERAL	LAUNCH OF GSAT0215, GSAT0216, GSAT0217 AND GSAT0218										
GSAT0216	25	UNDER COMMISSIONING	A07		2017047	GENERAL	LAUNCH OF GSAT0215, GSAT0216, GSAT0217 AND GSAT0218										
GSAT0217	27	UNDER COMMISSIONING	A04		2017047	GENERAL	LAUNCH OF GSAT0215, GSAT0216, GSAT0217 AND GSAT0218										
GSAT0218	31	UNDER COMMISSIONING	A01		2017047	GENERAL	LAUNCH OF GSAT0215, GSAT0216, GSAT0217 AND GSAT0218										

Figura 14. Status actual de los satélites de Galileo.

Además de la constelación de satélites, otro aspecto fundamental de la componente global son los relojes internos de los satélites. En este caso, la Agencia Espacial Europea se decantó por relojes de hidrógeno y rubidio por la alta precisión que aportan.

- **Centros de servicio (Segmento de control):**
 - Centro de control de Galileo (GCC): es el núcleo de los centros de servicio. Por una parte se encarga de las funciones de control con el apoyo de los GCS y, por otra parte, se encarga de las funciones de misión con el apoyo de los GMS.
 - Sistema de control de Galileo (GCS): es el responsable del control de la constelación y de la gestión de los satélites. Se encarga de conectar la red de estaciones remotas (ULS, GSS y TT&C) con el centro maestro de control.
 - Sistema de misión de Galileo (GMS): está formado por la red global de estaciones sensor (GSS), las cuales monitorean las señales que emiten los satélites, determinan su órbita y los sincronizan. Además
- **Componente regional:** consiste en ofrecer una información a tiempo real de la integridad de los satélites haciendo uso de EGNOS, basado a su vez en la utilización de tres satélites geostacionarios y una red de estaciones de seguimiento.
- **Componente local:** esta componente es usada exclusivamente en aplicaciones que requieren de una alta precisión, mucho mayor que la ofrecida en el servicio abierto.

Para ello, se utilizan señales de navegación adicionales y/o canales de comunicación móviles.

- **Componente usuario (Segmento usuario):** consiste en el receptor final capaz de extraer la información de las señales emitidas por los satélites y de presentarla al usuario para la aplicación que desee.

Por lo que respecta al mensaje de navegación del sistema Galileo, los satélites de Galileo distribuyen cinco tipos distintos de datos en cuatro mensajes de navegación diferentes. Estos mensajes de navegación son el de acceso libre (F/NAV), el mensaje de integridad (I/NAV), el mensaje comercial (C/NAV) y el mensaje gubernamental (G/NAV).

La estructura del mensaje G/NAV es de ámbito protegido, mientras que la del mensaje C/NAV todavía no ha sido completamente diseñada. Sin embargo, las estructuras de los mensajes F/NAV y I/NAV son conocidas.

Ambos mensajes están compuestos por “súper tramas” de datos compuestas a su vez por subtramas, que respectivamente están divididas en páginas. El número de cada uno de estos parámetros varía y está recogido en la siguiente tabla.

Message	Channel	Data rate (bps)	Page duration (s)	#Pages in a sub-frame	#Sub-frames in a frame
F/NAV	E5a-I	25	10	5	12
I/NAV	E1B, E5b-I	125	2	30	24
C/NAV	E6B	500	1	15	8
G/NAV	E1A, E6A	50	Not available		

Tabla 2. Características de los mensajes de Galileo

De esta manera se consigue enviar datos de tres categorías distintas: datos de secuencia rápida, que forman las páginas (datos urgentes de integridad); datos de secuencia media, que forman las subtramas (efemérides, correcciones del reloj); y datos de secuencia lenta, que forman las tramas (almanaques).

En resumen, todos los datos que se envían en los mensajes I/NAV y F/NAV se recogen en la siguiente tabla. Se observa que los datos son similares excepto en la dimensión del almanaque satelital, el cual es dos bits más largo en el mensaje de integridad.

Data	Size (bits)		Type
	FNAV	INAV	
Ephemeris	356		Orbital Parameters
Galileo System Time (GST)	32		Time and Clock Correction Parameters
Clock Correction	72		
Broadcast Group Delay	32		
Ionospheric Correction	41		
GST-UTC Conversion	99		
GPS to Galileo System Time Conversion	42		
Satellite ID	6		Service Parameters
Issue of Data (IOD)	N/A		
Navigation Data Validity and Signal Health Status	N/A		
CRC	24		Almanac
Satellite Almanac	131	133	
Almanac References	16		Integrity
Signal In Space Accuracy	8		

Tabla 3. Datos enviados en los mensajes F/NAV e I/NAV.

El mensaje F/NAV tiene una duración de 600 segundos y está compuesto por 12 subtramas de 50 segundos. A su vez, cada subtrama está dividida en 5 páginas de 10 segundos de duración. Cada página se compone básicamente de tres campos principales de información: el patrón de sincronización de 12 bits, la palabra F/NAV de 238 bits y la cola de 6 bits (Figura 15).

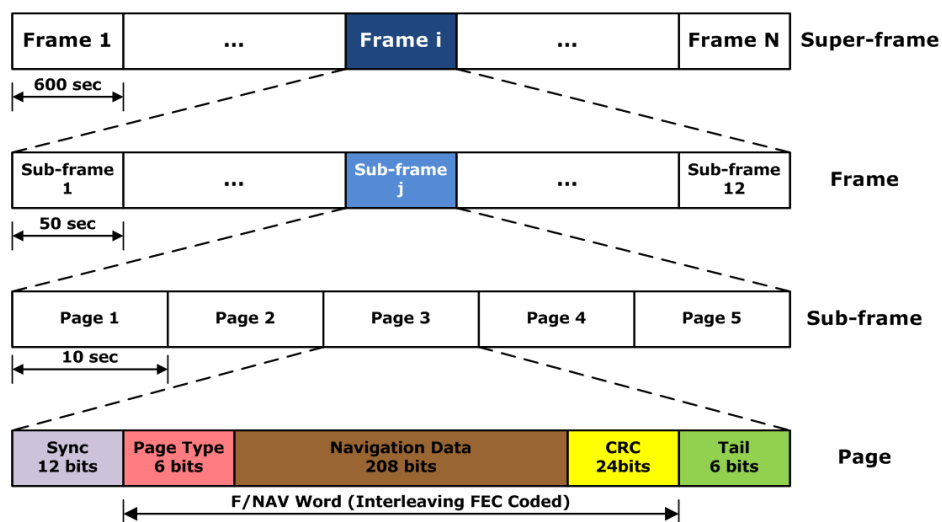


Figura 15. Estructura del mensaje F/NAV

Por otra parte, el mensaje I/NAV se compone por tramas de 720 segundos divididas cada una en 24 subtramas de 30 segundos. Estas subtramas están formadas por 15

páginas de 2 segundos de duración. Cada página incluye el patrón de sincronización de 10 bits, la partición de la página I/NAV de 114 bits y la cola de 6 bits (Figura 16).

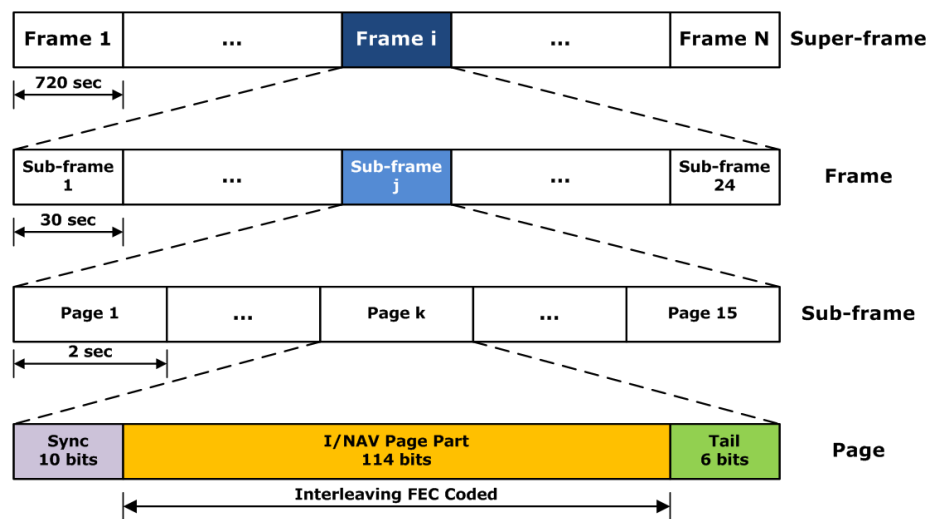


Figura 16. Estructura del mensaje I/NAV

Como se observa en la anterior tabla, Galileo ofrece una serie de datos en función de la necesidad del usuario y la finalidad de su uso. Atendiendo al tipo de datos que se emite y al servicio al que se acceda, la información se transmite a través de un mensaje de navegación distinto.

Message Type Galileo Services	F/NAV OS	I/NAV OS/CS/SoL		C/NAV CS	G/NAV PRS	
Channels	E5a-I	E1B	E5b-I	E6B	E1A	E6A
Data Rate (bps)	25	125		500	50	
Navigation/Positioning	×	×	×		×	
Integrity		×	×		×	
Supplementary				×		
Public Regulated					×	
Search and Rescue		×				

Tabla 4. Tipos de datos enviados según el tipo de mensaje de Galileo

Los servicios ofrecidos por Galileo son cinco: el servicio abierto (OS), el servicio comercial (CS), el servicio público regulado (PRS), el servicio de búsqueda y rescate (SAR) y el *Safety of Life* (SoL)

- **Servicio abierto:** ofrece información de posicionamiento, velocidad y tiempo que es accesible por cualquier usuario de forma gratuita a través de cualquier equipo equipado con un receptor sin requerimiento de autorización. Este servicio está pensado para interoperar con las señales de GPS para mejorar el rendimiento, por ejemplo, en áreas urbanas. También es indicado para usuarios profesionales que necesiten una gran precisión sin integridad y se apoyen en un sistema de aumentación.

	Galileo Open Service (positioning & timing)	
	Single Frequency (SF)	Dual Frequency (DF)
Coverage	Global	
Accuracy (95%)	Horizontal: 15 m	Horizontal: 4m
	Vertical: 35 m	Vertical: 8m
Availability	99.8 %	
Timing Accuracy wrt UTC/TAI	N/A	30 ns
Ionospheric Correction	Based on SF Model	Based on DF Measurements
Integrity	No	

Tabla 5. Prestaciones del servicio abierto de Galileo

- **Servicio comercial:** ofrece un servicio de gran precisión para aplicaciones profesionales a cambio de una cuota de servicio. Garantiza un servicio más robusto que el servicio abierto y permite el procesamiento de la integridad. Permite la interoperabilidad con señales GPS y ofrece servicios de valor añadido que hacen que las características de rendimiento finales sean muy personalizables en función del cliente.
- **Servicio público regulado:** ofrece un servicio de posicionamiento y tiempo restringido para entes gubernamentales para aplicaciones muy sensibles que requieren de un alto nivel de continuidad. Además las señales están encriptadas y cuentan con mecanismos *anti-jamming* y detectores de problemas confiables. No es un servicio interoperable con las señales GPS.

	Galileo Public Regulated Service (PRS)	
	Dual Frequency (DF)	
Coverage	Global	
Accuracy (95%)	Horizontal: 6.5 m	
	Vertical: 12 m	
Availability	99.5 %	
Continuity Risk	10e-5/15 s	
Timing Accuracy wrt UTC/TAI	100 ns	
Ionospheric Correction	Based on DF Measurements	
Integrity	Computes	Yes
	Alarm Limit	H:20 m -V:35 m
	Time-To-Alarm	10 s
	Integrity Risk	3.5x10e-7/150 s

Tabla 6. Prestaciones del servicio público regulado de Galileo

- **Servicio de búsqueda y rescate:** ofrece un servicio de alta precisión en tiempo real capaz de recoger las señales de emergencia de radiobalizas instaladas en barcos, aviones, etc y transmitir las a los centros de rescate con la localización precisa del

lugar del accidente. Permite el retorno de información a la radiobaliza emisora de la señal de emergencia para aportar *feedback* sobre el proceso de rescate.

Galileo support to Search and Rescue Service (SAR/Galileo)	
Capacity	Each satellite shall relay signals from up to 150 simultaneous active beacons
Forward System Latency Time	The communication from beacons to SAR ground stations shall allow for the detection and location of a distress transmission in less than 10 min. The latency time goes from beacon first activation to distress location determination.
Quality of Service	Bit Error Rate < 10e-5 for communication link: beacon to SAR ground station.
Acknowledgment Data Rate	6 messages of 100 bits each, per minute.
Availability	>99.8%

Tabla 7. Prestaciones del servicio de búsqueda y rescate de Galileo

- **Safety of Life:** ofrece la posibilidad de monitorizar la integridad que proporciona la señal de Galileo para autenticar la señal y alertar de posibles caídas del sistema. Es ofrecido por el sistema de aumentación EGNOS.

		Galileo Safety of Life Service	
Coverage		Global	
		Critical Level	Non-critical Level
Accuracy (95%)		Horizontal: 4 m	Horizontal: 220 m
		Vertical: 8 m	
Integrity (95%)	Alarm Limit	H: 12 m, V: 20 m	H: 220 m
	Time-To-Alarm	6 seconds	10 seconds
	Integrity Risk	3.5x10 ⁻⁷ /150s	10 ⁻⁷ /hour
Continuity Risk		10 ⁻⁵ /15s	10 ⁻⁴ /hour - 10 ⁻⁸ /hour
Certification/Liability		Yes	
Availability of Integrity		99.5 %	
Availability of accuracy		99.8 %	

Tabla 8. Prestaciones del Safety of Life de Galileo

1.2.4. BeiDou COMPASS

BeiDou es el sistema de navegación por satélite desarrollado por el Ministerio de Defensa de la República Popular China. El actual sistema es una evolución del BeiDou-1, un sistema de navegación regional implementado a principio de milenio que contaba con 3 satélites operativos más otro de respaldo. En 2012 este primer programa fue desmantelado y el gobierno chino comenzó la implantación de una red de satélites de nueva generación que permitiera dar cobertura global.

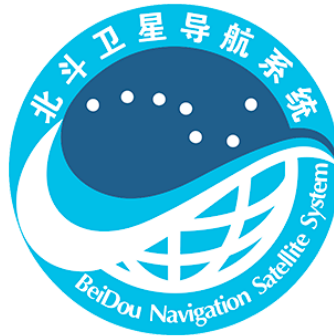


Figura 17. Logotipo de BeiDou COMPASS

Está planeado que para el año 2020 la constelación de BeiDou cuente con 35 satélites que se distribuirán en 27 satélites MEO (cobertura mundial), 5 satélites GEO y 3 satélites IGSO (cobertura regional).

Por lo que respecta a las señales, BeiDou transmite en 3 bandas de frecuencia distintas (B1, B2 y B3), las cuales están en la misma área que las bandas L de los otros sistemas GNSS. Para mejorar la interoperabilidad de BeiDou con GPS y Galileo, la señal civil B1 se ha centrado en 1575,42 MHz, la misma frecuencia que las señales civiles de GPS y Galileo.

En cuanto a los servicios que ofrece BeiDou, se dividen a si son de ámbito global o local. En ámbito global encontramos el servicio abierto y el servicio autorizado.

- **Servicio abierto:** ofrece cobertura mundial gratuita de forma similar a la ofrecida por GPS y Galileo. Las prestaciones que proporciona son precisión de 10 m, precisión temporal de 50 ns y precisión en la velocidad de 0,2 m/s.
- **Servicio autorizado:** proporciona cobertura de gran fiabilidad usada en situaciones complejas. Se tiene poca información sobre él debido a estar reservado para operaciones sensibles.

Por lo que respecta al ámbito local existe un servicio de aumentación diferencial de área extensa y un servicio de mensajes cortos.

- **Servicio de aumentación diferencial de área extensa (*Wide Area Differential Services*):** es el sistema SBAS chino que permite aumentar la precisión en el posicionamiento hasta alcanzar 1 m. Se apoya en bases terrestres y marítimas.
- **Servicio de mensajes cortos (*Short Message Service*):** este servicio también es conocido como *Positioning Report Service*. Permite intercambiar mensajes entre el usuario y la estación más cercana para mejorar el posicionamiento. En el futuro se planea que evolucione para ser capaz de enviar mensajes más largos y que no solo mejoren el posicionamiento.

1.2.5. NAVIC

NAVIC (*NAVigation with Indian Constellation*) es un sistema de navegación por satélite de ámbito regional para dar cobertura al territorio indio más 1500 km alrededor de él. El proyecto nació en 2006 ante la necesidad de contar con un servicio de posicionamiento propio para ser usado en situaciones de ámbito militar en las que no se podía depender de un sistema global controlado por un gobierno extranjero.

También es conocido como IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*). Está diseñado para proporcionar un servicio abierto a cualquier usuario de ámbito civil y un servicio restringido para usuarios autorizados, a los que se les proporciona una señal encriptada. Las señales de estos dos servicios se modulan con una portadora en la banda L5 cuya frecuencia es 1176,45 MHz y otra portadora en la banda S con una frecuencia de 2492,08 MHz.

El sistema se estructura en tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento usuario. Adicionalmente, la constelación de satélites cuenta con 7 satélites: 3 de tipo GEO y 4 de tipo IGSO.

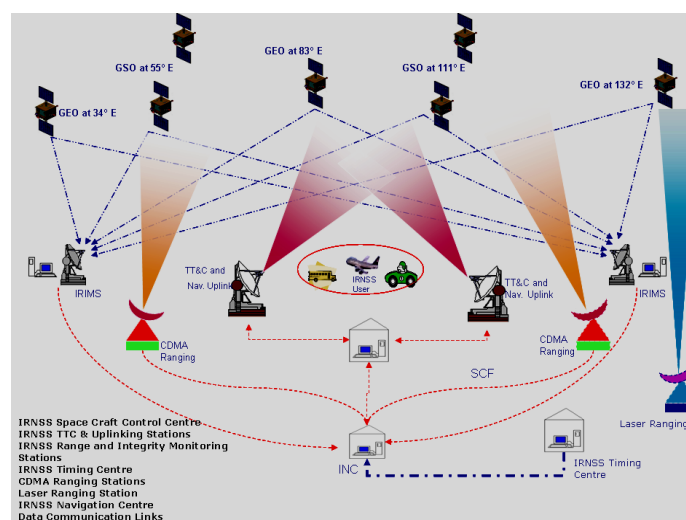


Figura 18. Estructura de NAVIC

1.2.6. QZSS

El QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*) es un sistema de navegación regional promovido desde el ámbito civil por un consorcio de empresas japonesas. Tras una crisis de este consorcio se encargó de seguir con el desarrollo del sistema la Agencia Espacial Japonesa (JAXA).



Figura 19. Logotipo QZSS

Este sistema de ámbito regional cubre las regiones del este asiático y Oceanía con 7 satélites (3 de tipo GEO) que se encuentran distribuidos en múltiples planos orbitales.

De manera similar al resto de sistema de navegación, el QZSS se estructura en un segmento espacial, un segmento de control y un segmento usuario.

En cuanto a las señales, el QZSS operará con 6 señales distintas:

- L1-C/A (1575,42 MHz): combinada con otras señales GNSS para mejorar la disponibilidad en servicios PNT.
- L1C (1575,42 MHz): combinada con otras señales GNSS para mejorar la disponibilidad en servicios PNT.
- L2C (1227,6 MHz): combinada con otras señales GNSS para mejorar la disponibilidad en servicios PNT.
- L5 (1176,45MHz): combinada con otras señales GNSS para mejorar la disponibilidad en servicios PNT.
- L1-SAIF (1575,42MHz): señal de aumentación interoperable con GPS-SBAS.
- LEX (1278,75 MHz): señal experimental para un servicio de alta precisión compatible con la señal E6 de Galileo.

Los servicios ofrecidos por QZSS son muy variados:

- Posicionamiento en función de la posición
 - *Satellite Positioning System*
 - *Sub-meter Augmentation System*
 - *Centimeter Augmentation System*
 - *Position Technology Verification Services*

- Mensajería
 - Short Message Delivery Service

2. SISTEMAS DE AUMENTACIÓN

En la descripción de los sistemas GNSS que existen en la actualidad se han especificado las prestaciones que cada uno de ellos ofrece a sus usuarios en cuanto a la precisión en el posicionamiento. A pesar de que los sistemas más modernos aportan señales con un menor error, este sigue siendo inaceptable para que los sistemas GNSS constituyan el único método de guiado en la navegación aérea. Los criterios de precisión, así como de integridad, continuidad y disponibilidad, necesarios para la navegación aérea fueron establecidos por la OACI y serán expuestos más adelante.

Para alcanzar los criterios impuestos por la OACI, los sistemas GNSS se apoyan en sistemas de aumentación para poder ser usados como método único de guiado en navegación aérea, si bien pueden ser usados junto a los métodos convencionales de radiofrecuencia o navegación inercial.

Cuando se trata de sistemas de aumentación, se encuentran tres tipos: los sistemas de aumentación basados en la aeronave (ABAS), los sistemas de aumentación basados en tierra (GBAS) y los sistemas de aumentación en satélites (SBAS).

- **ABAS (*Aircraft Based Augmentation System*)**: este tipo de sistemas requiere de la instalación de cierta instrumentación en la aeronave. Proporciona la integridad requerida para utilizar los sistemas GNSS como medios únicos durante las fases salida, en ruta, llegada y aproximaciones de no precisión. Los sistemas que se han de implementar en la aeronave para poder contar con servicio ABAS son:
 - **RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*)**: este sistema solo utiliza las señales GNSS para realizar el monitoreo de la integridad realizando múltiples cálculos de los pseudorrangos de los satélites visibles. Se encarga de comprobar si las múltiples soluciones visibles son correctas y alertar en caso de que haya algún satélite proporcionando información errónea. Normalmente opera junto a un sistema de exclusión (FDE)
 - **FDE (*Fault Detection and Exclusion*)**: este sistema se encarga de chequear la consistencia de los cálculos en las medidas de posición mediante el uso de los residuales de la estimación de posición por mínimos cuadrados. Es capaz de detectar si hay algún cálculo erróneo y, en caso de haberlo, es capaz de detectar cual es el satélite que causa la medida errónea.

El algoritmo que se utiliza comienza calculando la solución de navegación, luego detecta si hay algún satélite que esté dando una señal errónea y, por último, se aíslan los satélites que provocan fallos. Para poder llevar a cabo este proceso son necesarios un número mínimo de satélites. Con cuatro satélites visibles no se podría ofrecer integridad porque el sistema solo sería capaz de hacer un cálculo de posición, sin saber si es o no correcto. Con cinco satélites es posible realizar un cálculo múltiple y detectar si hay algún satélite anómalo, pero tras eliminar el satélite erróneo quedarían cuatro satélites con los cuales no se podría comprobar que esta solución fuese correcta. En este caso se podría

alertar de que hay al menos un satélite fallido, pero no se podría garantizar la integridad del sistema. Por lo tanto, son necesarios seis o más satélites visibles para poder realizar una exclusión de los satélites fallidos y tener al menos cinco satélites visibles sanos que proporcionen una solución de navegación correcta y comprobable. De esta manera se puede alertar de los satélites fallidos y ofrecer integridad.

- **AAIM (Airborne Autonomous Integrity Monitoring):** además de utilizar las señales GNSS también incluye las señales de ciertos sensores de la aeronave en el cómputo de la integridad.
- **GBAS (Ground Based Satellite System):** los sistemas de aumentación basados en tierra son de ámbito local, debido a su limitada cobertura. Su infraestructura se instala en las inmediaciones del aeródromo al que se quiere dotar del sistema de aumentación. Su instalación responde a la necesidad de proporcionar altas prestaciones de precisión a las fases de aproximación, aterrizaje, despegue y rodadura.

Los sistemas GBAS cuentan con una serie de antenas dispuestas en los alrededores del aeropuerto que reciben las señales de satélites GNSS y calculan sus pseudorrangos y obtienen los parámetros de integridad del sistema. Tras conocer su posición envían las correcciones pertinentes a las aeronaves de la zona, mediante antenas omnidireccionales VHF, para que puedan aplicarlas a su posición y obtener un guiado mucho más preciso. Junto a las correcciones en la trayectoria se envían los parámetros de integridad y otra información relevante. Es condición necesaria que las aeronaves tengan un receptor específico para poder operar con GBAS.

Los sistemas GBAS más conocidos son el estadounidense LAAS (*Local Area Augmentation System*) y el australiano GRAS (*Ground-based Regional Augmentation System*).

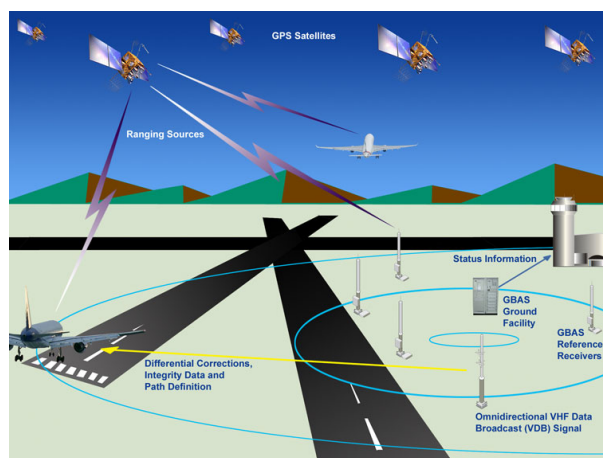


Figura 20. Esquema sistemas GBAS

- **SBAS (Satellite Based Augmentation System):** los sistemas de aumentación basados en satélites son sistemas de área extensa que mejoran las prestaciones de la navegación con el envío de correcciones diferenciales por satélite. Dado a su carácter de área ancha, se puede usar en todas las fases de vuelo. En la actualidad existen tres sistemas SBAS activos (WAAS, MSAS y EGNOS), así como tres en fase de desarrollo (GAGAN, SDCM y SNAS). Debido a que los sistemas SBAS son parte del núcleo de este trabajo, se expondrán con mayor detalle en el siguiente apartado.

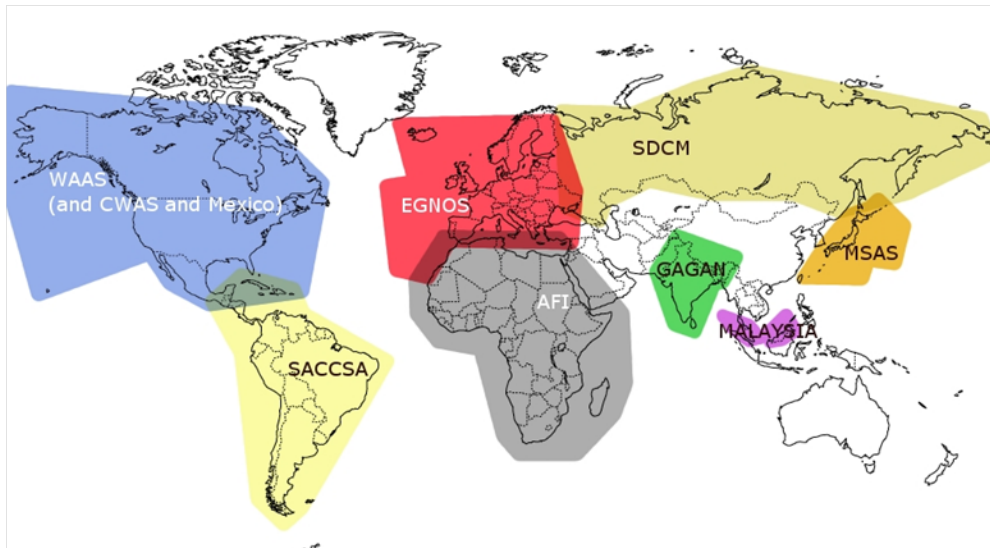


Figura 21. Mapa con los sistemas SBAS en el mundo

3. SBAS

Como se ha introducido brevemente en el anterior apartado, el SBAS es el sistema de aumentación basado en satélites que introduce correcciones diferenciales, las cuales permiten mejorar las prestaciones de la navegación aérea en cualquier fase de vuelo. La emisión de estas correcciones diferenciales se realiza gracias a una constelación de satélites GEO que transmiten, además, información sobre la integridad. Adicionalmente a esta información de la integridad, el objetivo de SBAS es aumentar la precisión en la posición con errores por debajo de un metro (1- ζ)

Estructuralmente, los sistemas SBAS se dividen en tres segmentos: el segmento espacial, el segmento terrestre y el segmento usuario.

- **Segmento espacial:** este segmento está formado por una serie de satélites geoestacionarios a cargo de la retransmisión del mensaje de navegación SBAS sobre el área de servicio.
- **Segmento terrestre:** este segmento tiene como propósito generar y enviar la señal de aumentación a los satélites GEO que se encargarán de transmitirla a los usuarios finales. Para llevar a cabo su misión, el segmento terrestre se divide en ciertos subsistemas:
 - Red de estaciones de monitoreo: este subsistema tiene como propósito recoger los datos de los satélites cuya señal será aumentada. Se concreta con una serie de receptores GNSS.
 - Centro de procesamiento de datos: este subsistema se encarga de procesar los datos recibidos por la red de estaciones de monitoreo para generar los mensajes que se transmitirán a los satélites.
 - Centro de control de los satélites GEO: esta instalación tiene el objetivo de generar la señal con el mensaje proporcionado por el centro de procesamiento de datos y enviarla a los satélites geoestacionarios.
 - Red de comunicación: este subsistema se encarga de interconectar los diferentes elementos del segmento terrestre.
- **Segmento usuario:** este segmento comprende cualquier receptor capaz de recibir el mensaje de navegación SBAS con las correcciones diferenciales aplicadas. Habitualmente se ofrecen distintos servicios según el usuario final: el servicio abierto, el servicio comercial y el *Safety of Life*.

3.1. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

El posicionamiento diferencial con GNSS es una técnica en la que se requieren dos o más receptores. Para modelar los fundamentos matemáticos del SBAS tomaremos un primer receptor fijo A situado en unas coordenadas conocidas y un segundo receptor móvil B cuyas coordenadas son las que se desea obtener. El receptor fijo A (receptor base o de referencia) calcula las correcciones de las pseudodistancias (PRC) y las correcciones de la variación de la distancia (RRC). Estas correcciones son transmitidas al receptor remoto B en tiempo real, el cual aplica dichas correcciones a las pseudodistancias medidas y procede al cálculo de la posición de los puntos con las pseudodistancias corregidas. El uso de estas pseudodistancias corregidas mejora la exactitud del posicionamiento.

La pseudodistancia medida en la base A mediante un satélite j en una época t_0 se puede modelar de la siguiente manera:

$$R_A(t_0) = \rho_A^j(t_0) + \Delta\rho_A^j(t_0) - c\delta^j(t_0) + c\delta_A(t_0)$$

Donde R es el pseudorange, ρ es la distancia geométrica entre la estación y el satélite, $\Delta\rho(t_0)$, los efectos de error radial de la órbita y de refracción ionosférica/troposférica y δ , el error de los relojes.

Introduciendo la corrección de la pseudodistancia de código para el satélite j en un tiempo de referencia t_0 se obtiene la siguiente expresión:

$$PRC(t_0) = -R_A^j(t_0) + \rho_A^j(t_0) = -\Delta\rho_A^j(t_0) + c\delta^j(t_0) - c\delta_A(t_0)$$

A partir de una serie temporal de datos de correcciones de pseudodistancias, se puede calcular la corrección de variaciones de distancia RRC mediante un proceso de derivación numérica. De este modo, la corrección de pseudodistancias en una época cualquiera t se puede aproximar por la expresión:

$$PRC^j(t) = PRC^j(t_0) + RRC^j(t_0)(t - t_0)$$

Si se procede de manera análoga en la estación remota B se obtiene:

$$R_B(t_0) = \rho_B^j(t_0) + \Delta\rho_B^j(t_0) - c\delta^j(t_0) + c\delta_B(t_0)$$

Una vez aplicada la corrección de pseudodistancias se tiene la expresión:

$$R_B^j(t)_{corr} = R_B^j(t) + PRC^j(t) = \rho_B^j(t) + (\Delta\rho_B^j(t) - \Delta\rho_A^j(t)) + (c\delta_B(t) - c\delta_A(t))$$

En esta última fórmula se evidencia la desaparición de los errores de los relojes de los satélites. Para circunstancias donde la longitud es moderada, el error radial de la órbita del satélite en la base y en la estación remota están altamente correlacionados o incluso son iguales. Por lo tanto, despreciando la diferencia entre los errores radiales de la órbita, la ecuación anterior se puede escribir:

$$R_B(t)_{corr} = \rho_B^j(t) + \Delta\delta_{AB}(t)$$

Donde se tiene el término:

$$\Delta\delta_A(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t)$$

Este término es el error combinado de los relojes de los receptores; los efectos del desplazamiento del reloj del satélite, la degradación de la órbita y los errores ionosféricos y troposféricos han sido eliminados casi por completo.

3.2. SBAS ACTUALES

3.2.1. EGNOS

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) es el sistema regional europeo de aumentación basado en satélites. Puesto que es el núcleo central de este TFG, la explicación detallada de sus características, funcionamiento, servicios, etc, será desarrollada en el apartado 4 de este trabajo.

3.2.2. WAAS

El *Wide Area Augmentation System* es el sistema de aumentación basado en satélites americano. El programa comenzó en 1992 desarrollado por la Agencia Federal de Aviación (FAA) con carácter principalmente civil. El sistema fue declarado completamente operacional en 2003 y es el referente en sistemas SBAS en el planeta. Actualmente apoya a miles de aproximaciones en miles de aeródromos de los Estados Unidos y Canadá.

Estructuralmente cuenta con segmento espacial, segmento terrestre y segmento usuario, mientras que operacionalmente divide su área de cobertura en cinco regiones: CONUS, Alaska, Hawaii, Puerto Rico y otras zonas de Estados Unidos.

El sistema está en continua evolución y, tras haber superado dos fases de desarrollo, se enfrenta a una nueva donde se busca trabajar con un servicio de aumentación de doble frecuencia.

Actualmente WAAS es capaz de soportar operaciones de los siguientes tipos:

- LNAV
- LNAV/VNAV
- LP
- LPV

3.2.3. MSAS

El *MTSAT Satellite Augmentation System* es el sistema de aumentación basado en satélites japonés. Fue desarrollado por el Ministerio de Infraestructuras y Transporte japonés junto a la Agencia Meteorológica Japonesa (JMA) con el objetivo de mejorar la precisión, la integridad y la disponibilidad de las señales para uso en navegación por satélite.

Tras pruebas y meses de puesta a punto, el MSAS fue declarado operacional en septiembre de 2007 ofreciendo desde entonces servicio de guiado horizontal en la fase en ruta y en aproximaciones de no precisión.

Los planes de futuro tienen como prioridad la capacitación del sistema para uso en operaciones LPV-200 y el uso de señales de doble frecuencia.

3.2.4. GAGAN

El GPS Aided Geo Augmented Navigation es el sistema SBAS indio. Este sistema fue desarrollado conjuntamente por la Autoridad Aeroportuaria India y la Agencia Espacial India (ISRO). En 2001 se estipularon tres fases de implementación del programa que consistían en:

1. Demostración de la tecnología
2. Fase inicial experimental
3. Fase final operacional

Tras años de trabajo y problemas con la puesta en órbita de los satélites GEO destinados a dar cobertura SBAS, en 2013 se llevaron a cabo los test de estabilidad.

4. EGNOS

4.1. INTRODUCCIÓN

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) es el sistema regional europeo de aumentación basado en satélites. Junto a Galileo son las grandes apuestas de la Unión Europea para dotar a la región de un sistema avanzado de navegación por satélite con altas prestaciones de uso. El programa está siendo desarrollado por la UE, la ESA y EUROCONTROL.

Gracias a la constelación de satélites geostacionarios, junto al resto de la estructura, EGNOS puede ofrecer datos mucho más precisos que los sistemas GNSS convencionales, reduciendo notablemente los errores relacionados con las perturbaciones de la ionosfera.

Además, EGNOS es capaz de comprobar la integridad de la información recibida y alarmar al usuario en caso de que la posición estimada no sea de confianza. Este aspecto es fundamental para el uso de EGNOS en aplicaciones críticas como la navegación aérea.



Figura 22. Logotipo EGNOS

4.2. ARQUITECTURA

Siguiendo con la estructura habitual de todos los sistemas GNSS que hemos visto y los sistemas de aumentación basados en satélites, EGNOS se divide estructuralmente en tres segmentos: el segmento espacial, el segmento terrestre y el segmento usuario.

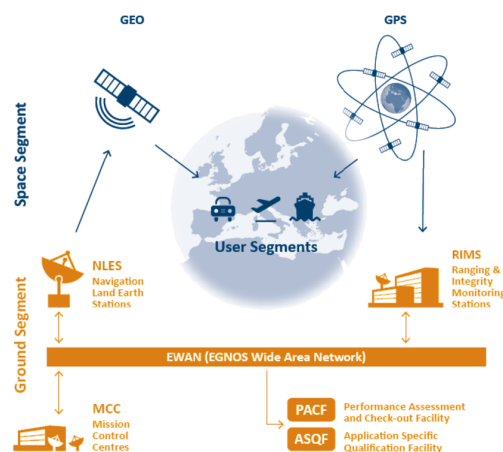


Figura 23. Esquema arquitectura EGNOS

4.2.1. SEGMENTO ESPACIAL

El segmento espacial está compuesto por tres satélites geoestacionarios situados de manera estratégica para mejorar la disponibilidad, maximizar el ángulo de visión para así reducir al mínimo la posibilidad de un bloqueo de la señal y disponer siempre de un mínimo de dos satélites dando cobertura al área principal para tener datos redundantes.

Los satélites de la constelación EGNOS son los siguientes:

1. Inmarsat-3 AOR-E (Región Océano Atlántico Este).
2. Inmarsat-3 IOR-W (Región Océano Índico Oeste).

Ambos satélites son dispositivos de tercera generación de Inmarsat. Juntos portan la carga de navegación de EGNOS. El primero fue lanzado en septiembre de 1996 y se identifica por el código PRN 120. Por su parte, el segundo fue lanzado en febrero de 1998 y tiene el código PRN 126.

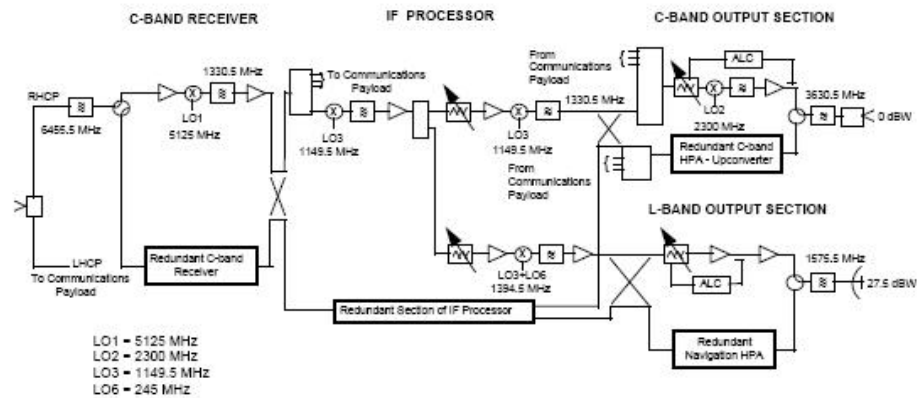


Figura 24. Estructura de los satélites Inmarsat

3. ESA-Artemis.

El ESA-Artemis es un satélite muy particular en el ámbito de las telecomunicaciones. Fue puesto en órbita en enero de 2003, introduciendo nuevas tecnologías avanzadas destinadas a mejorar la navegación, la comunicación móvil y las comunicaciones entre satélites. Este satélite emite en banda de frecuencia L.

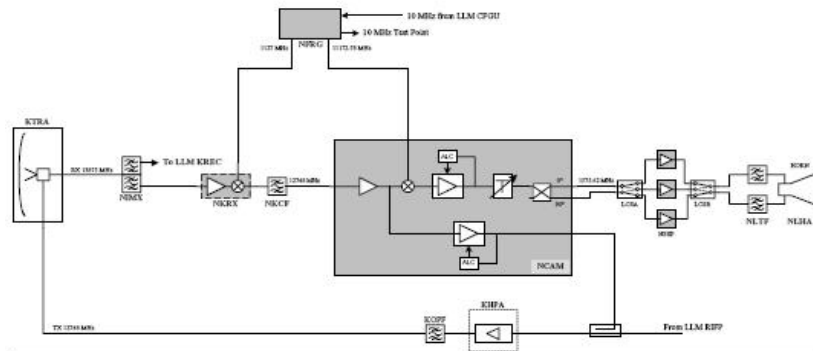


Figura 25. Estructura del satélite ESA-Artemis

4.2.2. SEGMENTO TERRESTRE

El segmento terrestre de EGNOS está compuesto por una red de estaciones repartidas por el mundo, principalmente en el continente europeo. Estas estaciones son de varios tipos: estaciones de monitorización de la integridad, cuatro centros de control, seis estaciones de enlace entre satélites y tierra, etc. Además, a estas instalaciones se les suman otras de apoyo y servicio.

- **RIMS (*Ranging Integrity Monitoring Stations*):** son estaciones encargadas de recoger las medidas de los satélites GNSS y transmitir estos datos brutos al centro de procesamiento de cada MCC. Están situadas en un área extensa (Figura XX) para dar buen servicio en toda la zona de operaciones y existen de tres tipos:
 - **RIMS A:** suministra mediciones crudas de satélites EGNOS/GNSS visibles. Estos datos se utilizan en los CPF para calcular las correcciones de señal apropiadas y estimar los umbrales de confianza.
 - **RIMS B:** al igual que las RIMS de tipo A, estas instalaciones recogen mediciones crudas de los satélites EGNOS/GNSS visibles. Sin embargo, estos datos son empleados para comprobar los mensajes de difusión de la señal y garantizar la integridad de EGNOS.
 - **RIMS C:** estas estaciones se encargan de detectar fallos en la señal emitida por los satélites si se produce alguna anomalía en la onda que de las señales que irradian.
- **MCC (*Mission Control Centers*):** son los centros de control de EGNOS que se encargan de controlar y supervisar el sistema y también de procesar la información recibida de los satélites. Existen cuatro MCC en la red situados en Torrejón (España), Langhen (Alemania), Ciampino (Italia) y Swanwick (Reino Unido). Dentro de ellos se encuentran:
 - **CCF (*Control Center Facility*):** se encargan de controlar todo el segmento terrestre de EGNOS y supervisar el correcto funcionamiento de la misión.
 - **CPF (*Control Processing Facility*):** realizan un conjunto de procesamientos y verificaciones. Por lo que respecta a los procesamientos, recogen el flujo de datos de las RIMS A y, a partir de ellos, se calculan las correcciones de los relojes GPS (rápidas) y las correcciones ionosféricas (lentas). Respecto a las verificaciones, se cruzan los datos de las RIMS B y C para comprobar la integridad del sistema y así poder garantizársela a los usuarios de EGNOS.
- **NLES (*Navigation Land Earth Stations*):** son instalaciones encargadas del sincronismo horario de EGNOS. Esta hora EGNOS es transmitida a los satélites GEO por la frecuencia L1. Además se encargan de transmitir los mensajes EGNOS a los satélites de la constelación y tienen un cuadro de integridad para asegurarse de que lo que es transmitido por los satélites GEO a los usuarios finales es la

información que se les ha enviado a ellos. El segmento terrestre de EGNOS cuenta con seis estaciones NLES, dos por cada satélite de la constelación.

- **EWAN (*EGNOS Wide Area Network*):** tiene como función enlazar a todos los componentes del segmento terrestre de EGNOS. Cuenta con enlaces MCC-MCC, de alta capacidad y que suponen la columna vertebral de EWAN; enlaces MCC-NLES, que aseguran el enlace con los satélites GEO; y enlaces MCC-RIMS, que sirven para el procesamiento de datos.
- **Instalaciones de apoyo:** EGNOS cuenta con dos estaciones de apoyo a la red principal.
 - **PACF (*Performance Assessment and Check-out Facility*):** sirve para coordinar las operaciones y el mantenimiento del segmento terrestre. Además, supervisa el funcionamiento general del sistema. Está situado en Toulouse (Francia).
 - **DVP (*Development and Verification Platform*):** esta instalación se encuentra integrada en el PACF. Se encarga de comprobar la validez de los requerimientos de EGNOS.
 - **ASQF (*Application Specific Qualification Facility*):** esta instalación es encargada de proporcionar el soporte a la aviación civil y las autoridades de certificación aeronáutica de las aplicaciones de la interfaz del usuario para validar y certificar las aplicaciones de EGNOS. Está situada en Torrejón (España).

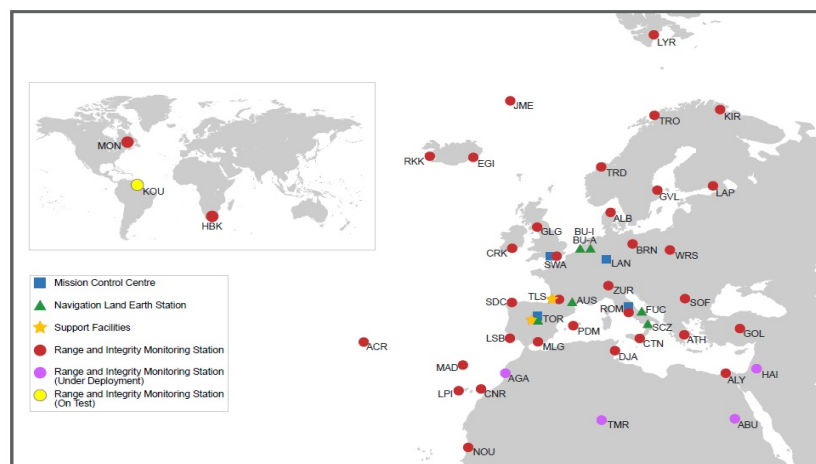


Figura 26. Mapa con las instalaciones del segmento terrestre de EGNOS

4.2.3. SEGMENTO USUARIO

El segmento usuario consiste en cualquier receptor GNSS compatible con las señales de EGNOS, es decir, que permita computar las correcciones de EGNOS sobre las señales GNSS convencionales.

4.3. TRATAMIENTO DE DATOS

El proceso de tratamiento de datos está separado en dos ciclos que deben ser completados en menos de seis segundos para cumplir con los requerimientos de tiempo de alarma de EGNOS. Estos dos ciclos son:

1. Ciclo de procesamiento.
2. Ciclo de validación.

4.3.1. CICLO DE PROCESAMIENTO

Este ciclo se encarga de elaborar las correcciones de las señales GNSS y la información de la integridad. Para ello, es necesario recoger los datos brutos de los satélites GNSS y GEO a través de las RIMS A. Los datos se componen, por una parte, de las mediciones de los pseudorrangos de los satélites GNSS/GEO y, por otra parte, de los datos temporales de los relojes atómicos. Gracias a la conexión de la red con un reloj atómico (UTCop) se puede obtener la diferencia de tiempo entre este reloj atómico y la referencia temporal de EGNOS (ENT).

Estos datos brutos son enviados a los CPF que son los encargados de generar las correcciones y los mensajes de integridad. Este proceso tiene lugar en cuatro pasos:

1. Preprocesado y validación.
Los datos de entrada de las RIMS se validan y se procesan para eliminar los errores sistemáticos tales como los ionosféricos y troposféricos. Además los corrimientos de fase son detectados y eliminados, así como el ruido blanco y los efectos multicamino.
2. Cálculo de datos de aumentación de EGNOS.
Es la tarea principal del CPF. Durante esta etapa se elaboran las correcciones de los satélites GNSS relativas a los parámetros orbitales y del reloj. También se elaboran las correcciones respectivas al retraso vertical ionosférico sobre los puntos (IGP) y se estiman los errores residuales asociados a las correcciones (UDRE y GIVE).
3. Comprobación y estimación de calidad.
En este paso se evalúa la integridad de los satélites y las correcciones ionosféricas que se han calculado en el paso previo, verificando que los errores residuales tras la aplicación de las correcciones son consistentes. Tras la verificación de los errores se establece un indicador de la calidad del servicio proporcionada por el CPF. Este indicador de la calidad es usado por los NLES para determinar cuál será el CPF principal.
4. Gestión del procesado del mensaje de salida.
En este último paso se genera el mensaje de salida y se le da el formato adecuado de acuerdo a los estándares internacionales.

Estos cuatro pasos están supeditados a una serie de complejos algoritmos matemáticos que afectan directamente al rendimiento general de EGNOS. En concreto, las estimaciones del UDRE y el GIVE son los puntos más críticos del ciclo de procesamiento.

Una vez que los mensajes de EGNOS han sido generados, se envían a los NLES. Es entonces cuando se usan para modular la señal GNSS, la cual se transmite a los satélites GEO que la difunden a los usuarios.

4.3.2. CICLO DE VALIDACIÓN

Esta etapa del proceso de tratamiento de datos consiste en la recolección de datos a través de las RIMS B y C para la validación de las correcciones realizadas durante el primer ciclo. Los datos se recogen en las RIMS B y C y se envían a los CPF, donde se verifica la integridad en el posicionamiento del usuario y, en consecuencia, la veracidad de los mensajes generados durante el ciclo de procesamiento.

Para comprobar el UERE (*User Equivalent Range Error*) y el UDRE (*User Differential Range Error*) se toman medidas desde diferentes RIMS respecto a un único satélite para obtener la mejor información estadística sobre el error en el pseudorange (UERE) y sobre su error residual (UDRE). Si los valores obtenidos difieren significativamente respecto a los obtenidos en el anterior ciclo se activa una alerta de integridad sobre ese satélite.

Para verificar el GIVD (*Grid Ionospheric Vertical Delay*) y el GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*) se combinan medidas GNSS de doble frecuencia para conseguir una única estimación del retraso ionosférico (GIVD) en una red bidimensional de puntos (IGP) con un cierto error residual (GIVE). Análogamente al proceso anterior, se comparan estos datos con los que se han transmitido a los usuarios tras el ciclo de procesamiento y, si hay diferencias significativas, se alza una alarma de integridad sobre el punto de la red IGP concreto.

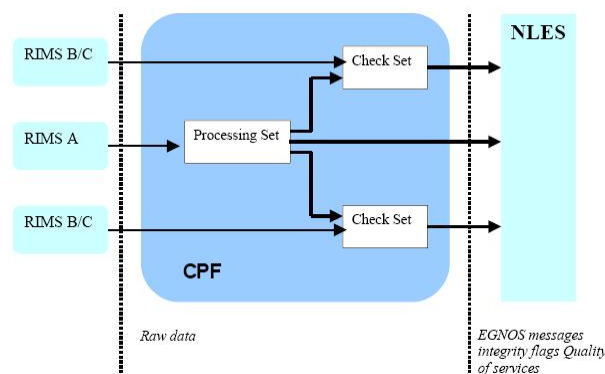


Figura 27. Esquema del tratamiento de datos en EGNOS

4.4. MENSAJES DE EGNOS

4.4.1. ESTRUCTURA

Los mensajes de EGNOS siguen la estructura definida por el documento RTCA MOPS DO-229-C. Son transmitidos a través de la banda de frecuencia L1 (1575.42 MHz) a una velocidad de 250 bits/s. La longitud del mensaje es de 250 bits divididos en cuatro partes que se muestran en la siguiente tabla.

Posición del bit	Nombre de la sección	Función
0-7	Preámbulo	Asegurar la sincronización entre el satélite y el receptor
8-13	Identificador del tipo de mensaje	Definir el tipo de mensaje
14-225	Campo de datos	Proporcionar los datos correspondientes al tipo de mensaje
226-249	Información de paridad	Comprobar la redundancia y los errores

Tabla 9. Prestaciones del *Safety of Life* de Galileo

4.4.2. TIPOS DE MENSAJES

Los mensajes de EGNOS pueden ser de tipo muy variado. De acuerdo al tamaño del identificador del tipo de mensaje (6 bits) son posibles 64 tipos de mensaje; sin embargo, hasta la fecha solo se han generado 20 tipos de mensajes distintos, los cuales quedan recogidos en la siguiente tabla.

Tipo	Contenido
0	No usar en aplicaciones de precisión
1	Datos de la máscara PRN
2-5	Correcciones rápidas
6	Información de la integridad
7	Factor de degradación de las correcciones rápidas
9	Mensaje de navegación GEO (posición, tiempo, velocidad, etc)
10	Parámetros de degradación de las correcciones a largo plazo
12	Parámetros de sincronismo temporal entre EGNOS y UTC
17	Almanaques de los satélites GEO
18	Máscaras IGP
24	Mezcla de correcciones rápidas y a largo plazo
25	Errores de las correcciones a largo plazo
26	Correcciones en el retraso ionosférico
27	Mensaje de servicio SBAS
28	Matriz de covarianza de las efemérides de los relojes de los satélites
62/63	Mensaje de test internos / Mensaje nulo

Tabla 10. Tipos de mensajes de EGNOS

Estos mensajes pueden separarse en distintos grupos según la información que aporten al usuario: mensajes de información del satélite, mensajes de información ionosférica y otros mensajes.

4.4.2.1. MENSAJES DE INFORMACIÓN DEL SATÉLITE

Estos mensajes contienen las correcciones diferenciales que se aplican a cada satélite para mejorar la información del reloj y de la órbita proporcionada por los servicios de navegación GNSS. También se difunde el mensaje de navegación de los satélites GEO, ya que ningún sistema externo proporciona sus datos de efemérides.

Tipo 1

El mensaje tipo 1 incluye la máscara PRN elegida entre los satélites GNSS y GEO aplicables. En lugar de mandar el PRN de cada satélite con cada una de las correcciones, se crea una máscara para poder ahorrar espacio en los mensajes. Para indicar el satélite cuyo PRN se está usando, el bit n-ésimo del mensaje se pone a 1 indicando que se está usando el satélite n-ésimo.

Tipos 2-5

Los mensajes de tipo 2, 3, 4 y 5 incluyen las correcciones rápidas y los valores del UDRE. El mensaje tipo 2 tiene información acerca de los 13 primeros satélites, el tipo 3 tiene información sobre los satélites 14 al 26 y así sucesivamente con el número de satélites. Si el total de satélites es menor que 40 el mensaje tipo 5 no será usado, si fuese menor que 26 no se difundirá el mensaje tipo 4. Por último, si hubiese menos de 6 satélites sobre los que transmitir sus correcciones no se emitirá ningún mensaje del tipo 2 al 5, sino que se sustituirá por un mensaje de tipo 24.

Tipo 6

El mensaje de tipo 6 contiene la información acerca de la integridad de 51 satélites, que es el número máximo que puede haber en la máscara PRN. También incluye el IODF (*Issue Of Data Fast Corrections*) para relacionar los UDREI (*UDRE Indicator*) con las correcciones incluidas en los mensajes tipo 2 a 5.

Tipo 7

El mensaje tipo 7 incluye los factores de degradación para las últimas correcciones recibidas en los últimos mensajes tipo 2 a 5.

Tipo 9

El mensaje tipo 9 contiene la información acerca de la navegación de los satélites GEO. Debido a que los satélites GEO no pertenecen a ningún sistema de posicionamiento global, la efemérides de estos satélites no está disponible de manera externa, por lo que es EGNOS el encargado de proporcionar estos datos al usuario.

Tipo 17

El mensaje tipo 17 contiene el almanaque de los tres satélites GEO que componen la constelación de EGNOS. Si en algún momento la constelación aumentase su tamaño, se emitirían mensajes adicionales. Los almanaques solamente proporcionan información acerca de la salud de cada satélite y su status actual, además de su posición aproximada. Este mensaje solo es usado por el usuario de manera informativa y nunca debe ser incluido en el cómputo de su posición, para ello, hay que tener en cuenta los parámetros emitidos en el mensaje tipo 9.

Tipo 24

El mensaje tipo 24 incluye correcciones rápidas como lentas. Se puede transmitir si el número de satélites en el mensaje de correcciones rápidas es menor o igual a 6. La primera mitad del mensaje incluye las correcciones rápidas de 6 o menos satélites mientras que la segunda parte incluye la misma información que medio mensaje tipo 25.

Tipo 25

El mensaje tipo 25 incluye estimaciones de las variaciones de las efemérides y de los errores de los relojes respecto de la efemérides y los parámetros del reloj del satélite del servicio de navegación. Se incluye el IODE (*Issue of Data Ephemeris*) para poder relacionar las correcciones a largo plazo con la efemérides usada para el cálculo de las correcciones.

Tipo 28

El mensaje 28 es un mensaje opcional incluido en las últimas versiones de las normas. Este mensaje puede ser transmitido para proporcionar la matriz de covarianza de los errores del reloj y la efemérides. Esta matriz se actualiza con la misma velocidad que las correcciones a largo plazo, ya que varía lentamente en función de la localización del satélite, la geometría de observación de la estación de referencia y la confianza en la medida de la estación de referencia.

4.4.2.2. MENSAJES DE INFORMACIÓN IONOSFÉRICA

Estos mensajes transmiten las correcciones ionosféricas calculadas sobre los puntos de una red (IGP) situados a 350 km sobre el elipsoide WGS-84. Estas correcciones son aplicables a la señal L1 y, gracias a ellas, es posible que el usuario conozca el retraso ionosférico que sufre al interpolar su posición respecto los puntos de la red IGP, de los cuales se conoce perfectamente el retraso ionosférico (GIVD).

Tipo 18

El mensaje tipo 18 incluye la máscara ionosférica. Cada mensaje de este tipo que se emite corresponde con la información de la máscara para un punto concreto de la red (IGP). Además en este mensaje se incluye el IODI (*Issue of Data Ionosphere*) para que el usuario pueda saber la vigencia de la máscara y si se producen cambios en ella. Para ahorrar espacio en los mensajes, los mensajes relativos a las correcciones ionosféricas solo muestran los retrasos ionosféricos de una determinada banda de puntos de la red. Para poder procesar las correcciones del mensaje tipo 26 se deben haber recibido todos los mensajes tipo 18.

Tipo 26

El mensaje tipo 26 proporciona las correcciones sobre el retraso de la ionosfera (GIVD) y su precisión en términos del GIVEI para los puntos concretos que forman la máscara. Debido a que solo caben las correcciones sobre 15 IGP's en cada mensaje y cada banda ionosférica puede estar formada por hasta 201 IGP's, las bandas se dividen en bloques.

Los status de los IGP pueden ser los siguientes:

- *Use*: si existe información disponible del retraso estimado en ese punto y el GIVEI.
- *Not Monitored*: si el IGP no aparece en la máscara o, incluso apareciendo, no hay datos sobre él.
- *Don't Use*: si se detecta un error en los datos o el retraso estimado es mayor de 63.75 m.

4.4.2.3. OTROS MENSAJES

En este grupo se incluyen los mensajes que no están directamente relacionados con las correcciones ionosféricas o de los satélites. La información que proporcionan es de carácter secundario, pero es útil para ciertas aplicaciones como aproximaciones de precisión (PA), estimaciones precisas del tiempo UTC o para degradar el UDRE en regiones determinadas.

Tipo 0

El mensaje tipo 0 fue usado durante la fase de test de SBAS. Tras la recepción de un mensaje de tipo 0 la información recibida debe ser descartada por el usuario para aplicaciones críticas dado que no se asegura la integridad del sistema.

Tipo 10

El mensaje tipo 10 contiene parámetros de degradación que pueden ser usados para las correcciones rápidas y lentas en operaciones PA. Dado que no contiene información alguna acerca de los satélites o los IGP, solo es necesario que se envíe un mensaje de este tipo.

Tipo 12

El mensaje tipo 12 contiene las diferencias de tiempo entre los distintos sistemas de referencia temporales. En primer lugar, se proporciona los parámetros UTC y posteriormente se añaden las características de los tiempos de diferentes sistemas GNSS.

Tipo 27

El mensaje tipo 27 es usado para aumentar los valores de error (UDRE) que se difunden en una zona concreta. Para ello, se emite un valor multiplicativo del UDRE que afecta hasta a cinco zonas; si el número de zonas donde se quiere degradar la señal es mayor que cinco, es necesario que se emitan más mensajes de tipo 27.

Este mensaje es de tipo opcional y está fuera de los mensajes estándares de EGNOS.

Tipo 62

El mensaje tipo 62 solo se transmite para test internos SBAS. Tras la recepción de este mensaje el usuario seguirá con el uso normal de EGNOS.

Tipo 63

El mensaje tipo 63 solo se transmite si no hay ningún otro mensaje que difundir.

4.5. SERVICIOS DE EGNOS

4.5.1. OPEN SERVICE (OS)

El servicio abierto de EGNOS es un servicio libremente accesible en Europa y gratuito para cualquier usuario que posea un receptor SBAS/GNSS compatible. Este servicio está disponible desde el 1 de octubre de 2009. El gran objetivo de este servicio es mejorar la precisión en el posicionamiento corrigiendo varias fuentes de error que afectan a las señales GNSS. Las correcciones transmitidas por EGNOS ayudan a paliar errores relacionados con los relojes de los satélites y su posicionamiento y con los efectos ionosféricos. Además, EGNOS proporciona integridad, ya que es capaz de alertar al usuario del rastreo de señales erróneas que le llevarían a un mal posicionamiento.

De acuerdo con el servicio de apoyo de EGNOS, la precisión bidimensional en el plano horizontal que se garantiza es de 3 m (95% de confianza), mientras que la precisión unidimensional en el eje vertical es de 4 m (95% de confianza).

4.5.2. SAFETY OF LIFE (SoL)

El SoL es un servicio disponible sin cargo destinado principalmente para las operaciones más exigentes. El objetivo principal del SoL fue dar soporte a las operaciones de aviación civil LPV cumpliendo con los requisitos impuestos por la OACI y también con las SARPs (*Standard and Recommended Practices*) para SBAS. Este servicio también pretende dar cobertura a otras aplicaciones (marítimas, ferrocarril, carreteras...) en las cuales la vida del usuario pudiese verse en peligro si la señal del sistema de navegación se degradase sin alertar en un cierto periodo de tiempo al usuario.

Las operaciones llevadas a cabo basadas en el SoL requieren de una autorización previa por parte de la autoridad competente y están disponibles desde el 2 de marzo de 2011.

4.5.3. EGNOS COMMERCIAL DATA DISTRIBUTION SERVICE (CDDS)

El CDDS es un servicio destinado a usuarios que quieren mejorar las prestaciones del servicio abierto para un uso comercial y profesional. Una de las características principales de este servicio es que los datos adicionales de mejora no se transmiten vía satélite sino por otros medios de distribución, como por ejemplo vía Internet.

El primer paso para construir el actual servicio CDDS fue la creación por parte de la Comisión Europea de EDAS (*EGNOS Data Access Service*), mediante el cual se podía acceder a través de internet a los datos brutos de las RIMS y también se retransmitían los datos de EGNOS usando el estándar RTCM SC 104, accesible para receptores DGPS marítimos.

El servicio está disponible desde julio de 2012 y actualmente da valor añadido a actividades como aplicaciones móviles, transporte en carretera, marítimo y por ferrocarril, protección civil, etc.

5. PBN

La navegación basada en prestaciones (PBN, *Performance Based Navigation*) representa la evolución que se está llevando a cabo en la navegación aérea dejando atrás la navegación convencional basada en la trayectoria punto a punto mediante radiobalizas para avanzar hacia una navegación basada en rendimiento.

El término PBN agrupa diversas técnicas nuevas de navegación aérea basadas en rendimiento dentro de las cuales destacan la *Required Navigation Performance* (RNP) y la *Area Navigation* (RNAV). Todas estas técnicas deben cumplir con los requisitos para la navegación PBN que impone la OACI. Se establecen requisitos en cuanto a la precisión, integridad, disponibilidad y continuidad, los cuales varían según el tipo de navegación y el instante de vuelo. En el manual de la OACI sobre navegación PBN también se indican las funciones de navegación requeridas por el sistema, los sensores de navegación que deben estar integrados y los requisitos a cumplir por la tripulación de vuelo.

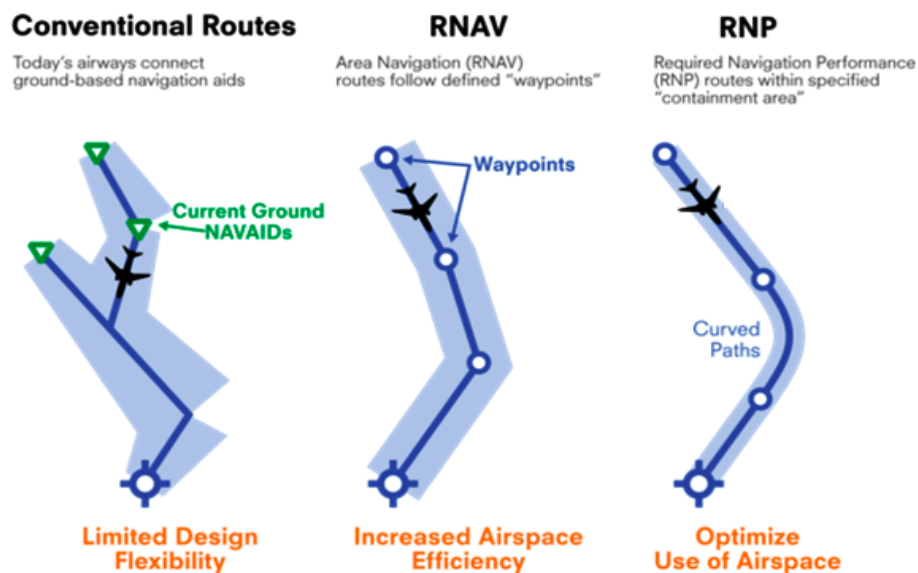


Figura 28. Diferencias entre navegación convencional, RNAV y RNP

- **RPN:** este concepto especifica los requisitos mínimos que una aeronave y su sistema de navegación deben cumplir para operar en una determinada fase de vuelo en un espacio aéreo concreto. El RNP lleva asociado consigo la definición de un región de confinamiento alrededor de cada trayectoria y cada fase de vuelo. Dicha región consiste en una serie de ventanas que debe atravesar la aeronave de forma satisfactoria. Como criterio de protección se establece que la aeronave puede salir de esta región de confinamiento una vez cada diez millones de operaciones.
- **RNAV:** este método permite la planificación y diseño de rutas aéreas no apoyadas en las radioayudas de navegación convencionales. De esta manera se permite realizar trayectorias de vuelo más directas y flexibles que permiten ahorrar combustible, tiempo, etc. Los sistemas RNAV se clasifican en cuanto a su potencial:

- **RNAV 2D:** sistema capaz de realizar navegación de área en el plano horizontal.
- **RNAV 3D:** sistema capaz de realizar navegación de área en el espacio.
- **RNAV 4D:** sistema capaz de realizar navegación de área en el espacio agregando la función tiempo.

La implementación de técnicas de navegación PBN representa el futuro del tráfico aéreo, ya que permiten diseñar rutas con menor separación que la tradicionalmente empleada, lo que implica una optimización del espacio aéreo. Esto repercute positivamente tanto en las entidades de aviación como en los usuarios, ya que ayuda a reducir costes, reduce la contaminación y el tiempo de vuelo entre otros factores.

5.1. REQUISITOS PBN

5.1.1. PRECISIÓN

La precisión es la primera característica a evaluar a la hora de certificar un sistema de navegación. Se define como la diferencia que existe entre la posición calculada por la estimación del sistema de navegación y la posición real del usuario. Normalmente se expresa como un percentil estadístico en la distribución de errores.

El resultado de esta característica se representa mediante la media de la estimación de la posición horizontal (HPE) y vertical (VPE) y los errores de navegación asociados a ellas (HNSE y VNSE).

La OACI establece unos requisitos de precisión para las aproximaciones APV-1 de 16 m en horizontal y 20 m en vertical, los cuales EGNOS cumple holgadamente debido a sus rendimientos.

5.1.2. INTEGRIDAD

La integridad es una medida de confianza del sistema de navegación sobre la exactitud de la información que se suministra. La integridad también comprende la capacidad del sistema de alertar de manera oportuna (dentro de un tiempo establecido y bajo la vulneración de ciertos niveles de protección) cuando el sistema no sea fiable y, por tanto, no deba ser utilizado en aplicaciones críticas.

Entre los fallos que podrían hacer que EGNOS no fuese de confianza y, por los que el usuario debería ser alertado, se encuentran los siguientes.

- Fallos en los satélites GNSS producido por deriva o por señales sesgadas. En este caso se debe detectar el fallo y aislar los satélites defectuosos.
- Difusión de correcciones diferenciales incorrectas causados a su vez por:
 - Fallos en el segmento terrestre.
 - Intromisión de ruido en el procesamiento de datos de referencia.

Dentro del concepto de integridad existen ciertos términos asociados cuya definición sigue:

- **Límite de alerta (AL).** Es la tolerancia al error que no puede sobrepasarse sin que se emita una alerta al usuario.
- **Tiempo de alerta (TAL).** Se define como el máximo tiempo que puede pasar desde el momento en que el sistema de navegación supere el AL hasta que envíe la señal de alarma.
- **Riesgo de integridad (IR).** Es la probabilidad de que ocurra el suceso $PE > AL$, donde PE es el error de posición.
- **Nivel de protección (PL).** Se trata de un error estadístico que asegura que la probabilidad de que el error de posición (PE) sea mayor o igual al riesgo de integridad (IR).

Por lo que respecta a la representación de la integridad, existen principalmente dos maneras de mostrarla: los índices de seguridad y los diagramas de Stanford.

- **Índice de seguridad:** El índice de seguridad es la relación entre el error del sistema de navegación y el nivel de protección. Para que una operación se considere segura este cociente debe ser menor que la unidad.
- **Diagrama Stanford:** Un diagrama Stanford es un gráfico en el que el error de posición (PE) está situado en el eje de abscisas y el nivel de protección en el eje de ordenadas. Está dividido en regiones por la diagonal que representa cuando estos dos valores son iguales y por los niveles de alerta, tanto en horizontal como en vertical. En el diagrama podemos ver dos zonas separadas por la diagonal de puntos discontinuas que representan el conjunto de puntos en los que el error de posición sería igual al nivel de protección. En la zona superior, en la que el nivel de protección será siempre mayor que el error existen dos zonas: la zona de operaciones normal en la que el nivel de protección además de ser mayor al error de posición es menor que el límite de alerta, siendo por tanto la zona óptima para las operaciones y la zona de servicio no disponible, en la que el nivel de protección es mayor que el nivel de alerta por lo que no se puede garantizar que se pueda realizar la operación y el sistema se encuentra no disponible. En la zona inferior de la diagonal nos encontramos en la región en la que el error de posición será siempre mayor que el nivel de protección, lo que implica que el sistema carece de integridad. Podemos distinguir dos zonas distintas en esta región: la zona de información engañosa en la que el error de posición es mayor que el de protección pero menor que el límite de alerta, lo que hace que la operación sea peligrosa y la segunda zona de información altamente engañosa, ya que además de lo anterior en este caso el error sí es mayor que el límite de alerta.

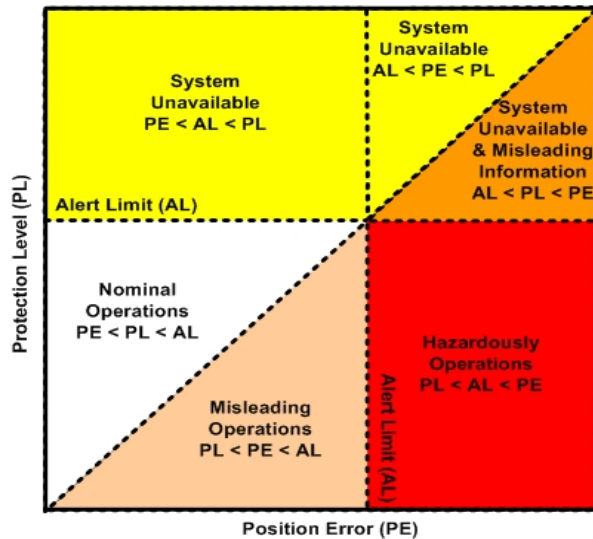


Figura 29. Ejemplo de Diagrama Stanford

En la siguiente figura se muestran tres situaciones del sistema en lo que respecta a la integridad. En la primera situación, el sistema funciona correctamente. Este buen funcionamiento se debe a que el error de posición está por debajo del nivel de protección y ambos están por debajo del límite de alerta ($HPE < HPL < HAL$). En la segunda situación, el sistema no está disponible debido a que la medida del nivel de protección es mayor que el valor del nivel de alerta ($HPL > HAL$). Por último, en el tercer caso, el sistema muestra incoherencias y el sistema está fuera de tolerancia.

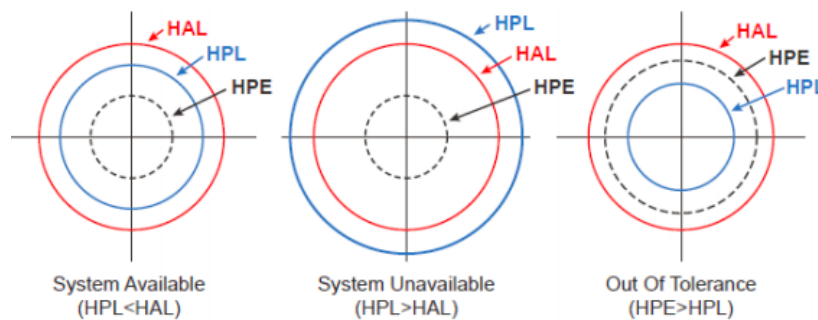


Figura 30. Situaciones de integridad del sistema

5.1.3. CONTINUIDAD

La continuidad de un sistema es la probabilidad de que el funcionamiento de dicho sistema sea mantenido durante el desarrollo de una determinada operación. En términos de navegación RNP, la continuidad se estudia como el tiempo medio entre interrupciones no programadas de disponibilidad. Este requerimiento es el que EGNOS peor cumple, llegando en ocasiones a no llegar al límite establecido por la OACI para operaciones APV-I. Con todo, el mismo organismo permite el uso de EGNOS en operaciones APV-I incumpliendo este requisito si se toman medidas que compensen esta circunstancia.

5.1.4. DISPONIBILIDAD

La disponibilidad de un sistema es la probabilidad de que un usuario sea capaz de usar el servicio de navegación en una zona geográfica y un instante de tiempo determinado. En concreto, la disponibilidad para EGNOS sería proporcionar cobertura con la precisión requerida cumpliendo con los correspondientes valores de integridad y continuidad. Este parámetro se evalúa en porcentaje de tiempo respecto a un periodo largo, en que el servicio se encuentra disponible incluyendo las paradas previstas e imprevistas. Esta característica es cumplida con creces por EGNOS, ya que la señal SBAS está disponible en Europa más del 99% del tiempo.

5.1.5. RECOPIACIÓN NUMÉRICA DE REQUISITOS PBN

Para concluir con los requisitos para la navegación PBN, se adjuntan dos tablas con los requerimientos numéricos impuestos por la OACI para cada fase de vuelo, así como de los valores característicos para la integridad.

Tipo de operación	Tiempo de alerta (TAL)	Límite alerta horizontal (HAL)	Límite alerta vertical (VAL)
En ruta (baja densidad)	300 s	4 NM	N/A
En ruta (continental)	15 s	2 NM	N/A
En ruta (terminal)	15 s	1 NM	N/A
NPA	10 s	0.3 NM	N/A
APV-I	10 s	40.0 m	50 m
APV-II	6 s	40.0 m	20 m
Aprox. CAT-I	6 s	40.0 m	15 - 10 m

Tabla 11. Valores de integridad según fase de vuelo

Tipo de operación	Exactitud horizontal 95%	Exactitud vertical 95%	Integridad	Continuidad	Disponibilidad
En ruta (baja densidad)	2 NM	N/A	$10^{-7} / h$	$10^{-8} / h - 10^{-4} / h$	0.99 - 0.99999
En ruta (terminal)	0.4 NM	N/A	$10^{-7} / h$	$10^{-8} / h - 10^{-4} / h$	0.99 - 0.99999
NPA	220 m	N/A	$10^{-7} / h$	$10^{-8} / h - 10^{-4} / h$	0.99 - 0.99999
APV-I	16 m	20 m	$1-2 \times 10^{-7}$ por aproximación	$1-8 \times 10^{-6}$ en 15 s	0.99 - 0.99999
APV-II	16 m	8 m	$1-2 \times 10^{-7}$ por aproximación	$1-8 \times 10^{-6}$ en 15 s	0.99 - 0.99999
Aprox. CAT-I	16 m	4-6 m	$1-2 \times 10^{-7}$ por aproximación	$1-8 \times 10^{-6}$ en 15 s	0.99 - 0.99999

Tabla 12. Requerimientos de prestaciones según el tipo de operación

BLOQUE II

VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS

6. VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS CON EGNOS

El proceso de validación de procedimientos con EGNOS consta de tres etapas. La primera de ellas es una toma de datos a largo plazo, la segunda consta de una toma de datos sobre el terreno a corto plazo y, por último, se debe realizar una fase de ensayos de vuelo con un receptor GNSS embarcado en una aeronave.

6.1. RESULTADOS LARGO PLAZO

La toma de datos a largo plazo se ha llevado a cabo tomando los informes mensuales divulgados por el ESSP (*European Satellite System Provider*), donde se pueden extraer los resultados de los distintos requerimientos de manera muy gráfica.

Para este trabajo se han utilizado los datos desde diciembre de 2017 a mayo de 2018, cuyos resultados vienen a continuación.

6.1.1. DISPONIBILIDAD

De acuerdo con el ESSP, la disponibilidad de EGNOS APV-I se define como el porcentaje de épocas en un mes en las cuales el nivel de protección (PL) está por debajo de los límites de alerta (en APV-I corresponden a HPL < 40 m y VPL < 50 m) sobre el periodo de tiempo total. Los valores que se representan en el diagrama siguiente corresponden a situaciones libres de fallos usando todos los satélites visibles.

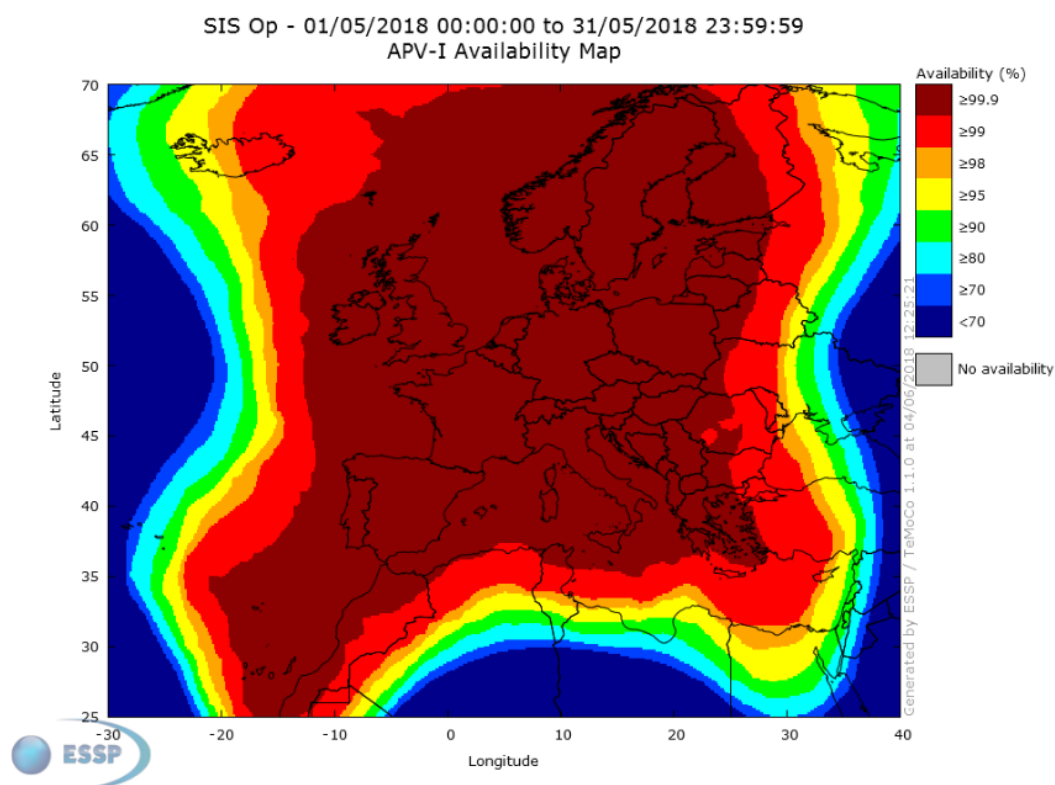


Figura 31. Mapa de disponibilidad de EGNOS en mayo de 2018

El anterior diagrama (Figura 31) es un ejemplo de los resultados divulgados por el ESSP para el mes de mayo de 2018. Los datos de los seis meses que forman la toma de datos a largo plazo de este trabajo quedan recopilados en la tabla 13.

Disponibilidad (%)	Dic-17	Ene-18	Feb-18	Mar-18	Abr-18	May-18
PRN 120	99,97	99,89	99,98	99,95	99,94	99,94
PRN 136	99,99	99,99	99,99	99,94	99,90	99,97
PRN 120 ó PRN 136	100	100	100	100	100	100

Tabla 13. Resultados de disponibilidad a largo plazo

Con estos resultados queda probado que EGNOS cumple perfectamente con el requisito de disponibilidad, pues en el área de servicio siempre hay cobertura por parte de alguno de los dos satélites actualmente operativos.

6.1.2. PRECISIÓN

El ESSP reporta la precisión de EGNOS APV-I como el percentil 95 de los errores vertical (VNSE) y horizontal del sistema (HNSE) de navegación a lo largo del mes. Los datos mostrados en la Tabla 14 corresponden a los obtenidos en la RIMS de Palma de Mallorca.

Precisión (m)	Dic-17	Ene-18	Feb-18	Mar-18	Abr-18	May-18
HNSE	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6
VNSE	0,9	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0

Tabla 14. Resultados de precisión a largo plazo

Con estos resultados obtenidos durante seis meses, se puede afirmar que EGNOS cumple con los requisitos de precisión para operaciones APV-I en la ubicación seleccionada. Como muestra la Tabla 12, la OACI impone un error horizontal máximo de 16 m y un error vertical máximo de 20 m.

6.1.3. INTEGRIDAD

El ESSP realiza mensualmente un registro de los eventos de integridad que ocurren en su área operativa. Estos eventos los define como los sucesos en los que el error del sistema de navegación es mayor o igual al nivel de protección para APV-I. Adicionalmente, el organismo europeo proveedor de servicios satelitales publica mensualmente los índices de seguridad verticales (VSI) y horizontales (HSI) como se muestra en las Figuras 32 y 33.

Por lo que respecta a los eventos de integridad, no ha ocurrido ninguno en los seis meses de la toma de datos a largo plazo.

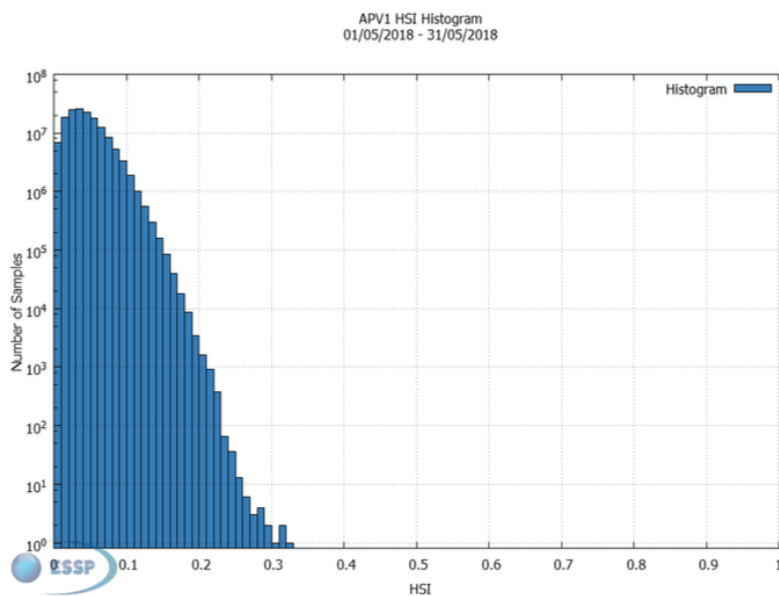


Figura 32. Histograma con los valores de HSI en mayo de 2018

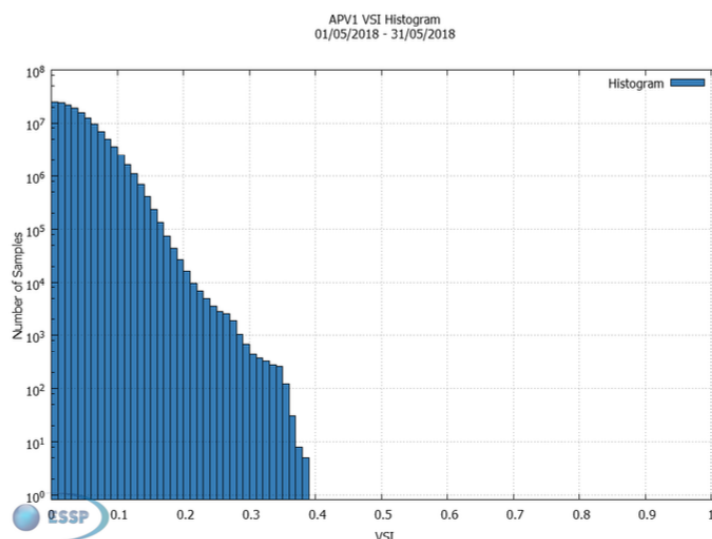


Figura 33. Histograma con los valores de VSI en mayo de 2018

En cada uno de los informes mensuales se puede extraer el valor del índice de seguridad vertical y horizontal. Los resultados se muestran en la Tabla 15.

Integridad	Dic-17	Ene-18	Feb-18	Mar-18	Abr-18	May-18
HSI	0,29	0,46	0,31	0,30	0,27	0,33
VSI	0,32	0,63	0,35	0,37	0,33	0,39

Tabla 15. Resultados de índices de seguridad en mayo de 2018

Con los resultados de la Tabla 15 y el hecho de que no haya ocurrido ningún evento que afecte a la integridad en estos seis meses, se concluye que EGNOS cumple con el requisito de integridad para operaciones APV-I.

6.1.4. CONTINUIDAD

El ESSP define el riesgo de continuidad como el resultado de dividir el número total de eventos de continuidad usando una ventana temporal de 15 segundos entre el número de muestras válidas y disponibles para operaciones APV-I. Un evento de continuidad ocurre si el sistema comienza la operación disponible y en alguno de los siguientes 15 segundos se vuelve no disponible.

Los datos de continuidad son publicados por el ESSP mediante diagramas de contorno como el de la Figura 34, ejemplo del monitoreo de la continuidad del mes de mayo de 2018.

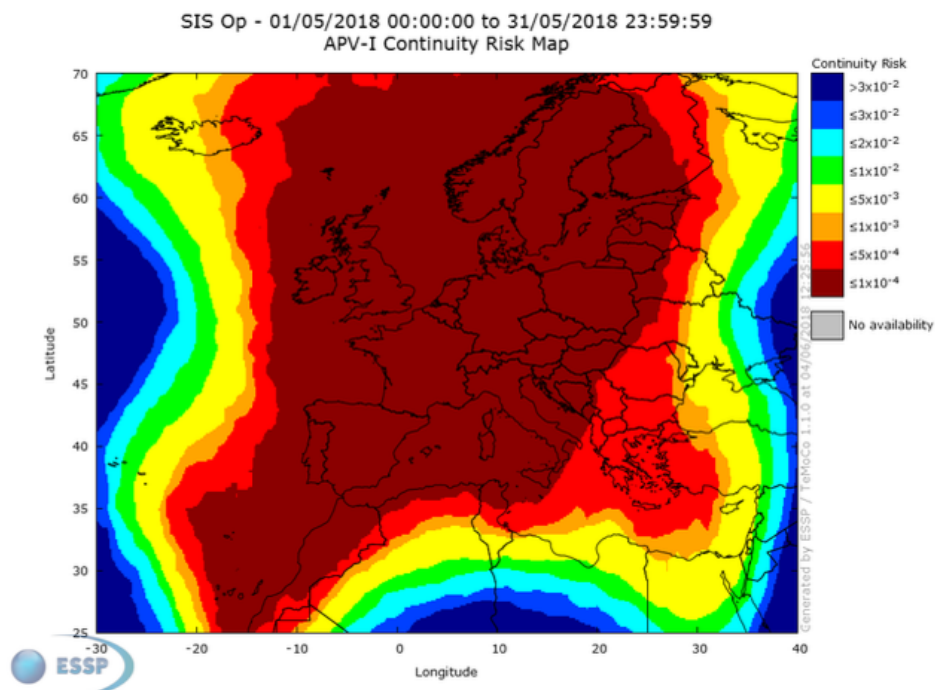


Figura 34. Mapa del riesgo de continuidad en mayo de 2018

De manera análoga al resto de requerimientos, se han recopilado los resultados de los seis informes mensuales. Dichos resultados quedan representados en la siguiente tabla.

	Dic-17	Ene-18	Feb-18	Mar-18	Abr-18	May-18
Riesgo de continuidad (evento / 15 s)	$\leq 1 \times 10^{-5}$	$\leq 1 \times 10^{-4}$	$\leq 1 \times 10^{-4}$	$\leq 1 \times 10^{-4}$	$\leq 1 \times 10^{-4}$	$\leq 1 \times 10^{-4}$

Tabla 16. Resultados de riesgo de continuidad a largo plazo

Como se vio en la tabla 12 de requisitos de la OACI, para operaciones APV-I el riesgo de continuidad debía estar entre $1-8 \times 10^{-6}$ eventos cada 15 s. Con los resultados obtenidos se concluye que EGNOS no cumple con la continuidad, si bien la OACI permite operar infringiendo este límite si se mitiga mediante ciertas acciones.

6.1.5. CONCLUSIÓN TOMA DE DATOS A LARGO PLAZO

Tras la exposición de los datos obtenidos durante seis meses a través de los informes mensuales de EGNOS se concluye que el sistema cumple perfectamente con los requisitos de disponibilidad, precisión e integridad y no cumple con la continuidad para operaciones APV-I. Con todo se pueden llevar a cabo operaciones de este tipo siempre que se mitiguen las deficiencias de continuidad.

6.2. RESULTADOS CORTO PLAZO

La segunda etapa del proceso de validación comprende una toma de datos a corto plazo en la ubicación concreta donde se estudia establecer el procedimiento APV-I con EGNOS. De esta manera se van a presentar los datos obtenidos en Mallorca desde el día 18 de junio de 2018 al 22 de junio de 2018.

6.2.1. 18 DE JUNIO DE 2018

Los diagramas y mapas de contorno obtenidos para la fecha 18 de junio de 2018 se muestran a continuación. Se han extraído mapas de continuidad, disponibilidad, nivel de protección vertical y horizontal y gráficas de los errores y los niveles de protección, a través de los cuales se podrá evaluar tanto la precisión con la integridad.

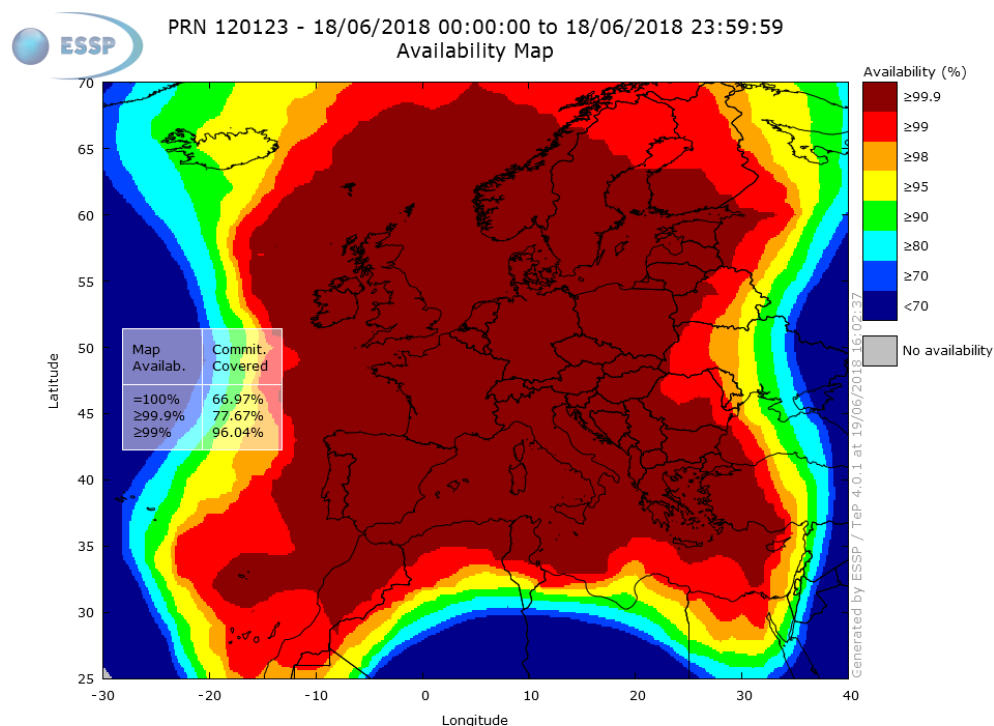


Figura 35. Mapa de disponibilidad del 18 de junio de 2018

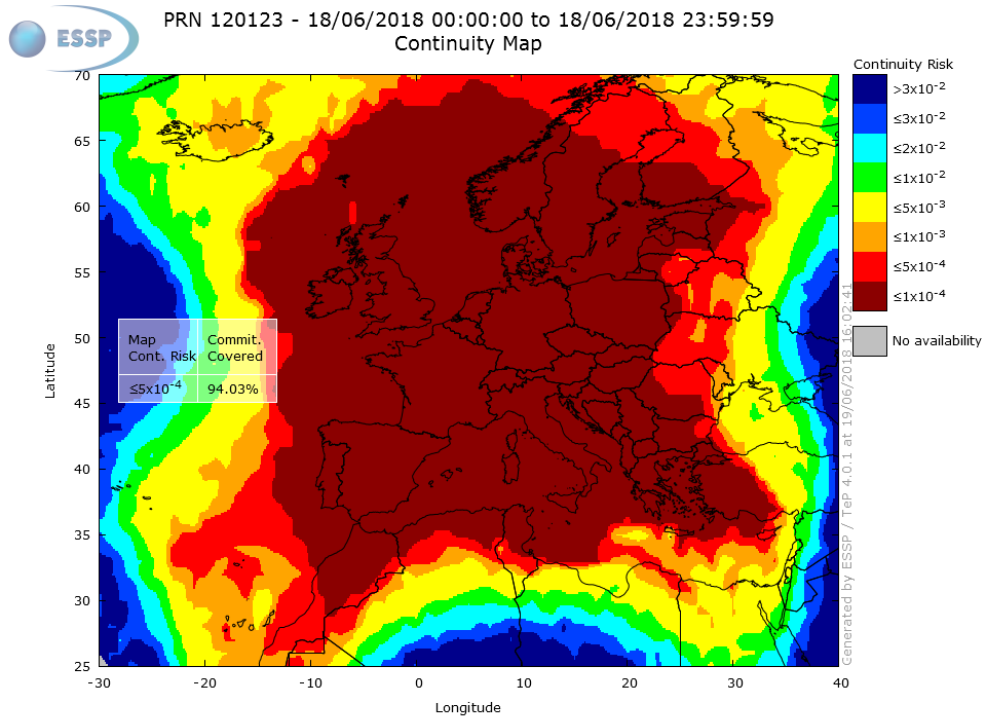


Figura 36. Mapa de continuidad del 18 de junio de 2018

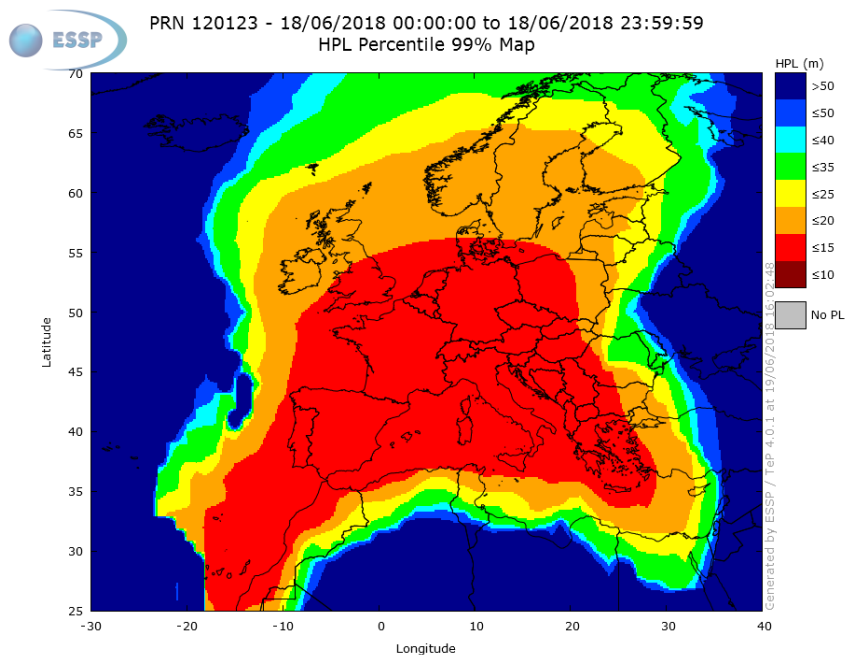


Figura 37. Mapa del HPL del 18 de junio de 2018

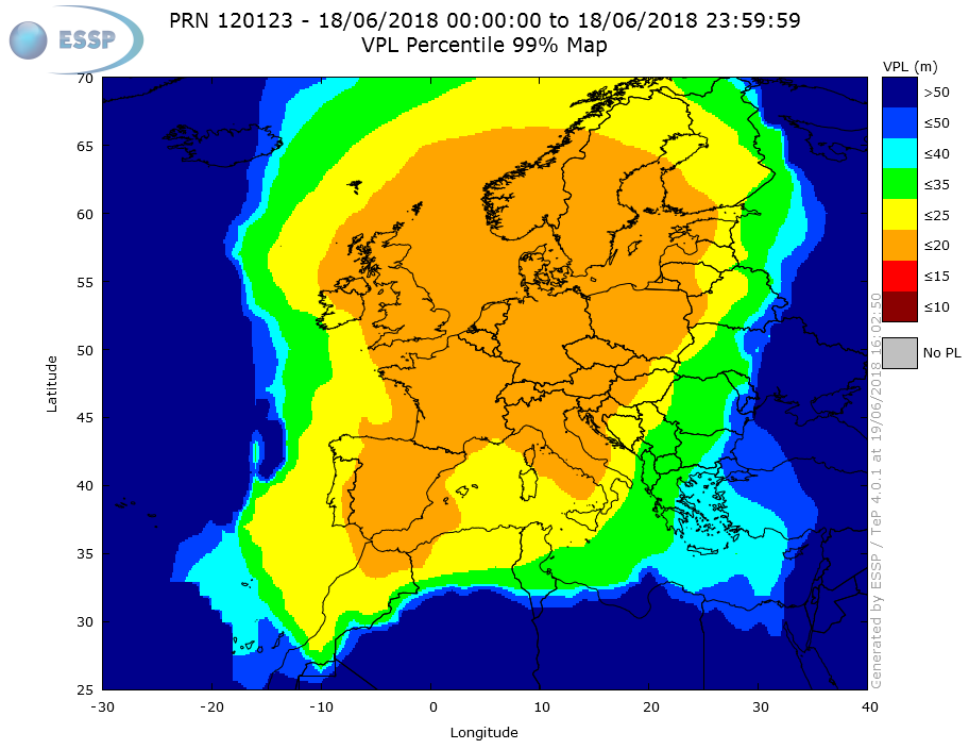


Figura 38. Mapa del VPL del 18 de junio de 2018

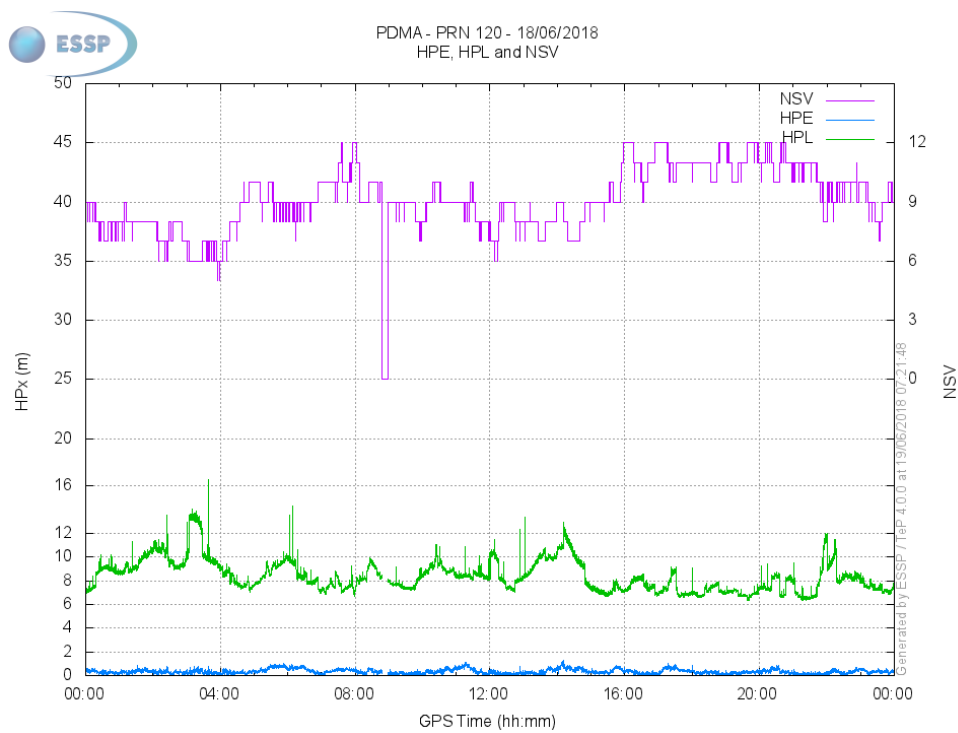


Figura 39. Gráfica del HPL y HPE del 18 de junio de 2018

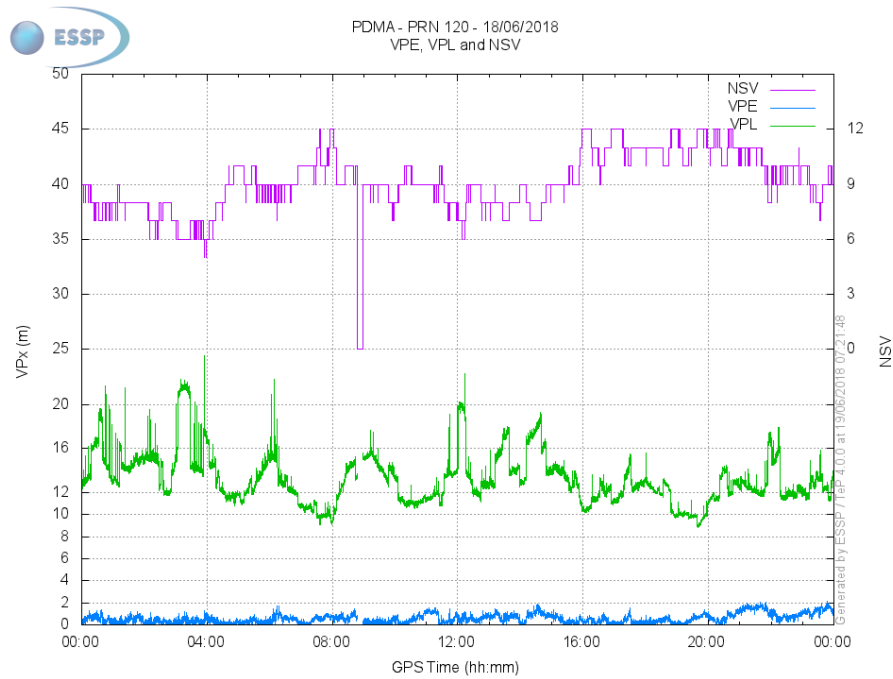


Figura 40. Gráfica del VPL y VPE del 18 de junio de 2018

Parámetro	Resultado día 18 de junio de 2018
Disponibilidad	$\geq 99,9 \%$
Riesgo de continuidad	$\leq 1 \times 10^{-4}$
HPE aprox.	0,8 m
HPL (HPL aprox.)	≤ 15 7,0 m
HSI aprox.	0,114
VPE aprox.	1,6 m
VPL (VPL aprox.)	≤ 25 12,0 m
VPI aprox.	0,133

Tabla 17. Resultados requerimientos del 18 de junio de 2018

Según los resultados obtenidos en la tabla 17, el día 18 de junio de 2018 se cumplen todos los requisitos PBN para operaciones APV-I excepto la continuidad.

6.2.2. 19 DE JUNIO DE 2018

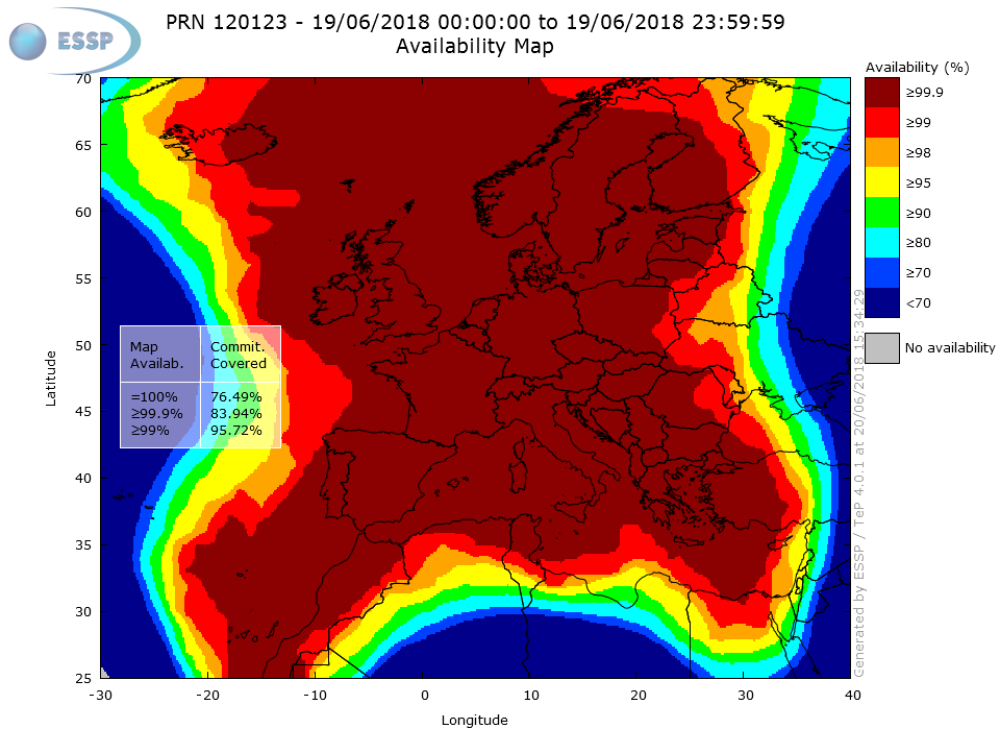


Figura 41. Mapa de disponibilidad del 19 de junio de 2018

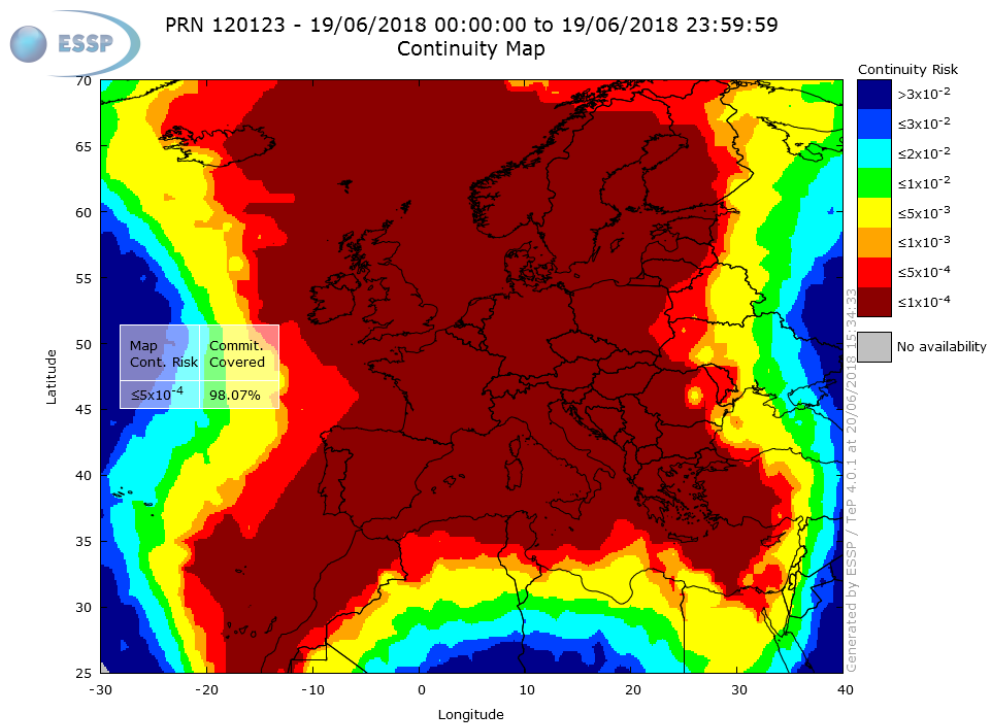


Figura 42. Mapa de continuidad del 19 de junio de 2018

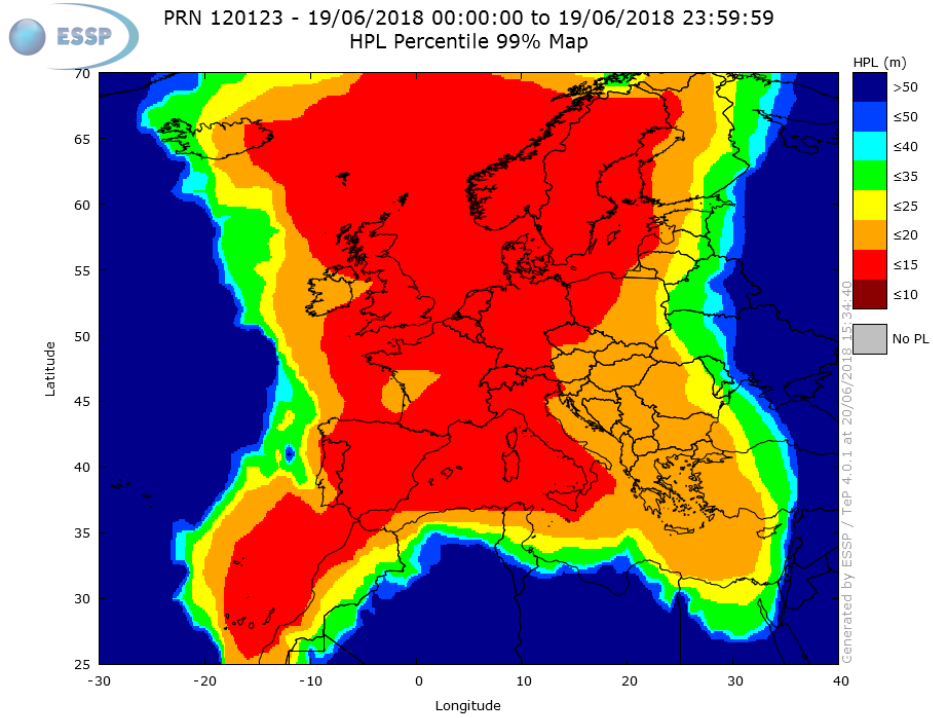


Figura 43. Mapa del HPL del 19 de junio de 2018

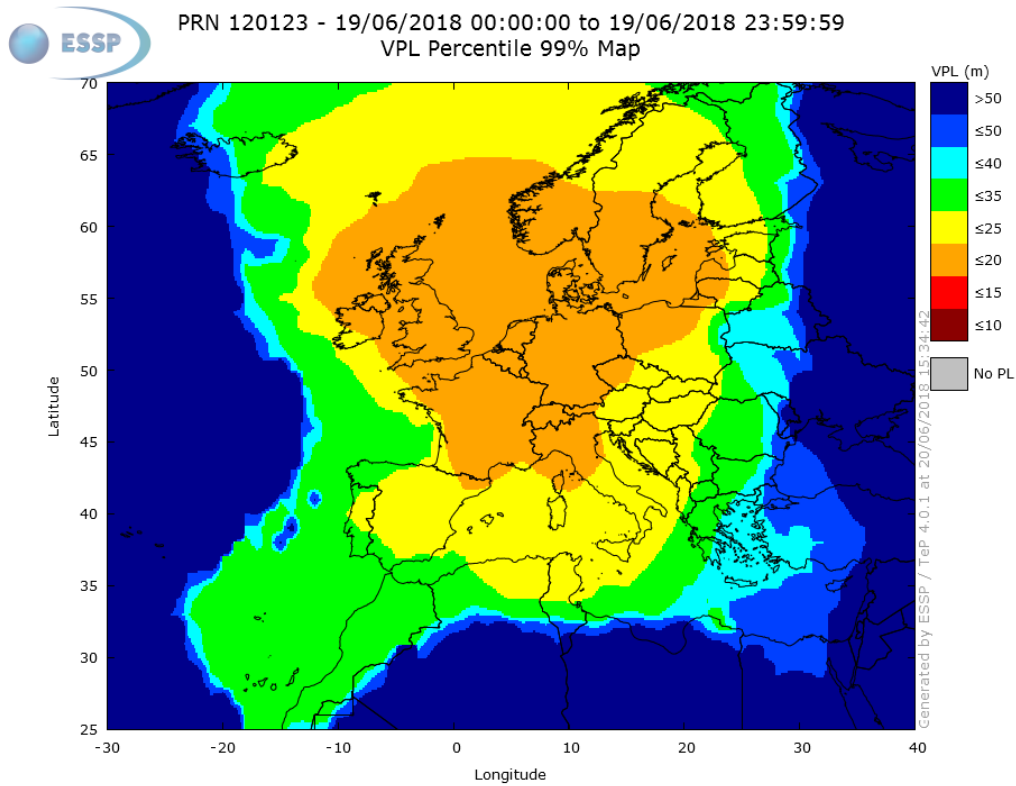


Figura 44. Mapa del VPL del 19 de junio de 2018

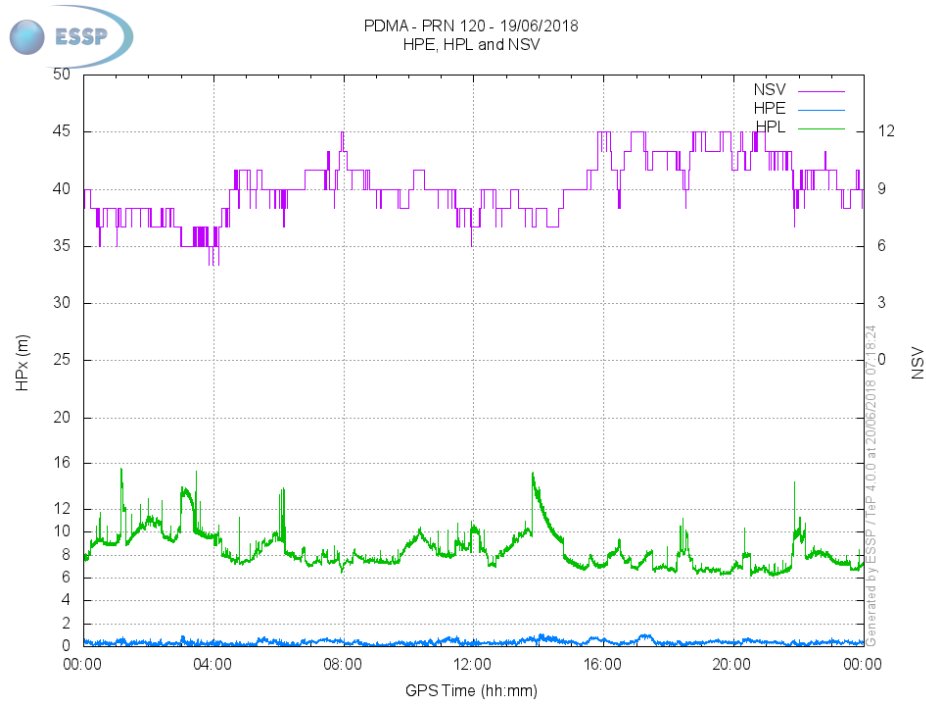


Figura 45. Gráfica del HPL y HPE del 19 de junio de 2018

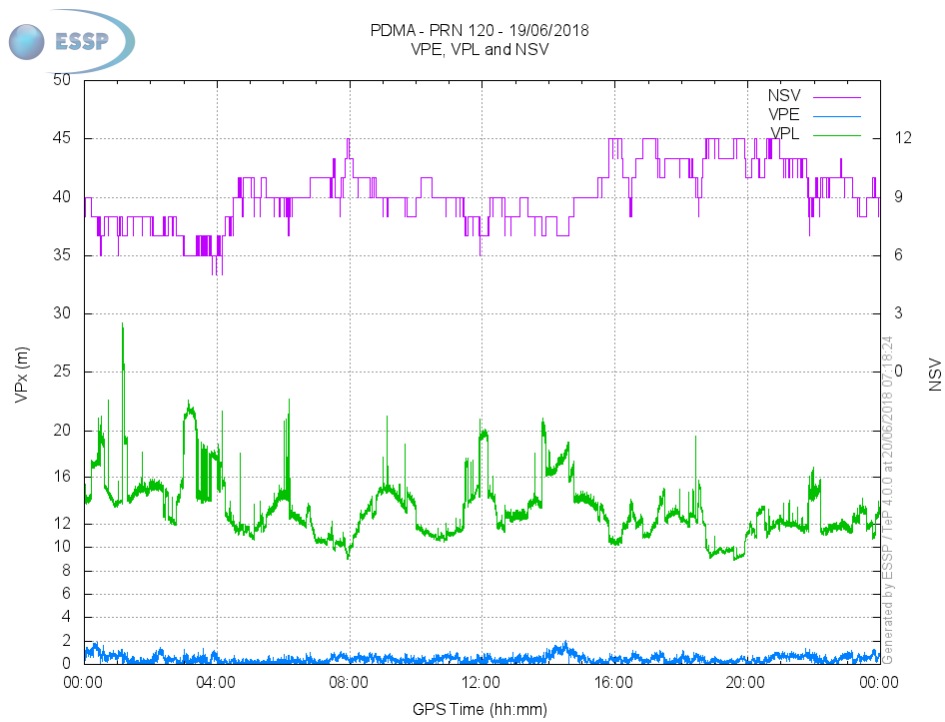


Figura 46. Gráfica del VPL y VPE del 19 de junio de 2018

Parámetro	Resultado día 19 de junio de 2018
Disponibilidad	$\geq 99,9 \%$
Riesgo de continuidad	$\leq 1 \times 10^{-4}$
HPE aprox.	0,6 m
HPL (HPL aprox.)	≤ 15 7,0 m
HSI aprox.	0,085
VPE aprox.	1,6 m
VPL (VPL aprox.)	≤ 25 12,5 m
VPI aprox.	0,128

Tabla 18. Resultados requerimientos del 19 de junio de 2018

Según los resultados obtenidos en la tabla 18, el día 19 de junio de 2018 se cumplen todos los requisitos PBN para operaciones APV-I excepto la continuidad.

6.2.3. 20 DE JUNIO DE 2018

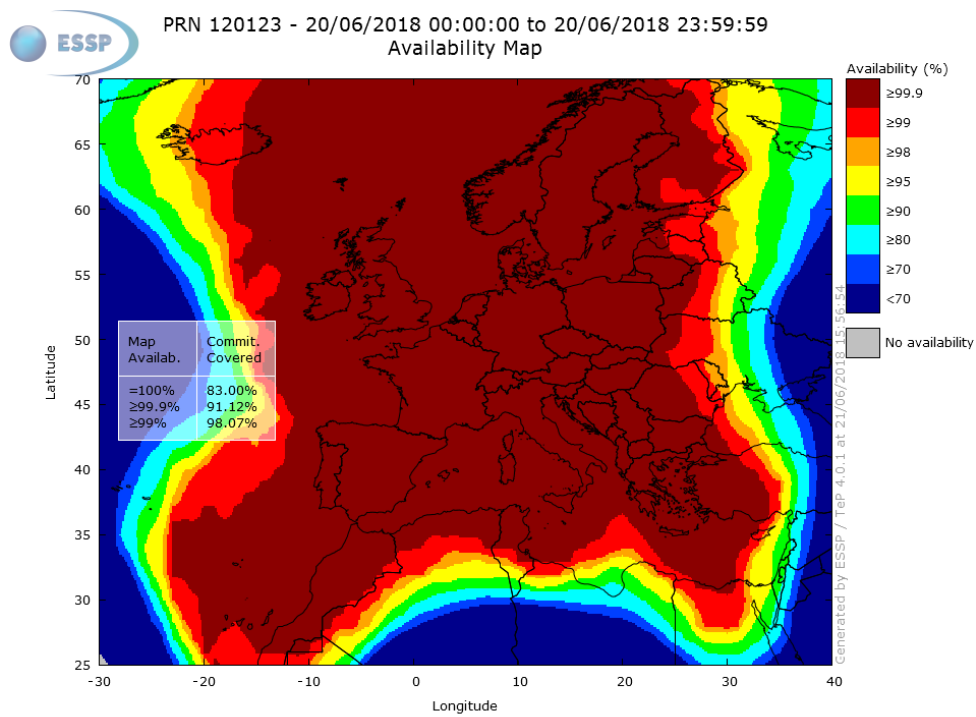


Figura 47. Mapa de disponibilidad del 20 de junio de 2018

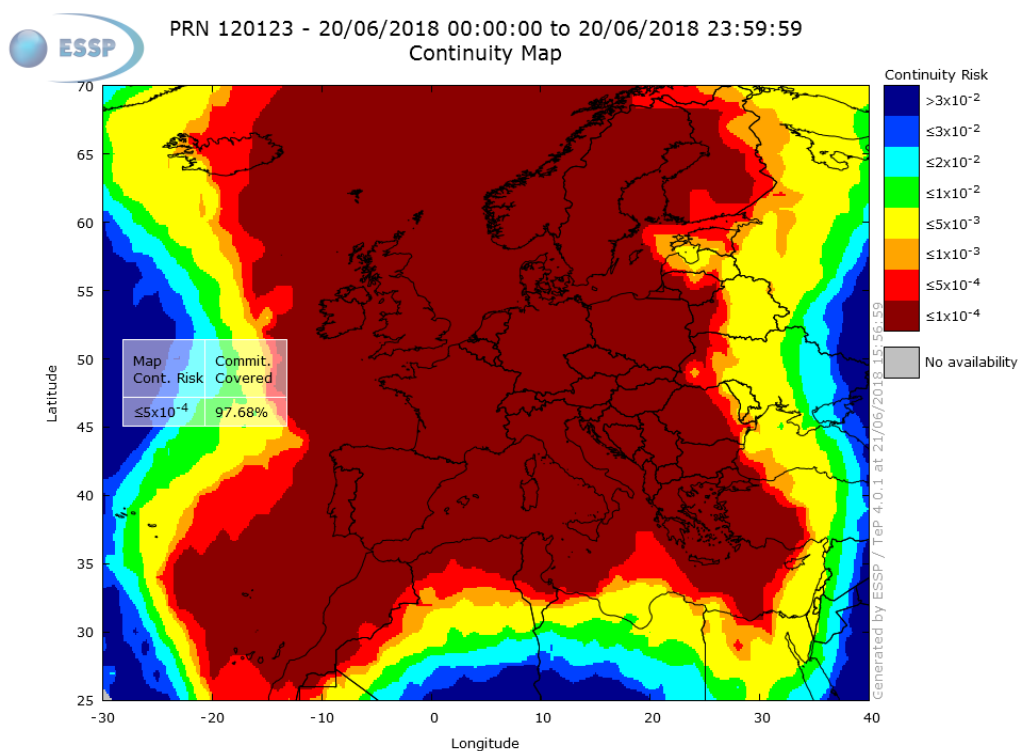


Figura 48. Mapa de continuidad del 20 de junio de 2018

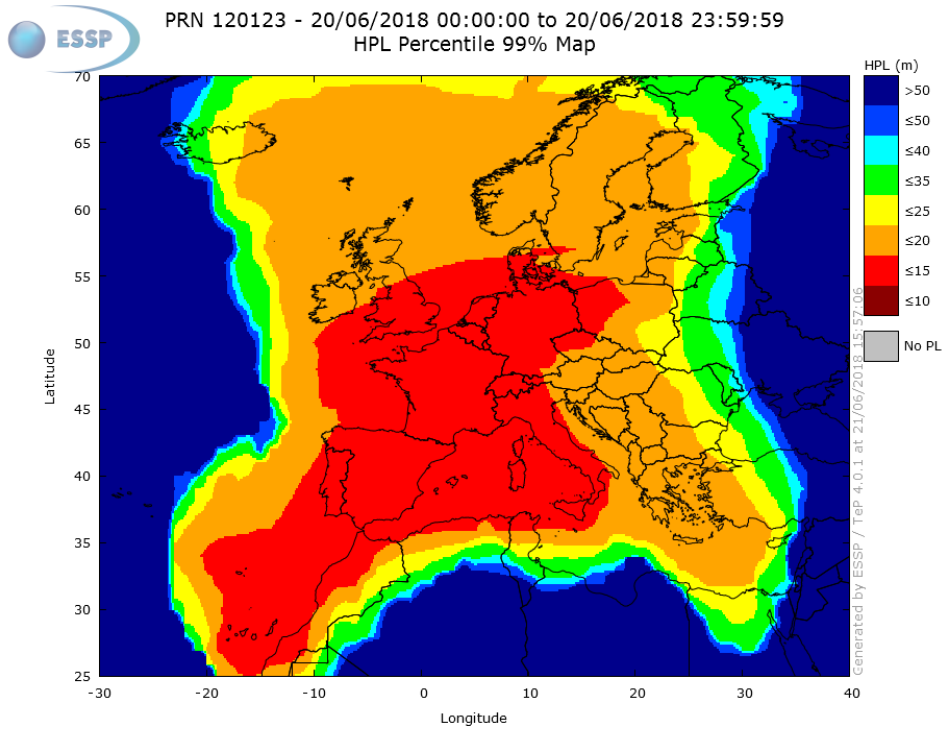


Figura 49. Mapa del HPL del 20 de junio de 2018

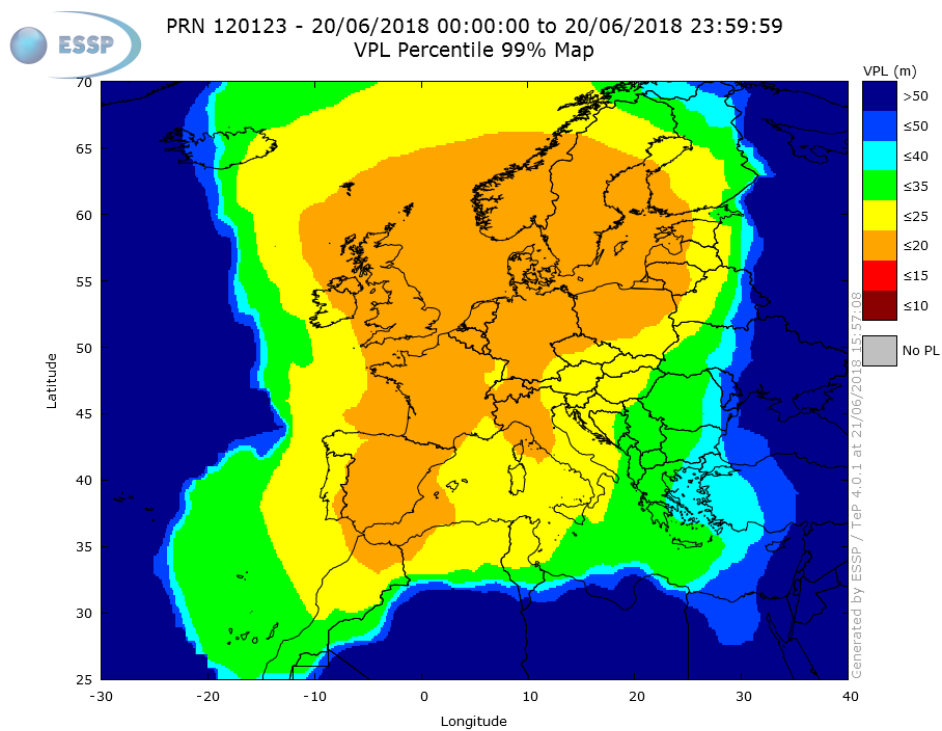


Figura 50. Mapa del VPL del 20 de junio de 2018

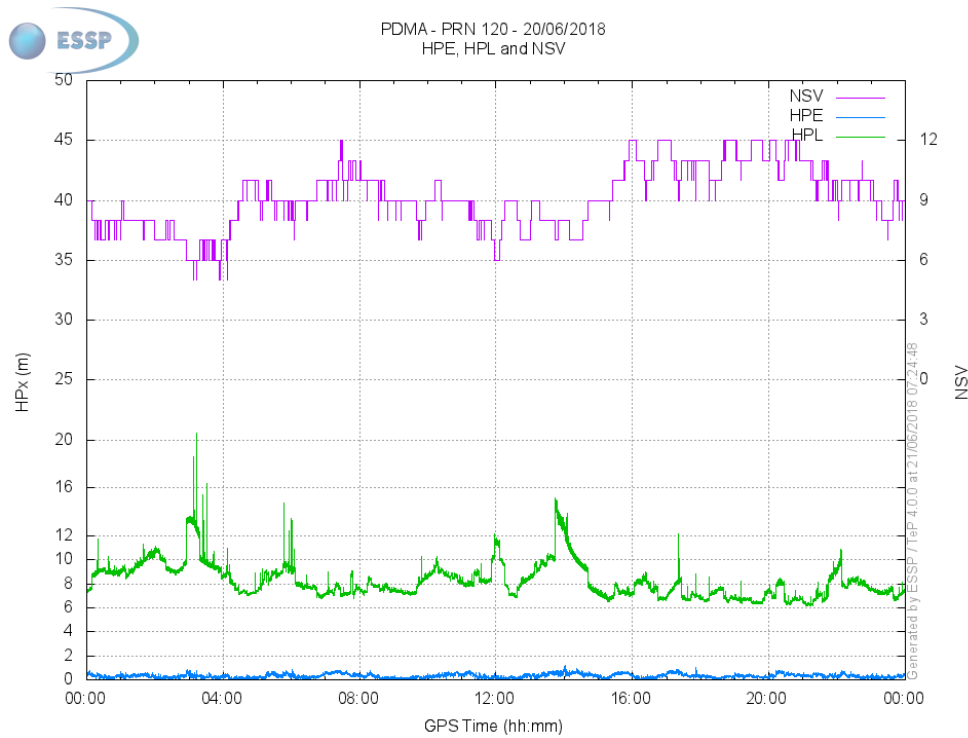


Figura 51. Gráfica del HPL y HPE del 20 de junio de 2018

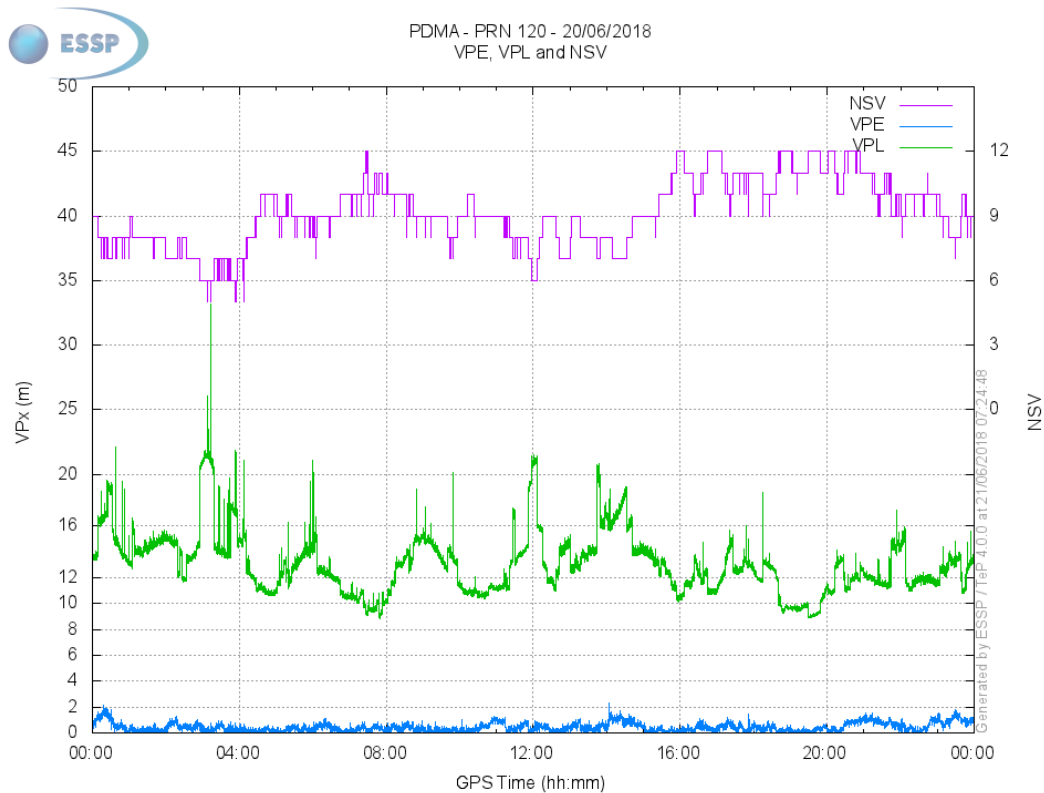


Figura 52. Gráfica del VPL y VPE del 20 de junio de 2018

Parámetro	Resultado día 20 de junio de 2018
Disponibilidad	$\geq 99,9 \%$
Riesgo de continuidad	$\leq 1 \times 10^{-4}$
HPE aprox.	0,7 m
HPL (HPL aprox.)	≤ 15 7,0 m
HSI aprox.	0,100
VPE aprox.	1,4 m
VPL (VPL aprox.)	≤ 25 11,0 m
VPI aprox.	0,127

Tabla 19. Resultados requerimientos del 20 de junio de 2018

Según los resultados obtenidos en la tabla 19, el día 20 de junio de 2018 se cumplen todos los requisitos PBN para operaciones APV-I excepto la continuidad.

6.2.4. 21 DE JUNIO DE 2018

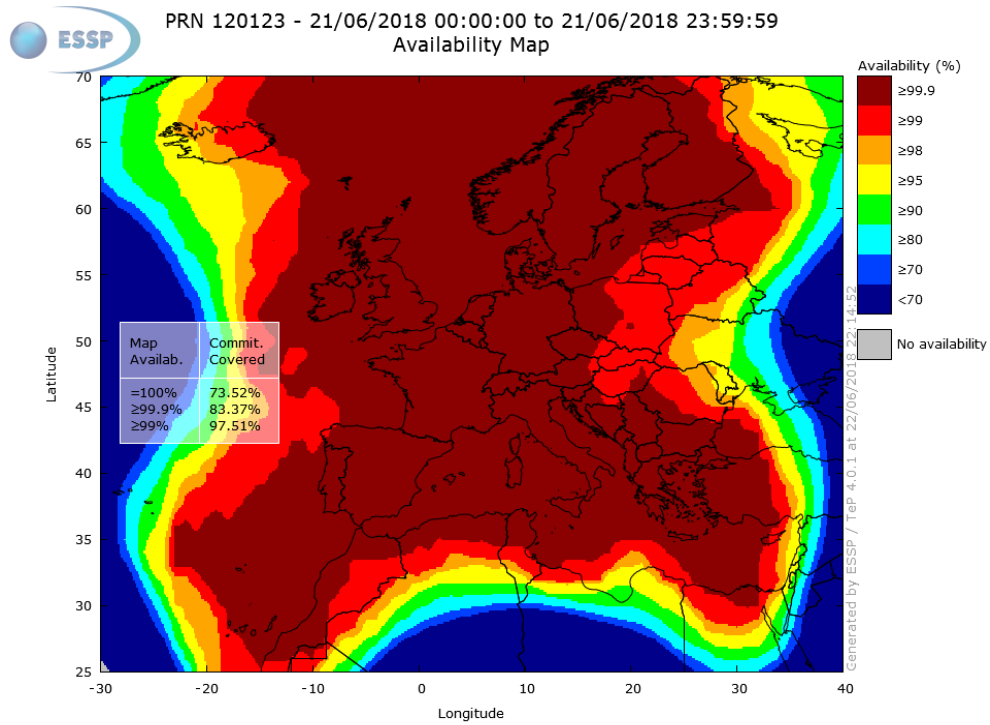


Figura 53. Mapa de disponibilidad del 21 de junio de 2018

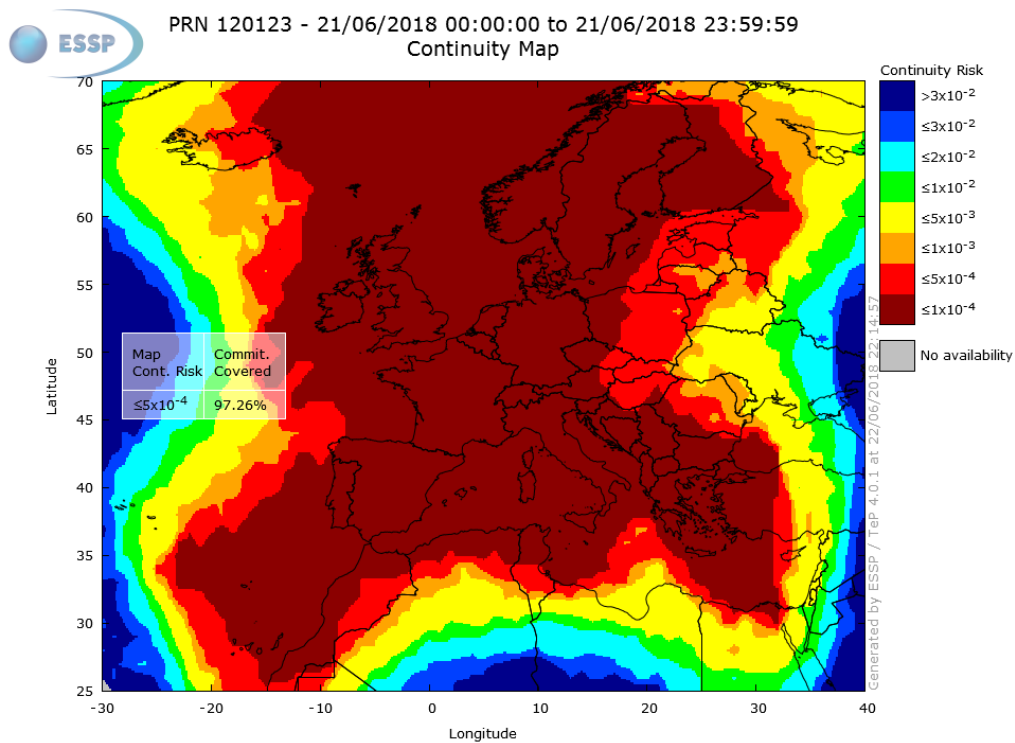


Figura 54. Mapa de continuidad del 21 de junio de 2018

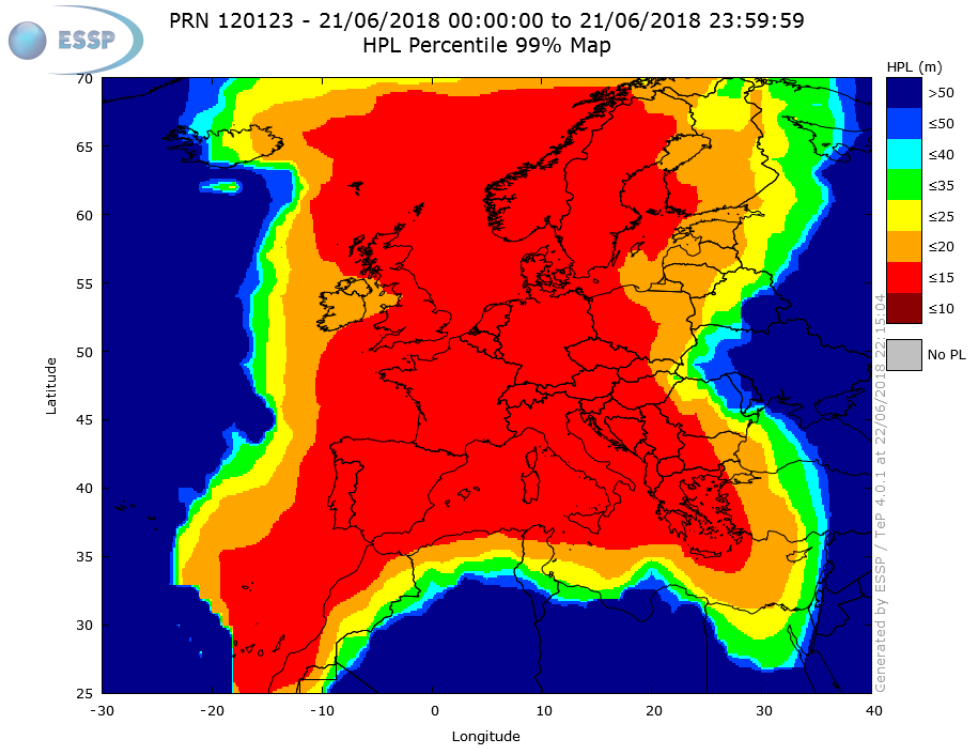


Figura 55. Mapa del HPL del 21 de junio de 2018

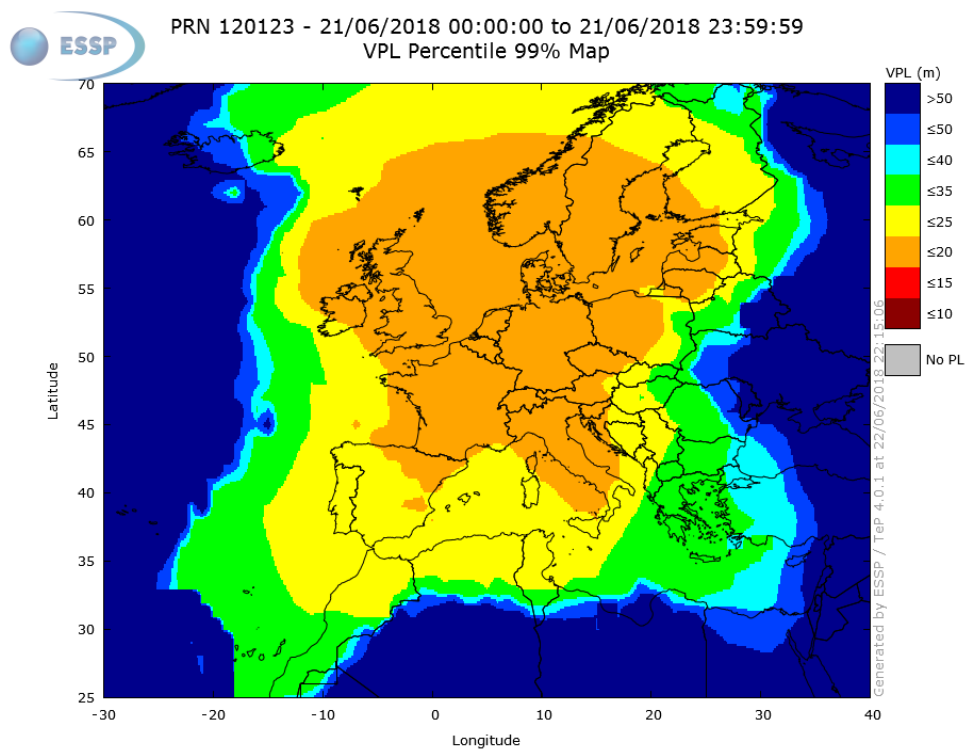


Figura 56. Mapa del VPL del 21 de junio de 2018

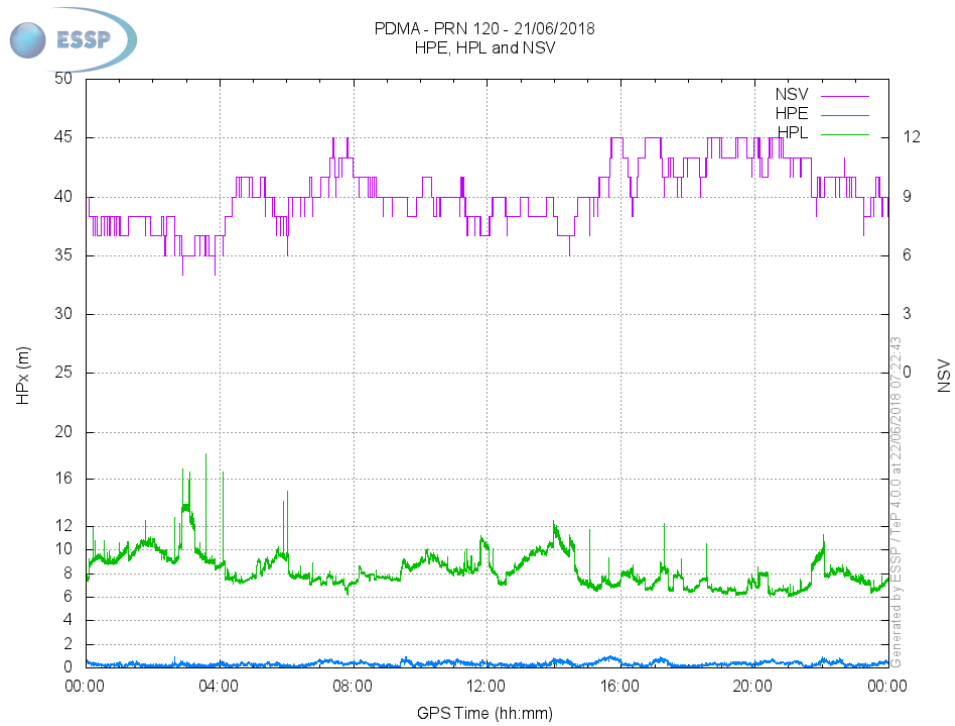


Figura 57. Gráfica del VPL y VPE del 21 de junio de 2018

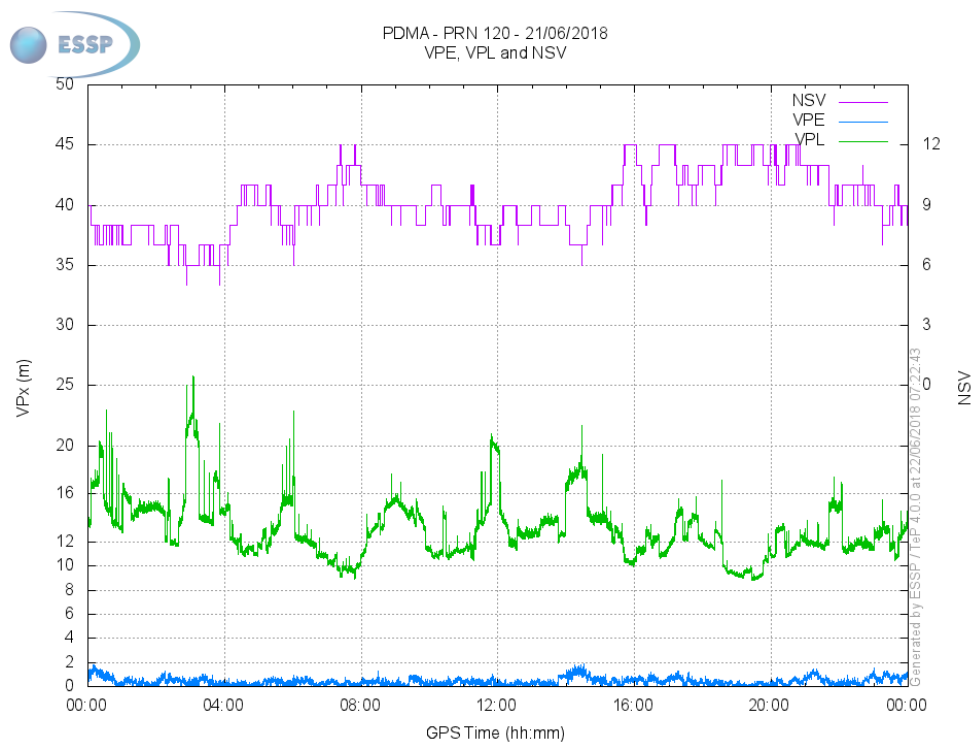


Figura 58. Gráfica del HPL y HPE del 21 de junio de 2018

Parámetro	Resultado día 21 de junio de 2018
Disponibilidad	$\geq 99,9 \%$
Riesgo de continuidad	$\leq 1 \times 10^{-4}$
HPE aprox.	0,7 m
HPL (HPL aprox.)	≤ 15 8,0 m
HSI aprox.	0,087
VPE aprox.	1,5 m
VPL (VPL aprox.)	≤ 25 11,5 m
VPI aprox.	0,130

Tabla 20. Resultados requerimientos del 21 de junio de 2018

Según los resultados obtenidos en la tabla 20, el día 21 de junio de 2018 se cumplen todos los requisitos PBN para operaciones APV-I excepto la continuidad.

6.2.5. 22 DE JUNIO DE 2018

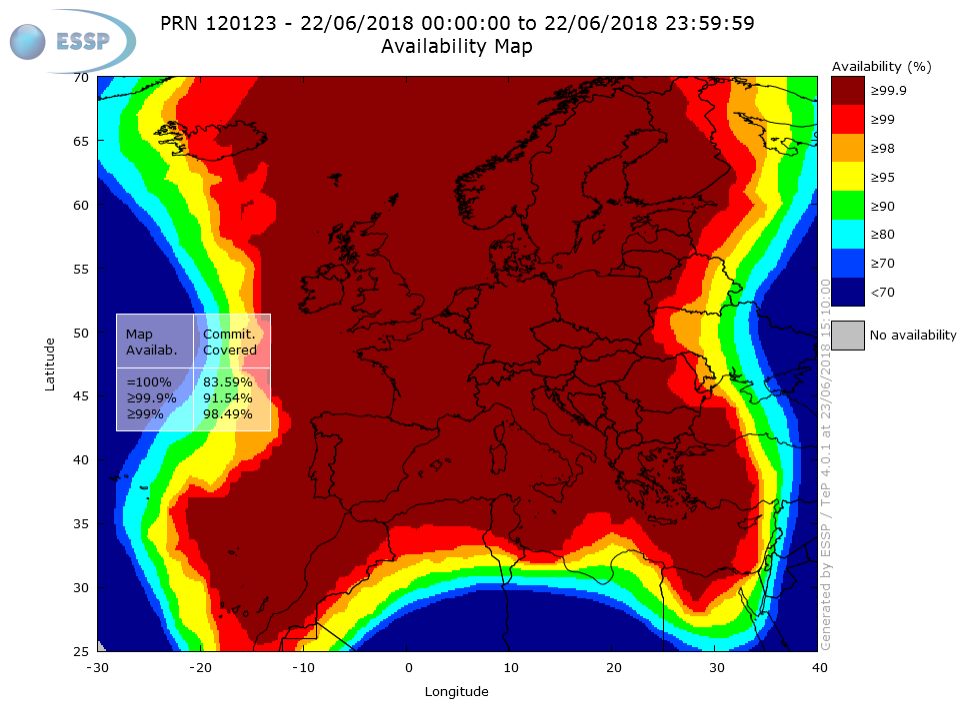


Figura 59. Mapa de disponibilidad del 22 de junio de 2018

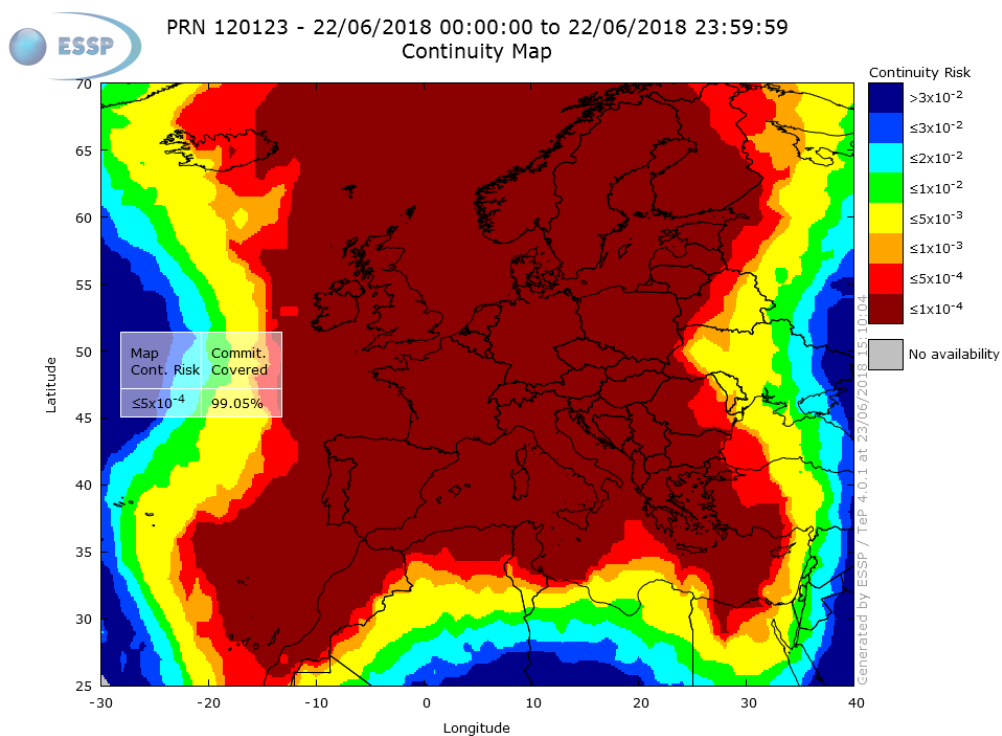


Figura 60. Mapa de continuidad del 22 de junio de 2018

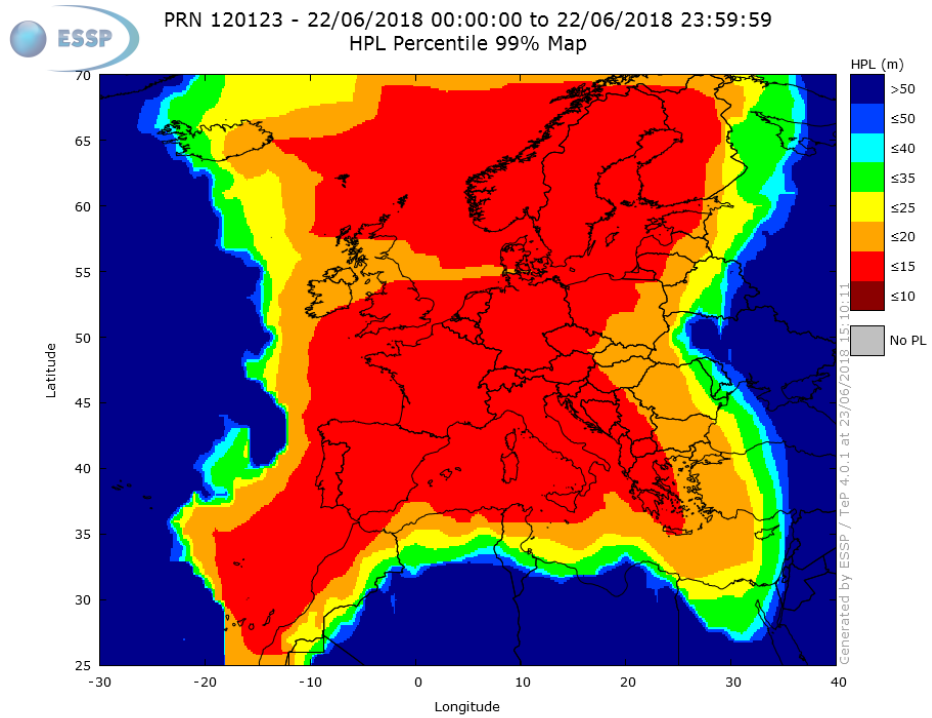


Figura 61. Mapa del HPL del 22 de junio de 2018

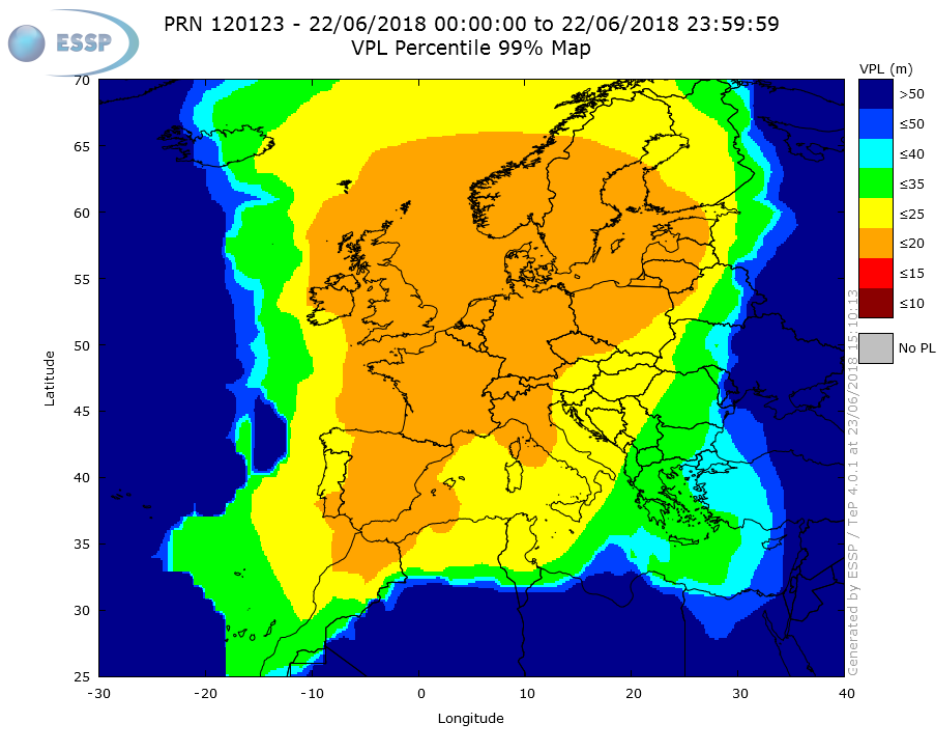


Figura 62. Mapa del VPL del 22 de junio de 2018

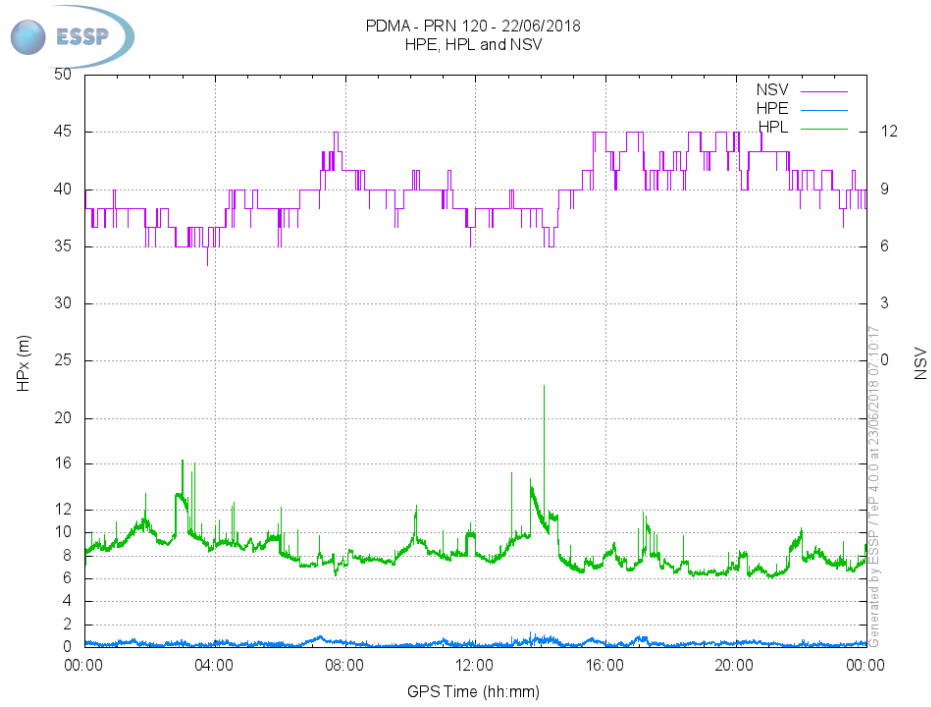


Figura 63. Gráfica del HPL y HPE del 22 de junio de 2018

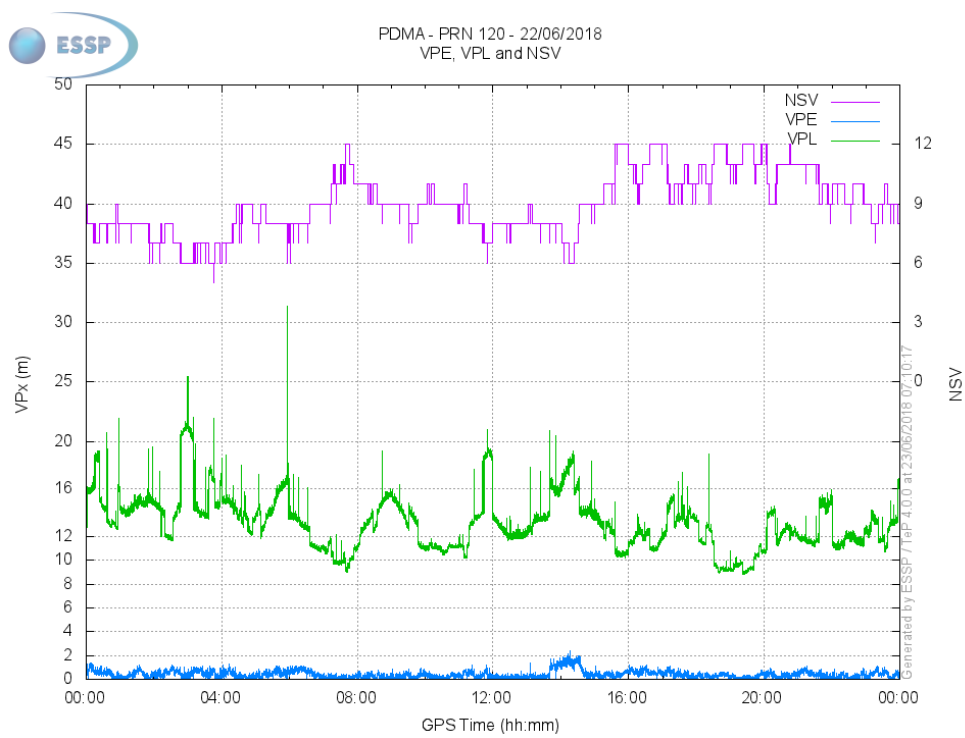


Figura 64. Gráfica del VPL y VPE del 22 de junio de 2018

Parámetro	Resultado día 22 de junio de 2018
Disponibilidad	$\geq 99,9 \%$
Riesgo de continuidad	$\leq 1 \times 10^{-4}$
HPE aprox.	0,7 m
HPL (HPL aprox.)	≤ 15 8,0 m
HSI aprox.	0,087
VPE aprox.	1,3 m
VPL (VPL aprox.)	≤ 25 12,5 m
VPI aprox.	0,104

Tabla 21. Resultados requerimientos del 22 de junio de 2018

Según los resultados obtenidos en la tabla 21, el día 22 de junio de 2018 se cumplen todos los requisitos PBN para operaciones APV-I excepto la continuidad.

6.3. ENSAYOS DE VUELO

Una vez se ha desarrollado una primera etapa de toma de datos a largo plazo y una segunda etapa de toma de datos a corto plazo sobre el terreno, la etapa final del proceso de validación consiste en una serie de ensayos de vuelo con una aeronave que disponga de un receptor GNSS/SBAS embarcado.

Puesto que las dos fases de recolección y análisis de datos han sido satisfactorias (exceptuando los fallos de continuidad), se podría proceder a comenzar esta fase, si bien va más allá del propósito de este trabajo fin de grado.

7. CONCLUSIONES

Tras la realización del presente trabajo fin de grado se puede afirmar que se han cumplido positivamente los objetivos marcados en el enunciado del mismo. Se han completado correctamente los primeros pasos del proceso de validación para operaciones de tipo APV-I en el entorno de Palma de Mallorca tras una primera toma de datos a largo plazo y una posterior toma de datos a corto plazo.

Adicionalmente, el desarrollo de este proyecto ha cumplido con el objetivo de presentar una base teórica de los conceptos básicos sobre constelaciones GNSS, sistemas de aumentación alrededor del mundo y más profundamente sobre el funcionamiento de EGNOS, los mensajes que transmite, su arquitectura interna, etc.

También se ha hecho una explicación detallada del innovador concepto de navegación PBN, analizando cuales son las técnicas que pueden implantarse en este sentido y enumerando los requisitos que se deben cumplir en cada tipo de operación en lo que respecta a la precisión, integridad, continuidad y disponibilidad.

Una vez enunciados estos requisitos se ha tratado de evaluar su cumplimiento por parte de EGNOS para operaciones de tipo APV-I. El proceso de validación ha servido para constatar que sería posible la implantación de este tipo de procedimiento en el área de Palma de Mallorca, teniendo problemas únicamente con la continuidad. Sin embargo, este aspecto no supondría ningún problema siempre que se tomasen las medidas oportunas para paliar esta falta de continuidad.

Con todo, a pesar de haber realizado dos etapas de las marcadas en los estándares internacionales para la validación de procedimiento, hay que destacar que todavía no sería suficiente para pasar a la fase de diseño de procedimientos pues habría que acometer una fase de ensayos de vuelo.

En conclusión, se considera como muy positiva la realización de este proyecto como un proceso de familiarización con los procesos de validación de EGNOS ahora que el uso de este sistema de aumentación se está extendiendo por nuestro país y su implementación será una realidad en multitud de aeródromos en los próximos años.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Europea (2016). *GALILEO & EGNOS - THE EU SATELLITE NAVIGATION PROGRAMMES EXPLAINED*.
- [2] European Global Navigation Satellite Systems Agency (2018). *EGNOS and Galileo for aviation*.
- [3] ESSP (2018). *Monthly Performance Report January 2018 – ESSP – DRD – 21394*. Toulouse, Francia.
- [4] ESSP (2018). *Monthly Performance Report February 2018 – ESSP – DRD – 21532*. Toulouse, Francia.
- [5] ESSP (2018). *Monthly Performance Report March 2018 – ESSP – DRD – 21737*. Toulouse, Francia.
- [6] ESSP (2018). *Monthly Performance Report April 2018 – ESSP – DRD – 21929*. Toulouse, Francia.
- [7] ESSP (2018). *Monthly Performance Report May 2018 – ESSP – DRD – 22094*. Toulouse, Francia.
- [8] ICAO (2016). *ICAO Standards and Recommended Practices, Annex 10, Volume 1 Radio Navigation Aids*.
- [9] ICAO (2013). *Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual*. Montréal, Canadá.
- [10] Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, Chris G. Bartone (2013). *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Estados Unidos. Editorial Wiley.
- [11] ICAO (2008). *Performance-Based Navigation Manual. Doc 9613*. Montréal, Canadá.
- [12] FAA (s.f.). *Performance-Based Navigation (PBN) Brochure*. Estados Unidos.
- [13] Bunce, D. (2014). *Wide Area Augmentation System (WAAS) Status and History*. Estados Unidos. FAA.
- [14] García Álvarez, D. A. (2008). *Sistemas GNSS*. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid.
- [15] GPS.GOV (2016). *Selective Availability*. Disponible el 15/5/2018 en <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/>
- [16] Wikipedia (2018). *GPS Signals*. Disponible el 15/5/2018 en https://en.wikipedia.org/wiki/GPS_signals

- [17] GMV (2017). *SBAS Systems*. Disponible el 20/5/2018 en http://www.navipedia.net/index.php/SBAS_Systems
- [18] GMV (2017). *Fundamentals: SBAS Architecture*. Disponible el 20/5/2018 en http://www.navipedia.net/index.php/SBAS_Fundamentals#SBAS_Architecture
- [19] GMV (2016). *SBAS General Introduction*. Disponible el 20/5/2018 en http://www.navipedia.net/index.php/SBAS_Fundamentals#SBAS_Architecture
- [20] Navipedia (2015). *GLONASS services*. Disponible el 25/5/2018 en http://www.navipedia.net/index.php/GLONASS_Services
- [21] GMV (2017). *Galileo Navigation Message*. Disponible el 25/5/2018 en http://www.navipedia.net/index.php/Galileo_Navigation_Message
- [22] GMV (2015). *RAIM Fundamentals*. Disponible el 25/5/2018 en http://www.navipedia.net/index.php/RAIM_Fundamentals
- [23] Navipedia (2016). *NAVIC*. Disponible el 25/5/2018 en <http://www.navipedia.net/index.php/NAVIC>
- [24] GMV (2014). *Ground-Based Augmentation System*. Disponible el 25/5/2018 en [http://www.navipedia.net/index.php/Ground-Based_Augmentation_System_\(GBAS\)](http://www.navipedia.net/index.php/Ground-Based_Augmentation_System_(GBAS))
- [25] GMV (2015). *EGNOS Space Segment*. Disponible el 25/5/2018 en http://www.navipedia.net/index.php/EGNOS_Space_Segment

BLOQUE III

PLIEGO DE CONDICIONES Y PRESUPUESTO

9. PLIEGO DE CONDICIONES

9.1. CONDICIONES GENERALES

9.1.1. GENERAL

En cualquier puesto de trabajo en el que, habitualmente y durante una parte relevante del trabajo se haga uso de un equipo con pantalla de visualización, ya bien se trate de un ordenador o vigilancia de pantallas, está sujeto a unos riesgos bien definidos que se deben prevenir. Este tipo de trabajo constituye, probablemente, el ejemplo más característico de cómo una nueva tecnología puede suponer la introducción de nuevos riesgos tales como problemas en ojos y visión, posturales y lesiones por movimientos repetidos y estrés.

Para mitigar dichos efectos, el Real Decreto 488/1997 de 14 de Abril establece las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización por los trabajadores de equipos que incluyan pantallas de visualización donde se aplican las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos laborales.

Las variables principales a las que se debe prestar especial atención para la prevención del tipo de riesgos a los que el trabajador puede enfrentarse en la realización del Trabajo de Fin de Grado son:

- Tiempo de permanencia requerida ante la pantalla, el cual puede ser de manera continua o discontinua.
- Tiempo de trabajo con la pantalla de visualización.
- Exigencia y grado de complejidad de la tarea que el operario tiene que realizar ante la pantalla de visualización.
- Necesidad de obtener información de manera rápida y precisa.

Los factores generales que se deben tener en cuenta para la prevención de riesgos laborales son:

- Seguridad (debido a contactos eléctricos, caída o golpes en el puesto de trabajo).
- Higiene industrial (iluminación, ruido y condiciones termo-higrométricas, transmisiones de virus en el ambiente de trabajo o bacterias nocivas a través del contacto en el teclado que podría acumular gran cantidad de estas).
- Ergonomía (fatiga visual, picores, percepción borrosa. Fatiga física y mental: ansiedad, irritabilidad o insomnio).

9.1.2. REAL DECRETO 488/1997 DE 14 DE ABRIL

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:

1. Pantalla de visualización: una pantalla alfanumérica o gráfica, independientemente del método de representación visual utilizado.

2. 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.

3. 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.

Anexo

Disposiciones mínimas

Por todo lo dispuesto anteriormente, se va a definir el puesto de trabajo específico para la prevención de riesgos laborales y seguridad.

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 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 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 deberían 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.

9.2. CONDICIONES DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

9.2.1. ESPECIFICACIONES DE MATERIALES Y EQUIPOS

Hardware

Para llevar a cabo este proyecto es necesario un ordenador capaz de satisfacer los requerimientos mínimos de los programas utilizados, así como de funcionar con fluidez para no suponer un impedimento a la hora de realizar las tareas. Para este trabajo se ha utilizado un MacBook Air aunque también se ha usado en ciertos momentos un PC Asus debido a la falta de compatibilidad de ciertos programas con Macintosh.

Software

Por lo que respecta al software utilizado, se han usado los siguientes programas para el desarrollo del trabajo:

- PEGASUS 4.8.4
- Módulos de PEGASUS
- Adobe Acrobat
- Microsoft Word
- PAG 1.3
- Microsoft PowerPoint
- Microsoft Excel
- SBAS Teacher
- SBAS Mentor
- Google Drive
- Navegadores Internet (Safari, Google Chrome)

Conexión a Internet

Un elemento clave para la consecución de este proyecto ha sido la conexión a Internet. Además de para realizar todo tipo de búsquedas sobre los fundamentos teóricos que sustentan este trabajo, ha sido una pieza fundamental para poder acceder al portal de usuario de EGNOS desde el cual se han obtenido datos relevantes de las prestaciones del sistema por lo que respecta a precisión, integridad, disponibilidad y continuidad.

Conocimientos requeridos

La realización de este trabajo requiere de unos conocimientos amplios acerca de sistemas GNSS, sistemas de aumentación y conceptos de aeronavegación en general. Además es una pieza fundamental el dominio del inglés pues la mayoría de la información y documentación sobre el tema está accesible en este idioma.

10. PRESUPUESTO

10.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado final del proyecto se muestran los costes que ha supuesto la realización del Trabajo de Fin de Grado *Metodología operacional para la validación y el diseño de procedimientos en aeropuertos con sistema EGNOS*. En este capítulo se presentan los gastos de material, software, personal y de oficina. Los precios aplicados a los grupos de coste corresponden a tarifas legales vigentes, habiéndose realizado, en caso de necesidad, estimaciones coherentes. Debido a que el trabajo realizado en el presente proyecto está destinado a investigaciones internas del Departamento De Ingeniería Cartográfica Geodesia y Fotogrametría, en este precio no se incluye el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA). Si los resultados obtenidos fueran para un trabajo encomendado por alguna empresa externa al Departamento, sí que se hubieran añadido gastos generales, el beneficio económico y el IVA.

El coste de amortización del hardware utilizado y el consecuente gasto horario se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$a = \frac{V_c - V_r}{n}$$

$$t_h = \frac{a}{h}$$

Donde:

a = amortización (euros/año)

V_c = valor de compra (euros)

V_r = valor residual tras el periodo de amortización (euros)

n = tiempo de amortización (años)

t_h = tasa horaria (euros/hora)

h = horas trabajadas al año

Por otra parte, los costes unitarios de personal se calculan mediante la siguiente expresión:

$$h = \frac{\text{horas trabajadas}}{\text{año}} = \frac{\text{semanas} - \text{semanas}_{\text{no laborales}}}{\text{año}} \cdot \frac{\text{horas trabajadas}}{\text{semana}}$$

$$\text{Coste horario} = \frac{h}{\text{año}}$$

Aproximando las semanas no laborables anuales, se obtiene la siguiente cantidad de horas anuales trabajadas:

$$h = \frac{\text{horas trabajadas}}{\text{año}} = (52 - 6) \cdot 40 = 1840 \text{ h/año}$$

10.2. ESTADO DE LAS MEDICIONES

Los recursos necesarios para la ejecución satisfactoria de este trabajo son los siguientes:

Descripción	Unidades
Ordenador portátil MacBook Air	1
Ordenador portátil Asus	1
Licencia PEGASUS	1
Licencia Microsoft Office	1
Licencia SBAS Mentor	1
Licencia SBAS Teacher	1
Profesor titular	1
Ingeniero superior	1
Alquiler, permisos y seguro de oficina	1

Tabla 22. Recursos necesarios para la ejecución del proyecto

10.3. COSTES UNITARIOS

Equipos informáticos

En primer lugar, para el ordenador MacBook Air, se considera que tiene un valor residual del 40%, con un periodo de amortización de 8 años y un valor de compra de 1200€.

$$a = \frac{1200 - 0.4 \cdot 1200}{8} = 90 \text{ €/año}$$

$$t_h = \frac{90}{1840} = 0,0489 \text{ €/h}$$

Por lo que respecta al PC Asus, se estima un valor residual del 25%, con un periodo de amortización de 6 años y un valor inicial de 600€.

$$a = \frac{600 - 0.25 \cdot 600}{6} = 75 \text{ €/año}$$

$$t_h = \frac{75}{1840} = 0,0407 \text{ €/h}$$

Software

El único programa que ha supuesto un coste directo es el paquete de Microsoft Office, cuyo precio anual es de 49€.

$$t_h = \frac{49}{1840} = 0,0266 \text{ €/h}$$

Recursos humanos

Se estima el salario de un profesor titular de Universidad en 35000€ anuales y el de un ingeniero superior en 23000€. Así el coste horario de cada uno de ellos sería el siguiente:

$$t_{h_{profesor}} = \frac{35000}{1840} = 19,02 \text{ €/h}$$

$$t_{h_{ingeniero}} = \frac{23000}{1840} = 12,5 \text{ €/h}$$

Oficina

El coste mensual de una oficina en la ciudad de Valencia se estima en 1000€ al mes, los cuales se repartirían entre 5 trabajadores de dicha oficina.

$$t_{moficina} = \frac{1000}{5} = 200 \text{ €}$$

Esta oficina debería utilizarse durante los 3 meses en los que se ha desarrollado el trabajo.

$$\text{Coste oficina} = 200 \cdot 3 = 600 \text{ €}$$

10.4. COSTE TOTAL

Descripción	Horas	t_h (€/h)	Importe (€)
Ordenador portátil MacBook Air	250	0,0489	12,225
Ordenador portátil Asus	50	0,0407	2,035
Licencia PEGASUS	300	0	0
Licencia Microsoft Office	300	0,0266	7,98
Licencia SBAS Mentor	300	0	0
Licencia SBAS Teacher	300	0	0
Profesor titular	100	19,02	1902
Ingeniero superior	100	12,5	1250
Alquiler, permisos y seguro de oficina	2160	0,277	600
TOTAL			3774,24€

Tabla 23. Coste total del proyecto

La estimación del coste total de la realización de este trabajo fin de grado es de tres mil setecientos setenta y cuatro euros con veinticuatro céntimos.