



TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ANÁLISIS EN ENSAYO DE VUELO PARA VALIDACIÓN DE
PROCEDIMIENTOS SBAS: ESTUDIO A LARGO Y CORTO
PLAZO DE LA INTEGRACIÓN GNSS EN AEROPUERTOS Y
SU ESTUDIO PARA EL DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS**

Autor:

Jesús Antonio González Gómez

Fecha:

Septiembre 2017

Tutor:

Israel Quintanilla García

Cotutor:

Pedro Yuste Pérez

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado aborda la certificación y validación de procedimientos GNSS basado en los datos de las constelaciones de satélites, que han sido y están siendo desplegadas en los últimos años, y los datos de aumentación, específicamente, el SBAS europeo, EGNOS.

El proceso de validación, teóricamente, debe tener lugar en el aeródromo de Casinos, donde se querrán implantar futuros procedimientos basados en herramientas GNSS. En este TFG se abordarán las fases de validación a largo y corto plazo, dejando la fase de ensayos de vuelo para un futuro TFG. Además, cabe apuntar que la antena receptora de datos GNSS no se encuentran en Casinos, como debiera ser, sino que se cogerá la estación más cercana, Valencia, para poder realizar el análisis. Los datos, por tanto, serían aproximados.

El trabajo constará de una introducción teórica para poder conocer un poquito más en profundidad las diferentes constelaciones que se han desarrollado y que están desarrollándose. También se conocerán conceptos relacionados con la validación, como requerimientos de navegación o sistemas de aumentación.

A continuación, se comenzará el proceso de validación a largo y corto plazo, tomando datos de los informes del ESSP, tomando datos de la antena receptora de Valencia y los ficheros de aumentación del EDAS FTP de EGNOS; y una vez que tengamos los datos se procesarán mediante software específico. Una vez se hayan procesado los datos, se llegarán a unas conclusiones de la validación en función de las prestaciones que se obtengan.

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer a todas aquellas personas que de algún modo han contribuido a hacer realidad este trabajo.

Agradecer a la Universidad Politécnica de Valencia y, más concretamente, a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, la oportunidad de aprender en sus aulas y de sus docentes, muchos de ellos con enormes cualidades como docentes que me han ayudado a formarme tanto a nivel personal como a nivel teórico.

Por supuesto, agradecer a los compañeros de la carrera, especialmente a Alarma y a Alburrida Gusana, por todos los momentos juntos, por las mañanas y tardes de estudio en la Casa del Alumno, en la habitación de la residencia, en el piso, por las comidas, las sesiones de cine, por las charlas de Skype que me han alegrado el día, por los viajes juntos y porque, a pesar de estar físicamente lejos este año, vuestro apoyo y vuestra compañía la he sentido como si estuviéramos trabajando codo con codo como en los años anteriores. También agradecer a Paula su apoyo durante este año, y especialmente durante la realización de este TFG, puesto que desde el principio ha estado animándome a seguir adelante con el mismo, por todas las visitas sorpresa durante los meses de trabajo y por todo el apoyo personal, dándome energías cuando lo he necesitado.

Por último, agradecer a mi familia, especialmente a mis hermanos Pili y Pedro, porque sin su apoyo, sin su cariño y compañía mi formación profesional y, especialmente, personal no hubieran sido lo mismo. Gracias por el positivismo, las ganas de aprender infinitas transmitidas, y por esa mentalidad de luchar cada día, porque somos un EQUIPO. Ojalá y algún día sea capaz de compensar toda la ayuda recibida, porque incluso una mínima parte me parece un reto. Gracias.

Índice general

Resumen	2
Agradecimientos	3
Índice	4
Lista de acrónimos	7
Lista de figuras	10
Lista de tablas	12
I TEORÍA	13
1. Introducción	14
2. Objetivos	16
3. GNSS	17
3.1. Constelaciones	18
3.1.1. GPS	18
3.1.2. GLONASS	20
3.1.3. Galileo	22
3.1.4. Beidou	25
3.1.5. NAVIC	27
3.1.6. QZSS	28
3.2. Sistemas de aumentación	29
3.2.1. ABAS	29
3.2.2. GBAS	29
3.2.3. SBAS	30
4. PBN	32
4.1. Requerimientos	33
4.1.1. Precisión	33
4.1.2. Integridad	33
4.1.3. Continuidad	35
4.1.4. Disponibilidad	35
5. EGNOS	36
5.1. Tratamiento de datos	38
5.1.1. Ciclo de procesado	38
5.1.2. Ciclo de validación	38
5.2. Mensajes EGNOS	38
5.3. Servicios EGNOS	39

5.3.1.	OS	39
5.3.2.	SoL	40
5.3.3.	EGNOS CDDS	40
5.4.	Implementación EGNOS	40
II OBTENCIÓN Y TRATAMIENTOS DE DATOS GNSS		43
6. Formatos		44
6.1.	RTCM	44
6.2.	NTRIP	44
6.3.	RTCA	44
6.4.	NMEA	44
6.5.	RINEX	45
6.5.1.	Ficheros de observación.	46
6.5.2.	Ficheros de navegación.	47
7. Obtención de datos		51
8. Software		55
8.1.	Procesado datos RINEX	55
8.1.1.	Hatanaka	55
8.1.2.	TEQC	56
8.2.	PEGASUS	57
8.2.1.	Módulos	57
III VALIDACIÓN		60
9. Validación de procedimientos SBAS		61
9.1.	Toma de datos a largo plazo	61
9.1.1.	Resultados disponibilidad	61
9.1.2.	Resultados precisión	62
9.1.3.	Resultados continuidad	63
9.1.4.	Resultados integridad	64
9.2.	Toma de datos a corto plazo	64
9.2.1.	Resultados disponibilidad	65
9.2.2.	Resultados precisión	69
9.2.3.	Resultados continuidad	71
9.2.4.	Resultados integridad	75
9.3.	Ensayo de vuelo	81
9.4.	Conclusiones de la validación	81
IV Pliego de condiciones		82
10. Condiciones generales		83
10.1.	General	83
10.2.	Real Decreto 488/1997 de 14 de abril	83
10.3.	Condiciones de especificaciones técnicas	87
10.3.1.	Hardware	87
10.3.2.	Software	88
10.3.3.	Conexión a Internet	88
10.3.4.	Conocimientos previos y uso de material	88
10.3.5.	Supervisión	89

V	PRESUPUESTO	90
11.	Presupuesto	91
11.1.	Introducción	91
11.2.	Estado de mediciones	92
11.3.	Desglose de costes unitarios	92
11.3.1.	Coste material y software unitario	92
11.3.2.	Coste personal cualificado unitario	93
11.3.3.	Coste oficina unitario	93
11.4.	Desglose de costes totales	93
11.4.1.	Coste material y software total	93
11.4.2.	Coste personal cualificado total	94
11.4.3.	Coste oficina total	94
11.5.	Resumen del presupuesto total	94
	Bibliografía	95

Lista de acrónimos

A/S	<i>Anti-Spoofing</i>
AAIM	<i>Aircraft Autonomous Integrity Monitoring</i>
ABAS	<i>Aircraft Based Augmentation System</i>
AENA	Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea
AL	<i>Alert Limit</i>
ANSP	<i>Air Navigation Services Provider</i>
APV-I	<i>Non-precision Approach with Vertical Guidance</i>
ARNS	<i>Aeronautical Radio Navigation Services</i>
AS	Servicio Autorizado
ASBC	<i>Advanced Space Business Corporation</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASQF	<i>Application Specific Qualification Facility</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
C	Civil
C/A	<i>Coarse/Acquisition</i>
CCF	<i>Central Control Facility</i>
CDDS	<i>Commercial Data Distribution Service</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CPF	<i>Central Processing Facility</i>
CS	Servicio Comercial
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DME	<i>Distance Measurement Equipment</i>
DVP	<i>Development & Verification Platform</i>
EASA	<i>European Aviation Safety Agency</i>
EC	Comisión Europea
ECA	<i>Error Characterization Approach</i>
EDAS	<i>EGNOS Data Access Service</i>
EEUU	Estados Unidos
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
ENAIRE	ANSP España (nueva AENA)
ESA	Agencia Espacial Europea
ESSP	<i>European Satellite Services Provider</i>
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
ETSID	Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
EUREF	<i>European Reference Frame</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>
FOC	<i>Full Operational Capability</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>

GAGAN	<i>GPS Aided GEO Augmented Navigation</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GIVD	<i>Grid Ionospheric Vertical Delay</i>
GIVE	<i>Grid Ionospheric Vertical Error</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSA	<i>European GNSS Agency</i>
HAL	<i>Horizontal Alert Limit</i>
HEO	<i>Highly Elliptical Orbit</i>
HMI	<i>Hazardous Missed Information</i>
HNSE	<i>Horizontal Navigation System Error</i>
HPE	<i>Horizontal Position Error</i>
HPL	<i>Horizontal Protection Level</i>
HSI	<i>Horizontal Safety Index</i>
IAG	<i>Asociación Internacional de Geodesia</i>
IGN	<i>Instituto Geográfico Nacional</i>
IGP	<i>Ionospheric Grid Points</i>
IGSO	<i>Inclined Geosynchronous Orbit</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
IOC	<i>In Orbit Capability</i>
IOV	<i>Initial Operation Validation</i>
IR	<i>Integrity Risk</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organization</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</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 Center</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MI	<i>Misleading Information</i>
MOPS	<i>Minimum Operational Performance Standard</i>
MRA	<i>Measurement Rejection Approach</i>
MSAS	<i>Multi-functional Satellite Augmentation System</i>
MTSAT	<i>Multifunctional Transport Satellites</i>
NAVIC	<i>Navigation Indian Constellation</i>
NDB	<i>Non-Directional Beacon</i>
NLES	<i>Navigation Land Earth Stations</i>
NM	<i>Not Monitored</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NPA	<i>Non-Precision Approach</i>
NTRIP	<i>Network Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
OACI	<i>Organización de Aviación Civil Internacional</i>
OS	<i>Servicio Abierto</i>
P/Y	<i>Precision/Secure</i>
PA	<i>Precision Approach</i>
PACF	<i>Performance Assesment & Check-out Facility</i>
PAG	<i>Programa de Aplicaciones Geodésicas</i>
PANS-OPS	<i>Procedures for Air Navigation Services-Aircraft Operations</i>
PBN	<i>Navegación Basada en Prestaciones</i>

PEGASUS	<i>Prototype EGNOS and GBAS Analysis System Using SAPPHERE</i>
PL	<i>Protection Level</i>
PPS	<i>Precise Positioning Service</i>
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
PZ90	<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>
RF	Radiofrecuencia
RIMS	<i>Ranging and Integrity Monitoring Station</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange format</i>
RNAV	Navegación de Área
RNP	<i>Required Navigation Performance</i>
RNSS	<i>Radio Navigation Satellite Services</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i>
RTK	<i>Real Time Kinematics</i>
SA	Disponibilidad Selectiva
SAR	<i>Search and Rescue Service</i>
SARPs	<i>Standard and Recommended Practices</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>
SID	<i>Standard Instrument Departure</i>
SIS	<i>Signal in Space</i>
SJU	<i>SESAR Joint Undertaking</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SoL	<i>Safety of Life</i>
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
STAR	<i>Standard Terminal Arrival Route</i>
TA	<i>Time to Alert</i>
TEQC	<i>Translation, Editing, Quality Chechking</i>
TFG	Trabajo de Fin de Grado
TT&C	<i>Telemetry, Tracking and Control Station</i>
UDRE	<i>User Differential Range Error</i>
UE	Unión Europea
USERE	<i>User Equivalent Range Error</i>
UPV	Universidad Politécnica de Valencia
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
UTC	Tiempo Universal Coordinado
VAL	<i>Vertical Alert Limit</i>
VNAV	<i>Vertical Navigation</i>
VNSE	<i>Vertical Navigation System Error</i>
VOR	<i>VHF Omnidirectional Range</i>
VPE	<i>Vertical Position Error</i>
VPL	<i>Vertical Protection Level</i>
VSI	<i>Vertical Safety Index</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS84	<i>World Geodesic System 1984</i>

Índice de figuras

1.1. Estado de implantación de procedimientos GNSS en aeropuertos y helipuertos europeos.	15
3.1. Segmentos que conforman los sistemas GNSS.	17
3.2. NAVSTAR-GPS: logo y satélite block IIR-M.	18
3.3. Estructura de los mensajes de navegación.	19
3.4. Obtención de las señales L1 y L2 (mezcladores y sumadores módulo 2).	19
3.5. Desactivación de SA.	20
3.6. GLONASS: logo y satélite generación GLONASS-M.	21
3.7. Generaciones de satélites GLONASS.	21
3.8. La CE y la ESA precursoras de Galileo.	22
3.9. Señales de Galileo.	23
3.10. Arquitectura de diseño de Galileo.	24
3.11. Logo BeiDou y estaciones de referencia en territorio chino.	25
3.12. Calendario de puesta en marcha de BeiDou.	26
3.13. Arquitectura del sistema BeiDou.	26
3.14. Logo ISRO y arquitectura del sistema IRNSS.	27
3.15. Logo QZSS y región de cobertura (proyección órbitas satélites HEO).	28
3.16. Arquitectura de los sistemas SBAS.	30
3.17. Sistemas SBAS existentes.	31
4.1. Procedimiento RNAV.	32
4.2. Posibles situaciones de navegación.	33
4.3. Diagrama de Stanford.	34
5.1. Logo de EGNOS.	36
5.2. Segmento de tierra EGNOS.	37
6.1. Fichero de observación VALE211A.17O.	47
6.2. Estructura de la cabecera de navegación.	48
6.3. Estructura de los datos de navegación.	49
6.4. Fichero de navegación VALE2110.17O.	50
7.1. Reseña de Estación Permanente - ERGNSS Valencia.	52
7.2. Interfaz Datos GNSS en PAG.	53
7.3. WinSCP y FTD de EDAS.	54
8.1. Ventana de comandos con Hatanaka	55
8.2. Ventana de comandos con TEQC	56
8.3. Interfaz del módulo Convertor.	57
8.4. GNSS Solution procesando.	58
8.5. Interfaz MFile Runner.	59
9.1. Disponibilidad EGNOS APV-I.	62
9.2. Continuidad EGNOS APV-I.	63
9.3. Índice de seguridad horizontal EGNOS APV-I Junio 2017.	64

9.4. Disponibilidad del sistema a 26 de julio de 2017.	65
9.5. Disponibilidad del sistema a 27 de julio de 2017.	66
9.6. Disponibilidad del sistema a 28 de julio de 2017.	67
9.7. Disponibilidad del sistema a 29 de julio de 2017.	68
9.8. Disponibilidad del sistema a 30 de julio de 2017.	69
9.9. Valores de precisión del 26 de julio de 2017.	69
9.10. Valores de precisión del 27 de julio de 2017.	70
9.11. Valores de precisión del 28 de julio de 2017.	70
9.12. Valores de precisión del 29 de julio de 2017.	70
9.13. Valores de precisión del 30 de julio de 2017.	70
9.14. Continuidad del sistema a 26 de julio de 2017.	71
9.15. Continuidad del sistema a 27 de julio de 2017.	72
9.16. Continuidad del sistema a 28 de julio de 2017.	73
9.17. Continuidad del sistema a 29 de julio de 2017.	74
9.18. Continuidad del sistema a 30 de julio de 2017.	75
9.19. Resultados de integridad del 26 de julio de 2017.	76
9.20. Resultados de integridad del 27 de julio de 2017.	77
9.21. Resultados de integridad del 28 de julio de 2017.	78
9.22. Resultados de integridad del 29 de julio de 2017.	79
9.23. Resultados de integridad del 30 de julio de 2017.	80

Índice de tablas

3.1. Servicios proporcionados por las señales de Galileo.	25
4.1. Requisitos de actuación de la señal en el espacio	35
4.2. Límites de alerta para la integridad.	35
5.1. Formato mensaje EGNOS.	39
5.2. Tipos de mensajes.	39
5.3. Procedimientos de aproximación instrumental.	41
9.1. Resultados de disponibilidad de la toma de datos a largo plazo.	61
9.2. Resultados de disponibilidad APV-I de la toma de datos a largo plazo.	62
9.3. Resultados de precisión de la toma de datos a largo plazo APV-I.	63
9.4. Resultados de continuidad de la toma de datos a largo plazo APV-I.	63
9.5. Resultados de integridad de la toma de datos a largo plazo APV-I.	64
11.1. Hardware y software.	92
11.2. Personal especializado.	92
11.3. Costes de oficina.	92
11.4. Coste total del material y el software.	93
11.5. Coste total del personal cualificado.	94
11.6. Coste total de la oficina.	94

Parte I
TEORÍA

Capítulo 1

Introducción

El transporte aéreo ha evolucionado rápidamente desde sus comienzos, y con él, la navegación también ha ido cambiando. Actualmente, la navegación convencional basada en radioayudas (VOR, DME, NDB, etc.) sigue dominando el sector, debido a su fiabilidad y a que los cambios en la industria aeronáutica deben introducirse de manera gradual para poder garantizar la seguridad de las operaciones.

Con el lanzamiento de satélites y las primeras constelaciones GNSS como GPS o GLONASS, se marca una nueva etapa en la navegación aérea. Por primera vez se puede empezar a hablar de navegación por satélite, que consiste en usar dichas constelaciones junto con sistemas de aumentación (ABAS, GBAS, SBAS) que permiten alcanzar un nivel aceptable de prestaciones para poder garantizar una navegación segura. Los requisitos necesarios están marcados por la OACI. Sin embargo, estos nuevos sistemas se están utilizando como complemento de los sistemas de navegación convencionales para posteriormente adquirir un mayor protagonismo.

Estos sistemas con sus procedimientos validados ya están ampliamente implantados y operativos en aeropuertos de EEUU, con otros tantos planificados para los años venideros.

A nivel europeo, la Comisión Europea (EC) apostó por el desarrollo y despliegue de una constelación de satélites GNSS independiente de GPS, Galileo, que junto con el sistema de aumentación EGNOS se están convirtiendo en herramientas fundamentales para hacer la navegación por satélite una realidad en Europa. En países como Francia o Alemania existen ya muchos aeropuertos donde están disponibles procedimientos GNSS validados, pero en el resto de Europa aún muchos carecen de estos tipos de procedimientos y está planificada su implementación, como se puede ver en la Figura 1.1.

Con el previsible auge del tráfico aéreo para los años próximos la navegación por satélite puede ser clave para poder garantizar un servicio seguro y de calidad, con un mayor aprovechamiento del espacio aéreo, reducción de costes al optimizar las rutas (en contraste con las aerovías rígidas de la navegación convencional), etc. Así pues, en Europa, está prevista la implantación de aproximaciones SBAS en muchos aeropuertos.

Lo citado lleva implícito un proceso de ensayo, análisis de datos, comprobación del cumplimiento de los requisitos y el diseño de procedimientos que usen estas nuevas herramientas de navegación y la validación de los mismos comprobando que efectivamente se cumplen los requisitos establecidos que suponen una garantía de seguridad en las operaciones.

Finalmente, simplemente apuntar que a pesar de que en este trabajo nos centramos en el uso de estos sistemas para el ámbito de la navegación aérea, en realidad las posibles aplicaciones de los mismos van más allá, pasando por navegación marítima, en el sector agrícola, en telefonía, etc. Todo este abanico de posibilidades, sin duda, justifica la gran inversión existente en el desarrollo de estos sistemas y, asimismo, la realización del presente trabajo.



Figura 1.1: Estado de implantación de procedimientos GNSS en aeropuertos y helipuertos europeos.

Capítulo 2

Objetivos

El objetivo fundamental de este TFG es realizar un proceso de validación y certificación de procedimientos SBAS (GNSS) para el aeródromo de Casinos (Valencia).

Con tal objeto en mente, se empezará dando una base teórica, sobre constelaciones GNSS y sistemas de aumentación, y una visión de la evolución que se está produciendo actualmente en el ámbito de la navegación aérea. Con ello, se justificará el desarrollo de este trabajo.

El proceso de validación constará de tres etapas:

- Una primera etapa de recogida de datos a largo plazo, durante 6 meses. Estos están disponibles en los informes mensuales de la ESSP.
- Una segunda etapa de recogida de datos a corto plazo, durante 5 días. Los datos GNSS son recibidos en una estación receptora de Valencia y los datos de aumentación están disponibles en el FTP de EDAS (EGNOS). Procesamiento de los datos.
- Una tercera fase de ensayos de vuelo sobre el terreno, que no será objeto de estudio en este TFG.

Con la finalización de las diferentes etapas se llegará a las correspondientes conclusiones en función de los resultados de los requerimientos de navegación marcados por la OACI y según el tipo de procedimiento SBAS (que marcará los límites en los mismos). Una vez finalizadas las dos primeras etapas, en un futuro TFG se podrá realizar la última fase de la validación, y en caso de obtener resultados satisfactorios, se podrá proceder con el diseño de procedimientos adecuado.

Capítulo 3

GNSS

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS por sus siglas en inglés) son un conjunto de infraestructuras a diferentes niveles que se utilizan para el posicionamiento de naves a nivel mundial y la medida de tiempo con gran precisión.

La infraestructura de estos sistemas puede dividirse en tres segmentos (ver Figura 3.1):

- **Segmento espacial.** Lo constituye la constelación de satélites que orbitan la Tierra y que funcionan utilizando varias señales de radiofrecuencia común para diferentes usos. Para un correcto posicionamiento es necesario al menos 4 satélites. Los satélites están provistos de relojes atómicos (relojes muy costosos de hidrógeno, rubidio, etc.) necesarios para garantizar una precisión en la medida de tiempo muy elevada para poder asegurar una gran precisión en la medida de distancia para poder obtener un posicionamiento correcto. Los satélites se encuentran distribuidos en diferentes planos orbitales de tal modo que se pueda garantizar la visión con los satélites necesarios en cada momento.
- **Segmento terrestre.** También se conoce como segmento de control al encargarse de monitorizar, actualizar y corregir la información que llegan de los satélites, para comprobar si estos operan adecuadamente. Lo constituye un conjunto de estaciones que se encuentran repartidas por la superficie terrestre que obtienen su posición y la envían a centros de control para introducir las correcciones pertinentes y enviar la información actualizada a los satélites.
- **Segmento usuario.** Lo constituye cualquier dispositivo con reloj que sea capaz de recibir la señal GNSS de los satélites, procesarla para resolver las ecuaciones y obtener las coordenadas del móvil.

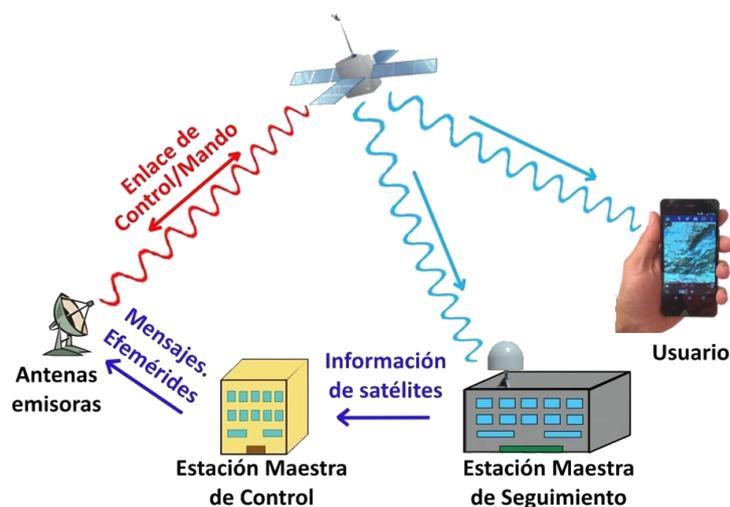


Figura 3.1: Segmentos que conforman los sistemas GNSS.

El desarrollo de estos sistemas implican una gran inversión por parte de los diferentes organismos institucionales interesados en su despliegue. Las múltiples aplicaciones, tales como navegación aérea, agricultura de precisión, salvamento, posicionamiento terrestre, altimetría, cartografía, temporización, etc., justifican dichas inversiones.

Actualmente existe diferentes constelaciones como GPS o GLONASS que están en pleno funcionamiento, y existen otras en fase de despliegue como Galileo o Beidou, entre otras. Todas las constelaciones presentan ciertas compatibilidades de la señal, especialmente en lo que respecta al servicio abierto (OS) para así permitir un mejor posicionamiento. No es algo raro que, para el cómputo de las coordenadas, un dispositivo móvil esté recibiendo señal de satélites de las diferentes constelaciones.

Solo cabe apuntar que estos sistemas poseen ciertas limitaciones con respecto al ámbito de la navegación aérea, por lo que estos deberán funcionar junto con una serie de sistemas de aumentación que permitan alcanzar un nivel de prestaciones determinado para poder garantizar que la navegación sea segura. Dichos niveles están establecidos por la OACI y se mostrarán en páginas posteriores.

3.1. Constelaciones

3.1.1. GPS

El GPS es el GNSS estadounidense cuyo origen es militar. Sin embargo, pronto se consideró su uso en el ámbito civil. El inicio del despliegue de la constelación NAVSTAR se produjo en 1978 con el lanzamiento del primer satélite Block I Navstar, hasta alcanzar plena capacidad operacional en 1995. El Departamento de Defensa de EEUU es el responsable del sistema. Utiliza el marco de referencia WGS84.

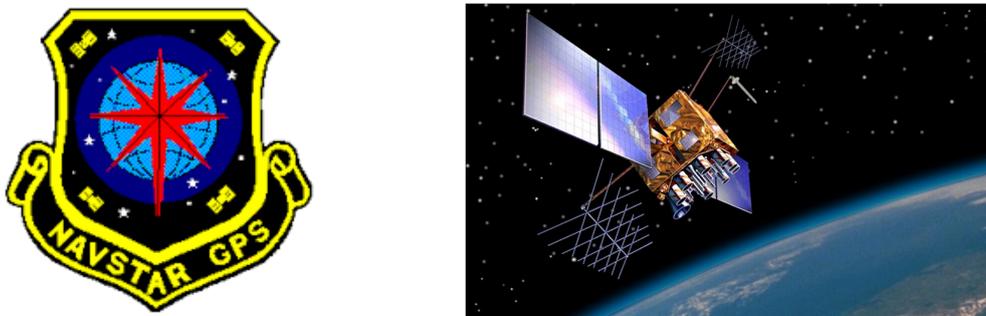


Figura 3.2: NAVSTAR-GPS: logo y satélite block IIR-M.

Los satélites de la constelación NAVSTAR transmiten señales con polaridad circular a derechas a dos frecuencias diferentes, moduladas por dos portadoras¹, L1 y L2. Las portadoras modulan (ver Figura 3.4) tres tipos de código:

- **Código C/A.** Transmitido en la frecuencia L1, se trata de un código de acceso libre.
- **Código P.** Transmitida en las frecuencias L1 y L2. Es un código PRN encriptado para uso militar que repite el patrón semanalmente. Se modula a su vez con un código W (secreto) para generar el código Y (emitido por el satélite en modo *anti-spoofing* [ver Página 20]).

¹A partir de la frecuencia maestro $f_0 = 10,23$ MHz se puede obtener la frecuencia de las portadoras $L1 = 154f_0 = 1575,42$ MHz y $L2 = 120f_0 = 1227,6$ MHz.

- **Datos de navegación.** Transmitido en ambas frecuencias L1 y L2. Código que contiene los datos para calcular la posición (efemérides, correcciones de los relojes de los satélites, almanaques, etc.). Su estructura se muestra en la Figura 3.3.

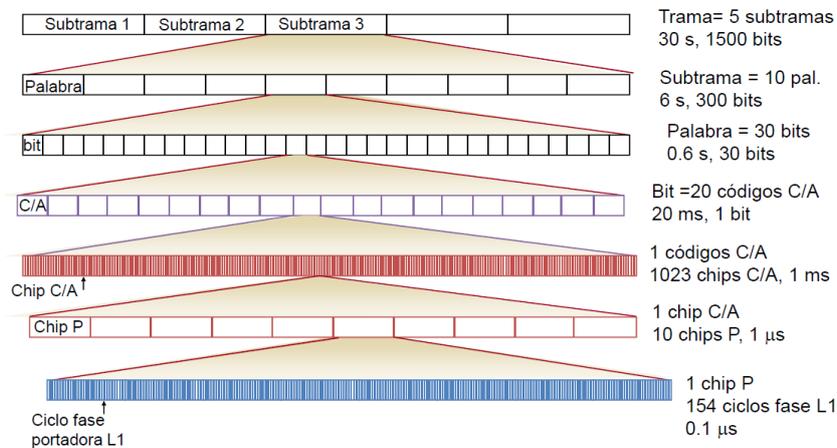


Figura 3.3: Estructura de los mensajes de navegación.

El resultado es la obtención de las señales L1 y L2 que se transmiten. El uso de dos señales es necesario para obtener el error ionosférico y poder eliminarlo.

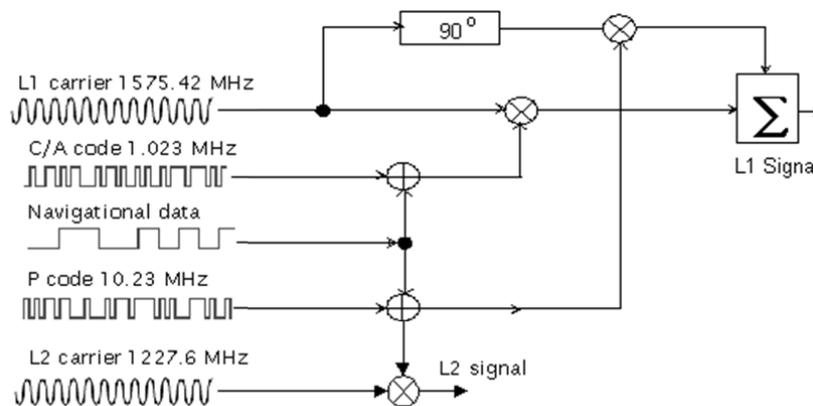


Figura 3.4: Obtención de las señales L1 y L2 (mezcladores y sumadores módulo 2).

Para la modernización (reposición de los satélites obsoletos e introducción de nuevas prestaciones) del sistema está previsto el lanzamiento de nuevas familias o bloques de satélites en los próximos años (bloques II-F y III), además del uso de nuevas señales tanto civiles como militares² como L1 C/A, L1 P/Y, L1M, L1C, L2C, L2 P/Y, L2M y L5³.

Los servicios que proporciona el sistema GPS son el PPS (*Precise Positioning Service*) y el SPS (*Standard Positioning Service*). Algunos métodos de protección del servicio PPS son el *anti-spoofing* y la disponibilidad selectiva:

²Las señales militares tendrán una mejor resistencia al *jamming* que la que se proporciona mediante código Y. El *jamming* consiste en bombardear el espectro con basura espectral y ruido deliberadamente para perturbar las señales.

³De uso civil y compatible con otros sistemas GNSS, con frecuencia de trabajo $f_{L5} = 1176,45$ MHz.

- **Anti-spoofing, AS.** Es el conjunto de técnicas destinadas a evitar el *spoofing*. Éste consiste en recrear las señales de los satélites GPS para que el receptor GPS del móvil al que se quiere engañar, incapaz de discernir entre la señal de los satélites y la señal recreada, sea posicionado en un lugar diferente al real. Para evitar esto existe el código-Y (encriptado) que es transmitido con las señales L1 y L2. Otra posible solución *anti-spoofing* sería el uso de una unidad inercial para poder contrastar el posicionamiento proporcionado por cada sistema.
- **Disponibilidad selectiva, SA.** Consistía en la degradación del GPS público, degradando los relojes de los satélites y manipulando las efemérides⁴, de manera intencionada por razones de seguridad. Esta medida se eliminó en el año 2000 disminuyendo el error significativamente (ver Figura 3.5).

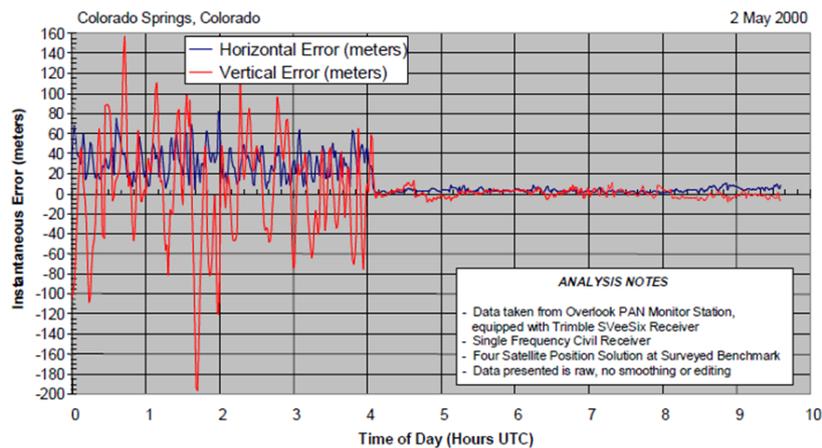


Figura 3.5: Desactivación de SA.

A parte de los sistemas de aumentación que veremos posteriormente, GPS cuenta con una versión diferencial, DGPS, que le permite anular errores consiguiendo una mayor precisión pero sin garantizar la integridad. Para ello, es necesario disponer de estaciones terrestres con posición conocida a través de las cuales se puede ver cual es la diferencia entre la posición calculada y la real para así computar el error y poder subsanarlo. Las principales fuentes de error son los relojes de satélites y receptores, la imperfección de las órbitas, la atmósfera terrestre dinámica que afecta a las señales, etc.

3.1.2. GLONASS

GLONASS es el sistema GNSS ruso (también de la antigua Unión Soviética, que inició el programa de despliegue como respuesta al GPS norteamericano). El sistema comenzó su despliegue con el lanzamiento de la familia de satélites de órbita media Kosmos ($\sim 20000\text{km}$) en 1982. Con la caída de la URSS, la Federación Rusa continuó con el desarrollo y despliegue del programa, llegando a estar completamente operativo en 1993, y alcanzando su momento culminante en 1995. No obstante, por razones económicas, el sistema dejó de estar operativo al no reemplazar los satélites que dejaban de funcionar. A principios del siglo XXI, el aumento del presupuesto para el mantenimiento y desarrollo de la constelación dentro de un plan de modernización del sistema llevaron a conseguir la cobertura global de nuevo en el año 2011. Inicialmente el marco de referencia utilizado era el PZ90.

⁴Posiciones de los satélites.

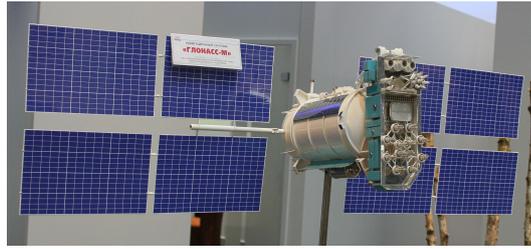


Figura 3.6: GLONASS: logo y satélite generación GLONASS-M.

Las frecuencias fundamentales portadoras en las que trabaja GLONASS son $L1 = 1602$ MHz y $L2 = 1246$ MHz. GLONASS utiliza el acceso múltiple por división de frecuencia⁵ (FDMA, por sus siglas en inglés) como método de multiplexación compartiendo canal de transmisión en lugar del CDMA usado en GPS o Galileo. La frecuencia de transmisión de cada satélite viene dado por la expresión (con $k \in [-7, 6]$):

$$f_{k1} = f_{01} + k\Delta f_1, \quad f_{01} = L1, \quad \Delta f_1 = 562,5 \text{ kHz}$$

$$f_{k2} = f_{02} + k\Delta f_2, \quad f_{02} = L2, \quad \Delta f_2 = 437,5 \text{ kHz}$$

La modernización del sistema GLONASS (ver Figura 3.7) engloba la actualización de los tres segmentos que componen el sistema. Respecto al segmento espacial, el proceso de modernización comenzó con el lanzamiento de los satélites GLONASS-M que se encuentran actualmente en órbita y que siguen utilizando el FDMA. Éstos se diseñaron para una duración de 7 años. Recientemente ha comenzado el lanzamiento de la tercera generación de satélites, GLONASS-K1, con un diseño de 10 años de vida. Esta generación trae consigo el uso del acceso múltiple por división de código⁶ y la nueva frecuencia de operación $L3 = 1205$ MHz. Para el año que viene está previsto el lanzamiento del primer satélite de la cuarta generación, GLONASS-K2.

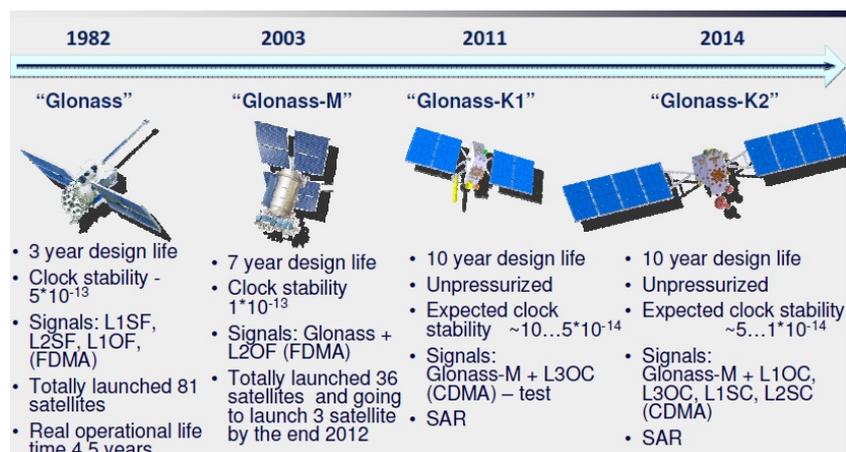


Figura 3.7: Generaciones de satélites GLONASS.

⁵Sistema de acceso múltiple en el que un canal de ancho de banda se divide en bandas menores de frecuencia con su propia FI portadora. El sistema se basa en el uso de la ortogonalidad.

⁶Sistema de acceso múltiple sin limitación de ancho de banda ni tiempo en el que varios transmisores envían la información separada mediante cifrado permitiendo identificar la estación desde la que se envían los datos y el mensaje a estaciones que conozcan el código de pulso de la transmisora.

La modernización del segmento terrestre consistió en conseguir una mayor interoperabilidad con los otros sistemas GNSS que tenían el marco de referencia WGS84, para ello se pasó de PZ90 a PZ90.11 ciñéndose a los estándares internacionales. También se aprobó la apertura de 15 nuevas estaciones, de las cuales, 6 estarían fuera de territorio ruso.

En cuanto a la modernización del segmento usuario, la Federación Rusa está promocionando el uso del mismo en el ámbito civil, para la localización de aviones, en topografía y estudio de la tectónica de placas, para labores de vigilancia, para sincronización, para rastrear los medios de transporte de masas, etc.

No obstante, GLONASS ya cuenta con una serie de servicios (como GPS):

- **SPS.** Servicio abierto gratuito para los usuarios de todo el mundo. En principio se transmitía por la señal de frecuencia G1 (señal modulada con portadora L1), y desde 2004 GLONASS-M lo transmite en la señal G2.
- **PPS.** Uso restringido a fines militares con el uso de ambas señales, G1 y G2.
- **SAR.** Servicio todavía no operativo pero previsto próximamente.

3.1.3. Galileo

Galileo es el sistema GNSS europeo que aún se encuentra en fase de despliegue. A diferencia de los sistemas GNSS como GPS o GLONASS, el origen de Galileo es civil, promovido por la Comisión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA). El sistema busca la independencia con respecto a los otros sistemas GNSS de origen militar⁷ y se pretende mejorar la precisión con respecto a GPS. El sistema está diseñado para ser interoperable con los otros sistemas. La operacionalidad completa del sistema se ha visto retrasada por diferentes inconvenientes que han aparecido durante el proceso de despliegue, pero se prevé para los próximos años.



Figura 3.8: La CE y la ESA precursoras de Galileo.

⁷Puesto que, ante un conflicto militar con otras regiones, estas pueden alterar el sistema para evitar que pueda ser usado por el enemigo.

Galileo posee cuatro señales transmitidas en cuatro bandas de frecuencia diferentes dentro del espectro de frecuencia de los Servicios de Radiofrecuencia de Navegación por Satélite (RNSS): E1, E5a, E5b⁸ y E6, donde las tres primeras están incluidas a su vez en el espectro de los Servicios de Radionavegación Aeronáutica (ARNS), que es el utilizado por usuarios de la industria aeronáutica para fines de seguridad operacional y evitar interferencias.

- La **señal E1** (L1) está formado por códigos PRN con mensaje de navegación no encriptado y mensaje de integridad.
- La **señal E5** comprende un canal piloto E5a y un canal de datos E5b.
- La **señal E6** se compone de dos canales, códigos PRN con mensaje de navegación encriptado.

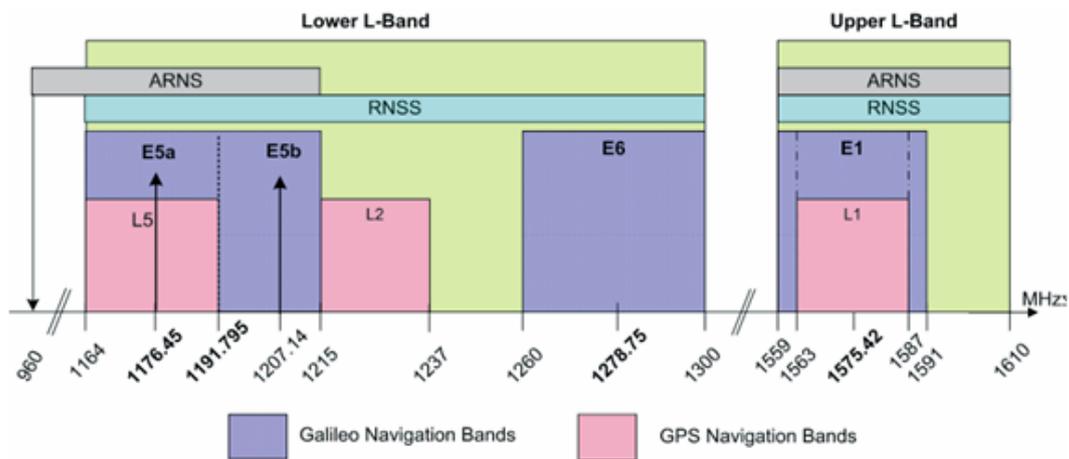


Figura 3.9: Señales de Galileo.

El sistema Galileo tiene una arquitectura de diseño (ver Figura 3.10) que engloba diferentes componentes. En primer lugar tenemos el **segmento espacial con 30 satélites de órbita media (MEO)** con un transpondedor SAR en cada uno. Estos satélites transmiten las señales a los **usuarios** (diferentes tipos de receptores dependiendo del servicio) y a las 16 **estaciones de monitorización**. Estas estaciones envían la información a los 2 **centros de control** que realizan las correcciones que se transmitirán a los satélites de nuevo mediante las 9 **estaciones de enlace** (antenas) y las 5 **estaciones de telemetría, rastreo y de mando** que corrigen las efemérides de los satélites (se envían las correcciones en la posición de todos los satélites).

⁸Las señales E5a y E5B forman parte del ancho de banda E5.

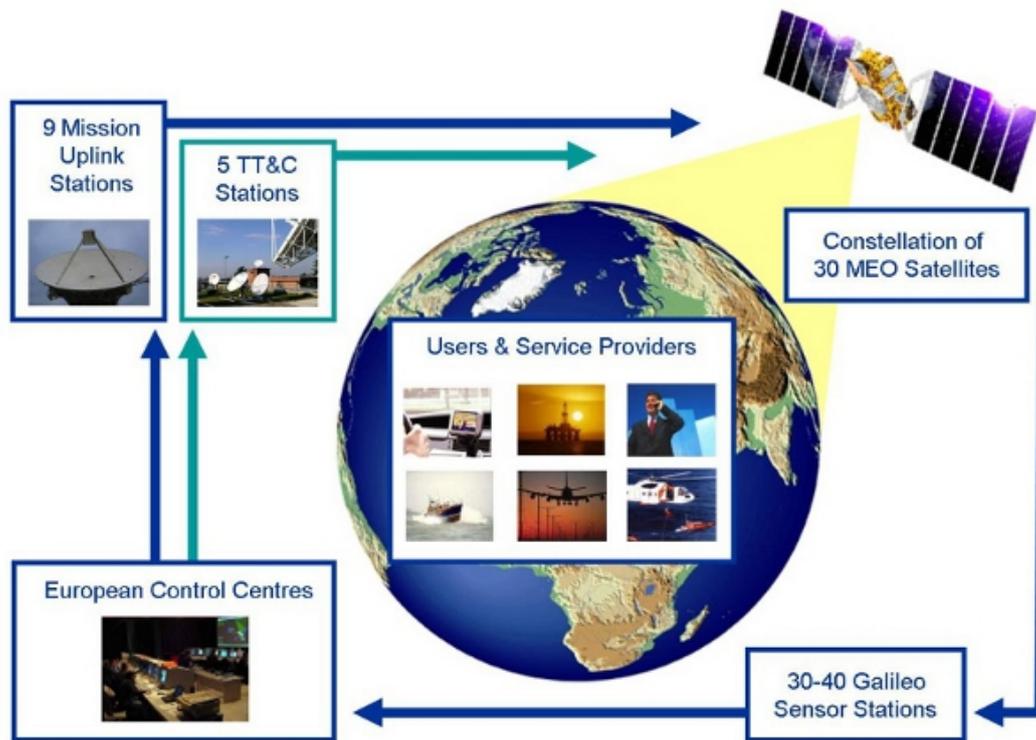


Figura 3.10: Arquitectura de diseño de Galileo.

Los servicios que ofrece Galileo son los siguientes:

- **Open Service, OS.** Servicio gratuito que proporciona la posición y la velocidad de un móvil con gran precisión (dependiendo del uso de una frecuencia o dos). Es compatible con GPS (señales L1 y E5a/L5). El inconveniente es que no ofrece integridad. El receptor requerido para poder utilizar el servicio es muy barato.
- **Commercial Service, CS.** Servicio más robusto y preciso que el abierto con el uso de señales encriptadas. Ofrece integridad. Utiliza la señal E6.
- **Public Regulated Service, PRS.** Servicio de uso gubernamental con encriptación de datos sin interoperabilidad con GPS. Ofrece integridad y disponibilidad continua. El servicio es muy más robusto que los anteriores pensado para aplicaciones dentro de empresas estratégicas a nivel estatal (eléctricas, telecomunicaciones, seguridad nacional, etc.).
- **Search and Rescue Service, SAR.** Sistema de tiempo real con alta precisión, funciones de encriptación y robustez pensado para el rescate de personas mediante la detección de señales de alerta y el uso de mensajes de socorro.
- **Safety of Life, SoL.** Servicio ofrecido por EGNOS (ver Página 36) de gran precisión con frecuencia dual o triple que carece de encriptación. El receptor deberá ser capaz de procesar la integridad. Es el servicio fundamental dentro del mundo de la navegación aérea pues permite el cumplimiento de los requisitos necesarios.

Señales \ Servicios		OS	CS	PRS	SAR	SoL
E1	E1	X		X		
E5	E5a	X	X			
	E5b	X	X			X
E6	E6		X	X		

Tabla 3.1: Servicios proporcionados por las señales de Galileo.

El plan de implementación está estructurado en tres fases:

- ***In Orbit Validation, IOV***. Primera fase que consiste en el testeo inicial de los satélites y en la obtención de datos experimentales y operacionales. Además se debía comprobar que el sistema funcionaba correctamente (la señal en el espacio se transmitía adecuadamente, la tecnología contra la radiación era satisfactoria, etc). En Febrero de 2014 esta fase se completó al haber pasado de manera satisfactoria las primeras pruebas.
- ***Initial Operational Capability, IOC***. Puesta en marcha de la infraestructura terrestre y espacial. Proporción de los servicios OS, SAR y PRS de manera adecuada. Desarrollo de los centros de control y lanzamiento de más satélites hasta formar una constelación de 18 satélites.
- ***Full Operational Capability, FOC***. Despliegue de los 30 satélites que forman la constelación para conseguir plena capacidad operacional, junto con la puesta en marcha de la red de estaciones de monitorización y estaciones de enlace repartidas por todo el globo. Fase prevista para los años 2019-2020.

3.1.4. Beidou

BeiDou es el GNSS de la República Popular de China. Actualmente se conoce como BeiDou-2, puesto que ya han sido lanzados los satélites de segunda generación. El sistema BeiDou está diseñado para mantener la interoperabilidad y compatibilidad con otros sistemas GNSS.



Figura 3.11: Logo BeiDou y estaciones de referencia en territorio chino.

El programa chino (ver Figura 3.12) empezó en 1997 con la definición del mismo y la previsión de las diferentes fases de despliegue. Para 2020 se prevé que el sistema tendrá cobertura global. El

sistema cuenta con 5 satélites geostacionarios (GEO), 5 satélites de órbita geosíncrona inclinada⁹ (IGSO) y 4 satélites de órbita media (MEO). La utilización de los satélites con diferentes órbitas tiene dos objetivos clave: en primer lugar, garantizar gran precisión y disponibilidad en territorio nacional y las regiones colindantes, y segundo, poder haber utilizado el sistema desde los primeros lanzamientos. Los satélites MEO estarán destinados a proporcionar la cobertura global del sistema, lo que supone que el uso de satélites GEO e IGSO en el área Asia/Pacífico supondrá una mejora muy significativa de la precisión.

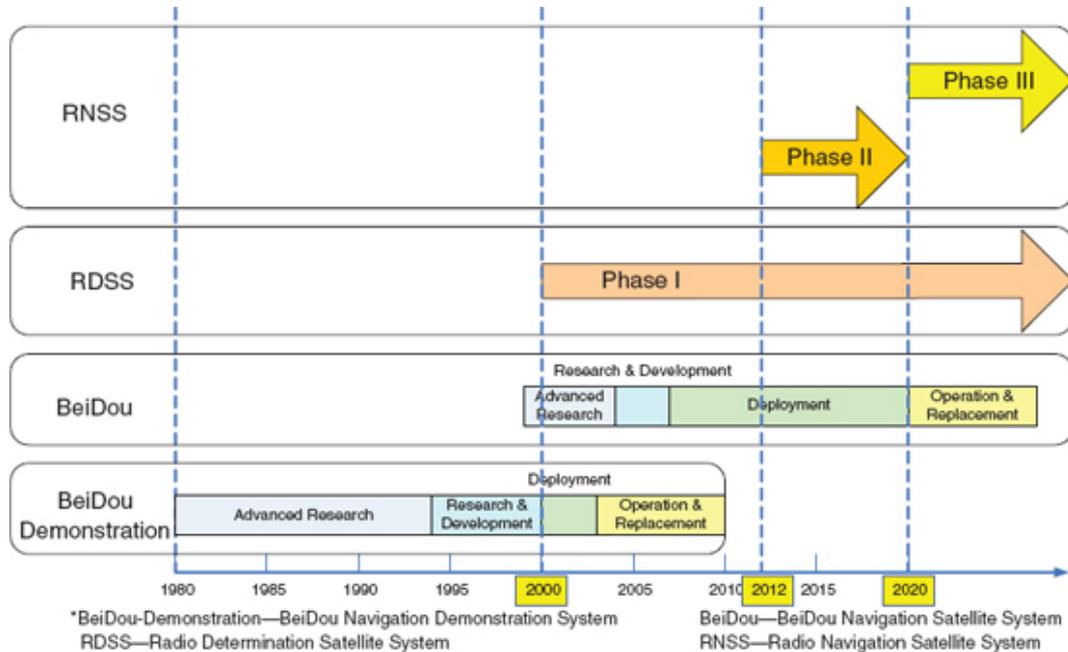


Figura 3.12: Calendario de puesta en marcha de BeiDou.



Figura 3.13: Arquitectura del sistema BeiDou.

⁹Los satélites de órbita geosíncrona inclinada son satélites que tienen el mismo período de rotación de la Tierra que están dispuestos con una cierta inclinación con respecto al plano ecuatorial, a diferencia de los GEO que se encuentran contenidos en el mismo. Su trayectoria proyectada sobre la tierra en un período de rotación daría lugar a una especie de '8'.

Los servicios que proporcionará BeiDou serán:

- A nivel global:
 - **Servicio abierto.** Cualquier usuario puede acceder a él de manera similar a los GNSS anteriores. Proporciona precisión de 10 m en espacio, 50 ns en tiempo y 0.2 m/s en velocidad.
 - **Servicio autorizado.** Asegura una alta fiabilidad en situaciones complejas.
- A nivel regional:
 - **Wide Area Differential Service.** Usado para proporcionar servicios equiparables al ILS CAT I y también usado en navegación marítima gracias al despliegue de estaciones que emiten correcciones en el interior y la costa.
 - **Short Message Service, SMS.** También llamado *Positioning Report Service* con capacidad limitada. Previsible evolución hacia mensajes mayores y con posibilidad de transmitir mensajes adicionales, no exclusivamente la posición.

3.1.5. NAVIC

El sistema de navegación por satélite regional de la India (IRNSS) es un sistema GNSS cuyo precursor es el gobierno indio a través de la Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO). Desde 2016 se conoce como NAVIC.

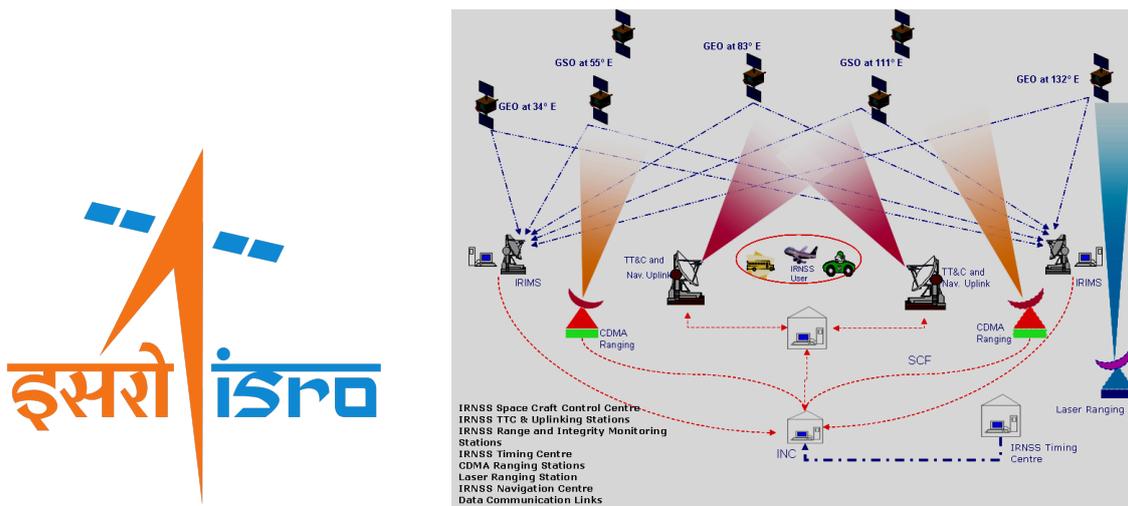


Figura 3.14: Logo ISRO y arquitectura del sistema IRNSS.

A diferencia de los sistemas de navegación por satélite anteriores, el GNSS indio solo pretende dar cobertura regional (India y regiones adyacentes), con una arquitectura similar a los anteriores (segmentos espacial, terrestre y usuario [ver Figura 3.14]) desarrollada íntegramente en la India. El segmento espacial estará constituido por 3 satélites GEO y por 4 IGSO.

Los servicios proporcionados también son semejantes a los anteriores, el *Special Positioning Service* (SPS) y el *Precision Service* (PS). Ambos servicios están proporcionados por señales con portadoras en bandas $L5 = 1176,45$ MHz y $S = 2492,08$ MHz. Las estructuras de datos emitidos está todavía en fase de estudio teniendo en cuenta las ventajas de ser una constelación bastante más pequeña.

El proyecto para el GNSS indio fue aprobado en 2006 y se preveía su implementación para 2015, pero finalmente se retrasaría hasta abril de 2016 cuando se lanzaría el último de los satélites.

3.1.6. QZSS

El *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS) es, al igual que NAVIC, un sistema GNSS de carácter regional a cargo de Japón. Este sistema fue autorizado por el gobierno japonés en 2002 y sería desarrollado inicialmente por ASBC hasta su caída, cuando tomarían el relevo JAXA y SPAC.

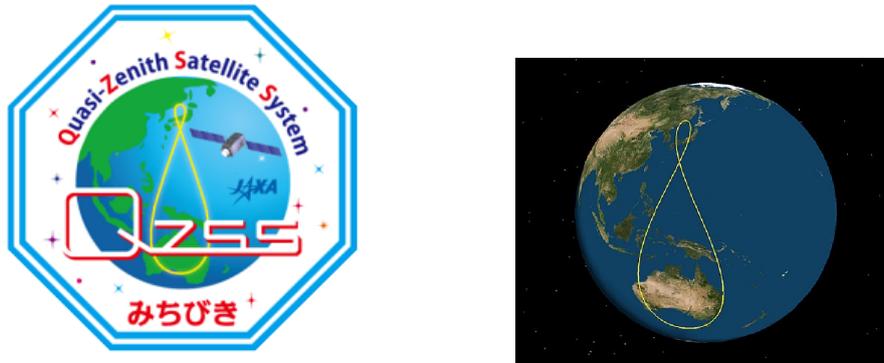


Figura 3.15: Logo QZSS y región de cobertura (proyección órbitas satélites HEO).

La cobertura del sistema se extiende por el este de Asia y Australia. El sistema no funciona de manera autónoma, sino que también depende de otras constelaciones GNSS, siendo compatible e interoperable.

El segmento espacial está compuesto por tres satélites dispuestos en una órbita elíptica de gran excentricidad (HEO) y un GEO, con un diseño que garantiza que al menos uno de los tres satélites HEO esté sobre el cenit japonés. El segmento terrestre está compuesto por estaciones (estación MCS, 10 estaciones de monitorización y una estación TT&C) que cubren la región de interés. Las señales utilizadas por el sistema QZSS son 6:

- Combiandas con otras GNSS: L1 – C/A = 1575,42 MHz, L1C = 1575,42 MHz, L2C = 1227,6 MHz y L5 = 1176,45 MHz.
- Señal de aumentación con resolución de menos de un metro interoperable con GPS-SBAS: L1 – SAIF = 1575,42 MHz.
- Señal bajo experimentación con precisión de 3 cm, compatible con la señal E6 de Galileo: LEX = 1278,75 MHz.

Al igual que en los otros sistemas, QZSS se usa para mapeo móvil, agricultura de precisión, asistencia marítima, gestión y localización de flotas, etc. Los servicios ofrecidos por el sistema son:

- Posicionamiento en función de la precisión:
 - *Satellite Positioning Service.*
 - *Sub-meter Level Augmentation Service.*
 - *Centimeter Level Augmentation Service.*
 - *Position Technology Verification Services.*
- Mensajería:
 - *Short Message Delivery Service.*

Está planificado el lanzamiento de satélites hasta conseguir una constelación de 7 satélites.

3.2. Sistemas de aumentación

Los sistemas GNSS nos permiten conocer la posición, tiempo y velocidad con un cierto nivel de precisión, y por ello son una gran herramienta. Sin embargo, por sí solos no pueden constituir un sistema de navegación puesto que es necesario cumplir unos requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad (ver Página 4.1) establecidos por la OACI. Estos requerimientos suponen una garantía en seguridad operacional muy importante e implican superar las limitaciones que traen consigo los sistemas GNSS, ya que estos no fueron diseñados con el fin de cumplir los requisitos que un sistema de navegación debería tener.

La navegación aérea se apoyará, pues, en una serie de instalaciones que permitirán cumplir con tales requisitos. Estas instalaciones pueden estar situadas en satélites (SBAS), en tierra (GBAS) o en las propias aeronaves (ABAS). Dependiendo de la fase de vuelo, los requerimientos serán diferentes, y por tanto se podrán utilizar un determinado tipo de instalaciones u otras. Cabe apuntar también que el uso de sistemas GNSS junto con los sistemas de aumentación como sistema de navegación no está reñido con el uso de las radioayudas a la navegación tradicionales y la navegación inercial, aunque lo que se quiere es evolucionar a una navegación en la que el sistema principal sea GNSS aumentado.

Los diferentes tipos de sistemas de aumentación se describen con más detalle a continuación.

3.2.1. ABAS

Los sistemas de aumentación basados en la aeronave (ABAS, por sus siglas en inglés) son aquellos en los cuales se aumenta y/o integra la información proporcionada por los sistemas GNSS con la información de la aeronave. El fin de estos sistemas es obtener la integridad para comprobar si se puede usar el sistema (sin necesidad de cumplir el resto de requisitos ni aplicación de correcciones para mejorar la precisión). El sistema ABAS se puede usar en fases de salida, ruta, llegada y aproximaciones de no precisión (su principal limitación es la componente vertical del error).

Los receptores ABAS que podemos encontrar a bordo son:

- ***Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM***. Usa información GNSS. Y puede suponer la principal herramienta de determinación de la integración o también un apoyo complementario a otros sistemas de aumentación. Existen dos familias:
 - ***Measurement Rejection Approach, MRA***. Usa técnicas de *Fault Detection and Exclusion*¹⁰ (FDE) que son propias de la aviación civil imponiendo unos límites bastante estrictos que dan lugar a bajos niveles de disponibilidad.
 - ***Error Characterization Approach, ECA***. Tiene en cuenta el error *Non Line of Sight* (NLOS) para conseguir mayores niveles de disponibilidad pero con menores restricciones en los límites de protección impuestos.
- ***Airborne Autonomous Integrity Monitoring, AAIM***. Combina información GNSS y la proporcionada por los sensores de la aeronave.

3.2.2. GBAS

Los sistemas de aumentación basados en tierra (GBAS)son los conformados por estaciones terrestres que proporcionan sus servicios a nivel de aeropuerto. Son utilizados a nivel local ya que se encuentra limitado en términos de cobertura, pero proporciona servicios en las fases de salida, llegada,

¹⁰Para determinar la integridad el procedimiento que se lleva a cabo es la comparación de los pseudorange medidos en por múltiples subconjuntos de 4 satélites para así poder determinar cual podría ser defectuoso y excluirlo de la solución, o simplemente para avisar de que el sistema no puede usarse. Con cuatro satélites se puede obtener la solución GNSS, con 5 satélites se puede obtener la integridad sin determinar qué satélite es defectuoso, y con 6 o más satélites se puede detectar y excluir los satélites defectuosos.

rodadura en plataforma y en aproximación de precisión a un número ilimitado de aeronaves. Además de las instalaciones en tierra, la propia aeronave deberá contar con un receptor GBAS.

A día de hoy, el sistema se encuentra en una fase de implementación que le permite realizar maniobras ILS CAT I (y también maniobras APV-I y APV-II), pero está previsto que lo sustituya también para CAT II y III próximamente.

El funcionamiento del sistema consiste en la recepción de las señales GNSS de la constelación por parte de las estaciones en tierra. Éstas calculan su posición, aplican las correcciones (al conocer su posición real), obtienen de parámetros de integridad y otra información importante para la operación, y toda esta información se transmite omnidireccionalmente por banda VHF, permitiendo al avión situarse de manera muy precisa y garantizándose los requisitos.

En EEUU destaca el sistema LAAS (*Local Area Augmentation System*) y en Australia GRAS.

3.2.3. SBAS

Los sistemas de aumentación basados en satélite (SBAS) son sistemas de área extensa en los que se transmiten correcciones diferenciales mediante la señal de satélite. Se puede usar en cualquier fase del vuelo.

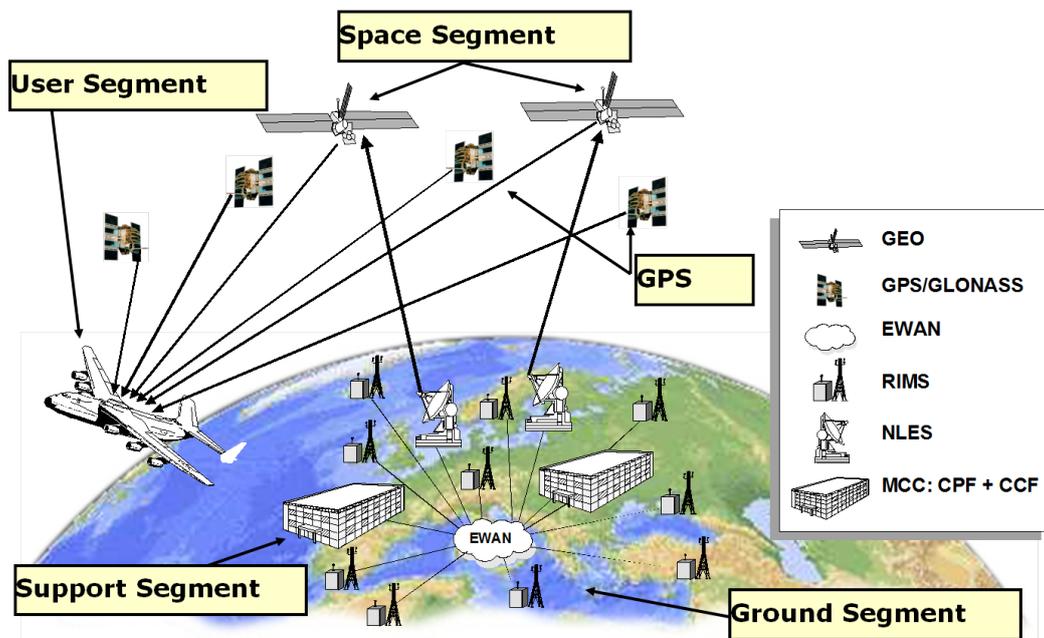


Figura 3.16: Arquitectura de los sistemas SBAS.

Dentro de un sistema SBAS se pueden distinguir diferentes partes (ver Figura 3.16):

- Por una parte tenemos el **segmento espacial**, donde las correcciones y los datos de integridad se envían a través de satélites geostacionarios.
- Por otra parte se cuenta con un **segmento de tierra** conformado por diferentes estaciones repartidas por toda la superficie terrestre que sirven para recibir y monitorizar la señal GNSS, pudiéndose obtener los errores GNSS que se transmiten a un centro de mando donde se calculan las correcciones diferenciales y los mensajes de integridad que se transmitirán a través del satélite geostacionario en forma de mensaje SBAS¹¹.

¹¹En el mensaje se contienen, a parte de las correcciones y los datos de integridad, las efemérides, la información ionosférica, información sobre los relojes. El mensaje es transmitido en tiempo real.

- Y también el **segmento usuario** compuesto por cualquier receptor que sea capaz de descifrar las correcciones a partir del mensaje SBAS.

Actualmente encontramos diferentes sistemas SBAS en diferentes partes del mundo (ver Figura 3.17), como por ejemplo, EGNOS en Europa, WAAS en norteamérica, GAGAN en la India o MSAS en Japón. Se explicarán con un poco más de detalle a continuación.



Figura 3.17: Sistemas SBAS existentes.

WAAS

El *Wide Area Augmentation System* (WAAS) es el SBAS norteamericano que comenzó a desarrollarse para uso civil por la FAA y que se encuentra en estado operacional desde 2003.

La cobertura del sistema se extiende por toda América del Norte, garantizándose los diferentes requisitos de navegación. El futuro del sistema pasa por una fase de mejora para introducir la utilización de dos frecuencias.

Actualmente permite procedimientos de vuelo LNAV/VNAV, LP y LPV.

MSAS

El *MTSAT Satellite Augmentation System* (MSAS) es el SBAS japonés que comenzó a utilizarse en las operaciones en 2007 para las fases de ruta y aproximación de no precisión. En el futuro también están previstas las operaciones LPV-200 y la implantación de la doble frecuencia. Es interoperable con otros sistemas.

GAGAN

El *GPS Aided Geo Augmented System* (GAGAN) es el SBAS de la India. Tiene previsto su desarrollo en tres fases, estando actualmente en la segunda. Posee tres satélites GEO para el envío de mensajes SBAS. Uno de sus principales problemas es la modelización del error ionosférico por las singularidades de la zona donde opera el sistema. Opera de manera similar a otros sistemas SBAS.

Capítulo 4

PBN

La Navegación Basada en Prestaciones (PBN) consiste en una evolución dentro del mundo de la navegación aérea, donde paulatinamente se prevé el abandono de las técnicas de navegación convencional (radioayudas que definen tramos de vuelo) para pasar a una navegación más precisa y directa.

PBN no es un tipo de navegación, sino que engloba diferentes tipos, destacando *Required Navigation Performance* (RNP) y Navegación de Área (RNAV), que se encuentran caracterizadas por una serie de requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad que los equipos de navegación deben tener para poder operar. Todos los requisitos se detallan en [9], junto con aspectos relativos a los sensores con los que deben estar equipadas las aeronaves, la preparación de la tripulación, los sistemas de abordaje, etc.

- El concepto RNP comprende el conjunto de requisitos que se desean obtener dependiendo del tipo de operación, condicionando el diseño de los sistemas de navegación. El concepto RNP lleva asociado una **región o área de confinamiento**¹.

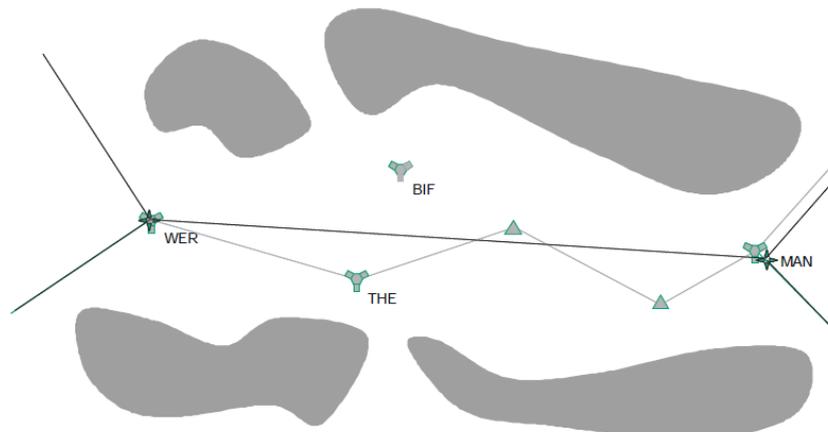


Figura 4.1: Procedimiento RNAV.

- RNAV es un método de navegación basado en la creación de puntos de ruta virtuales para poder acortar las trayectorias, haciéndolas más directas (ver Figura 4.1), en lugar de seguir tramos de ruta rígidos definidos por las radioayudas convencionales. Con ello se busca un menor impacto económico y medioambiental (ahorro de combustible por vuelo) al acortar las rutas y un mejor aprovechamiento del espacio aéreo. Dependiendo de la capacidad se distinguen:

- RNAV 2D, los sistemas permiten la navegación en el plano.

¹El área de confinamiento es una sucesión de ventanas definidas alrededor de la trayectoria nominal de donde la aeronave no debe salir con una probabilidad menor de 10^{-7} .

- RNAV 3D, los sistemas permiten la navegación en el espacio.
- RNAV 4D, los sistemas permiten la navegación en el permiten un control adicional del tiempo.

La implementación de RNAV está sujeta al desarrollo de los sistemas embarcados y sus capacidades de operación, el entrenamiento de las tripulaciones en las técnicas adecuadas y que la aeronave esté en una zona de cobertura de los sistemas GNSS y el sistema de aumentación (actualmente se requiere compatibilidad con WGS84).

Como ya se ha apuntado, los sistemas GNSS por sí solos no se pueden usar como sistemas de navegación principales dentro de una aeronave, por ello se justifica el uso de sistemas de aumentación que permitan cumplir con los requisitos necesarios. La OACI en [10] establece los valores de dichos requisitos (ver Tablas 4.1 y 4.2).

4.1. Requerimientos

4.1.1. Precisión

La precisión es la diferencia estadística entre la posición real y la posición estimada expresado con un determinado percentil (en aeronáutica son comunes los percentiles 95 % ó 99 %), indicando qué porcentaje de medidas tendrán un error menor o igual al valor de precisión.

El valor se representa mediante la media de la posición horizontal y vertical (HPE y VPE) y sus respectivos errores de navegación (HNSE y VNSE) con un determinado percentil (representación estadística).

4.1.2. Integridad

La integridad es la capacidad de un sistema de navegación de poder advertir de su mal funcionamiento al usuario en un margen de tiempo apropiado. Se mide en probabilidad para un determinado tiempo.

El concepto de integridad lleva asociado otros conceptos importantes:

- **Límite de Alerta, AL.** Tolerancia al error que no puede excederse sin emitir un mensaje de alerta.
- **Tiempo de Alerta, TAL.** Máximo tiempo que debe transcurrir entre que el sistema de navegación deja de cumplir los requisitos y la emisión de la alerta.
- **Riesgo de Integridad, IR.** Probabilidad de que en un momento el error de posición (PE) sea superior al límite de alerta ($AL < PE$).
- **Nivel de protección, PL.** Error estadístico que indica que la probabilidad de que el error de posición absoluto sea mayor o igual que el riesgo de integridad ($IR \leq PE$).

Para que estas definiciones sean más intuitivas se pueden apreciar los esquemas de la Figura 4.2.

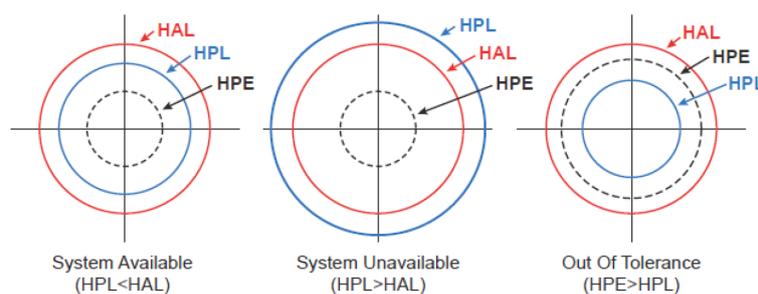


Figura 4.2: Posibles situaciones de navegación.

La primera situación muestra un sistema que funciona correctamente al estar el error de posición por debajo de nivel de protección y del límite de alerta ($PE < PL < AL$). En el segundo caso, el sistema no está disponible y se deberá emitir una alarma de integridad al ser mayor el nivel de protección que el límite de alerta ($AL < PL$). En el tercer caso, el error no está delimitado correctamente y se está comprometiendo la seguridad si el error es mayor que el límite de alerta definido para una operación concreta. Esto se observa claramente en el diagrama de Stanford (ver Figura 4.3).

Para poder medir la integridad se utilizan dos herramientas:

- **Índices de seguridad.** Relación entre el error del sistema de navegación y el nivel de protección, considerándose segura una operación siempre que su valor sea menor a la unidad.

$$HSI = \frac{HPE}{HPL} < 1; \quad VSI = \frac{VPE}{VPL} < 1$$

- **Diagrama de Stanford.** Diagrama donde se representa el error de posición en el eje de abscisas y el nivel de protección en el eje de ordenadas y que se divide en regiones mediante la representación de los límites de alerta y la diagonal. A cada región le corresponde una situación diferente y se trata de un método muy adecuado al apreciar rápidamente las diferentes situaciones en las que se puede encontrar un sistema de navegación.

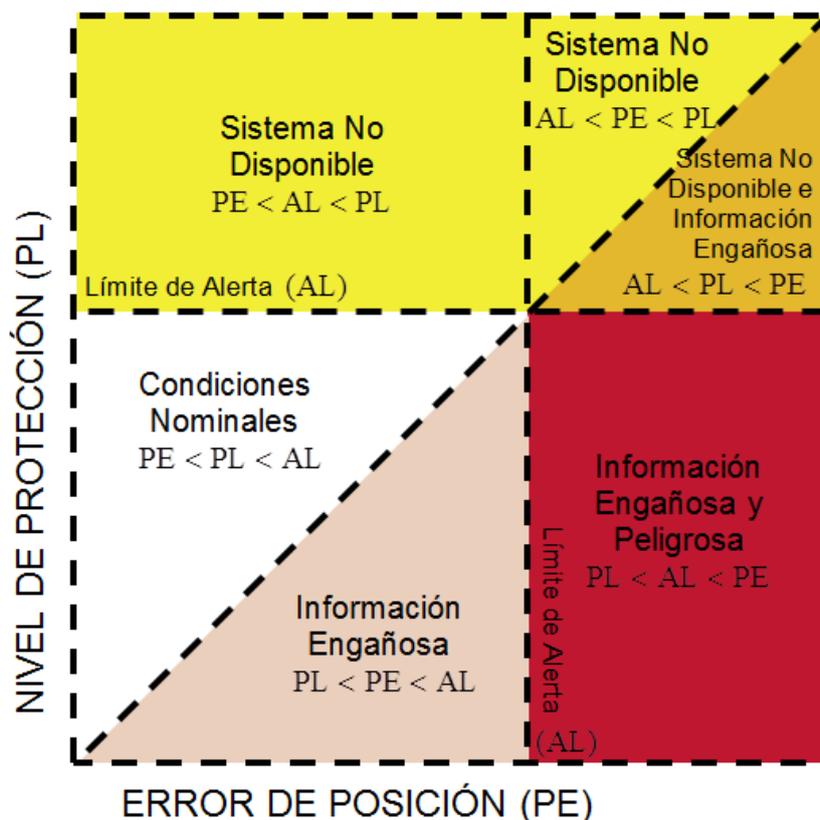


Figura 4.3: Diagrama de Stanford.

EGNOS (ver Página 36) posee un servicio de integridad que debe proteger en caso de fallos relacionados con el satélite (excluyendo aquel defectuoso) o por fallos en las correcciones diferenciales.

4.1.3. Continuidad

La continuidad de un sistema es la probabilidad de que el sistema siga funcionando ininterrumpidamente durante una operación de vuelo definida garantizando unas prestaciones mínimas acordes a la operación que se realiza, suponiendo que el sistema está disponible al comienzo de la operación.

En navegación aérea se mide como la probabilidad de que la operatividad se mantenga sin interrupción durante un período de tiempo, que suele ser de 15 s ó 1 h.

Hay casos en los que el requisito de continuidad no se cumple y se permite el uso del sistema de navegación si se toman medidas necesarias que suplan la falta de dicho requerimiento.

4.1.4. Disponibilidad

La disponibilidad del sistema indica el porcentaje de tiempo en el que un usuario puede usar el servicio de navegación en una zona e instante de tiempo dados. La disponibilidad depende de las características físicas del entorno (el relieve, meteorología) donde está el receptor y las capacidades técnicas las instalaciones que transmiten la señal, y la disposición de los satélites, ya que se necesita un número mínimo para poder posicionar en 2D y 3D.

Operaciones ordinarias	Exactitud horizontal 95 %	Exactitud vertical 95 %	Integridad	Tiempo hasta alerta	Continuidad	Disponibilidad
En ruta	3.7 km (2.0 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ a $1 - 1 \times 10^{-8}/h$ $1 - 1 \times 10^{-4}/h$	0.99 a 0.99999
En ruta, terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 1 \times 10^{-8}/h$ a $1 - 1 \times 10^{-4}/h$	0.99 a 0.99999
Aproximación inicial, aproximación intermedia, aproximación que no es de precisión (NPA), salida	220 m (720 ft)	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 1 \times 10^{-4}/h$ a $1 - 1 \times 10^{-8}/h$	0.99 a 0.99999
Aproximación que no es de precisión con guía vertical (APV-I)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ por aproximación	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ en 15 s	0.99 a 0.99999
Aproximación que no es de precisión con guía vertical (APV-II)	16.0 m (52 ft)	8.0 m (26 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ por aproximación	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ en 15 s	0.99 a 0.99999
Aproximación de precisión de Categoría I	16.0 m (52 ft)	6.0 a 4.0 m (20 a 13 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}$ por aproximación	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ en 15 s	0.99 a 0.99999

Tabla 4.1: Requisitos de actuación de la señal en el espacio

Operación ordinaria	Límite horizontal de alerta	Límite vertical de alerta
En ruta (oceánica/continental de baja densidad)	7.4 km (4 NM)	N/A
En ruta (continental)	3.7 km (2 NM)	N/A
En ruta, de terminal	1.85 km (1 NM)	N/A
NPA	556 m (0.3 NM)	N/A
APV-I	40.0 m (130 ft)	50 m (164 ft)
APV-II	40.0 m (130 ft)	20.0 m (66 ft)
Aproximación de precisión de Categoría I	40.0 m (130 ft)	15.0 m a 10.0 m (50 ft a 33 ft)

Tabla 4.2: Límites de alerta para la integridad.

Capítulo 5

EGNOS

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) es el SBAS europeo que complementará a Galileo y el resto de sistemas GNSS para conseguir las prestaciones de un sistema de navegación. Esta desarrollado por iniciativa de la Unión Europea, la ESA y EUROCONTROL, convirtiéndose en el proyecto europeo de mayor relevancia en el campo de la navegación por satélite (junto con Galileo).



Figura 5.1: Logo de EGNOS.

La cobertura del sistema comprende la Europa continental, el Reino Unido, Islandia, las zonas colindantes como el norte y noroeste de África (Islas Canarias) y zonas del Atlántico Norte.

La arquitectura del sistema EGNOS, al igual que la de otros sistemas SBAS, consta de los tres segmentos:

- **Segmento espacial.** Este segmento está compuesto por tres satélites GEO centrados sobre Europa (Inmarsat-3 AOR-E, Inmarsat-3 IOR-W y ESA-Artemis) y situados estratégicamente para optimizar la disponibilidad y continuidad del sistema, maximizando el ángulo de visibilidad y asegurando cobertura doble en el área de interés (redundancia en caso de fallo de un enlace con satélite GEO). La identificación de cada uno se realiza gracias al PRN único de cada satélite.
- **Segmento terrestre.** Comprende una red de diferentes tipos de estaciones de procesamiento de datos, enlaces con satélites y control repartidas en su mayoría en el continente europeo y las áreas limítrofes, y algunas en otras zonas del mundo (ver Figura 5.2). Entre estas estaciones encontramos:
 - ***Ranging Integrity Monitoring Stations, RIMS.*** Estaciones encargadas de transmitir los datos GNSS brutos y para detección de fallos. Existe diferentes tipos de estaciones RIMS dependiendo de la función:

- **Segmento usuario.** Comprende los dispositivos que tengan receptores EGNOS que puedan descifrar los mensajes enviados a través del GEO (que tienen las correcciones, datos de integridad, etc.). Los receptores pueden acceder a los diferentes servicios proporcionados con EGNOS que vendrán definidos por sus prestaciones y unos requerimientos diferentes.

5.1. Tratamiento de datos

5.1.1. Ciclo de procesado

El ciclo tiene por objeto obtener la información relativa a la integridad y obtener y aplicar las correcciones. El proceso comienza con la obtención de los datos brutos de GNSS por parte de las RIMS que se envían a la CPF para su procesado generando las correcciones y los mensajes de integridad. El procesado se lleva a cabo en cuatro etapas:

- **Preprocesado y validación.** Los datos que provienen de las RIMS se validan, se eliminan los errores sistemáticos (ionosférico, troposférico, etc.) y se filtran para eliminar el efecto multicamino, el ruido blanco, etc.
- **Cálculo de los datos de aumentación EGNOS.** Obtención de las correcciones a los errores de los relojes, de las órbitas, el error ionosférico vertical y los errores residuales UDRE (*User Differential Range Error*) y GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*).
- **Validación y estimación de calidad.** Evaluación de la integridad de los resultados anteriores.
- **Procesado de salida de datos.** Elaboración de los mensajes EGNOS con los datos anteriores de acuerdo con el estándar establecido.

Los mensajes EGNOS se envían a las NLES, que a su vez los envía a los GEO que transmitirán el mensaje a todos los usuarios.

5.1.2. Ciclo de validación

El proceso de validación consiste en la recepción de datos brutos GNSS y datos de satélites GEO por los canales B y C a las RIMS, que los enviarán a la unidad de validación del CPF. En esta unidad se hace un examen estadístico sobre los datos enviados en la etapa anterior de procesado.

Para verificar el UERE (*User Equivalent Range Error*) y el UDRE se combinan las medidas de las RIMS para mejorar la fiabilidad de la información relativa a los errores del pseudorango (UERE) y su error residual (UDRE). Si los valores del procesado y de validación difieren significativamente entonces se activa una señal de integridad (*Not Monitored*, NM) en el satélite oportuno.

En el caso del GIVD (*Grid Ionospheric Vertical Delay*) y el GIVE se combina la información de doble frecuencia GPS para conseguir una estimación del retardo ionosférico GIVD en los puntos IGP (*Ionospheric Grid Points*). Se vuelven a comparar los resultados de procesado y validación activando la señal de integridad asociada al punto IGP oportuno.

5.2. Mensajes EGNOS

Los mensajes de EGNOS tienen una estructura precisa definida en el estándar RTCA MOPS DO-229-C. En este se define como se distribuyen los datos de las señales enviadas, que se componen de 500 bits, de los cuales 250 son los datos a enviar codificados mediante convolución. El resto de 250 bits son los datos sin codificar que presentan el formato mostrado en la Tabla 5.1, que también está definido en el estándar mencionado. Los mensajes se envían por la banda L1.

Posición en el mensaje	Número de bits	Nombre	Función
0-7	8	Preámbulo	Asegurar la sincronización con el receptor.
8-13	6	Identificador de tipo de mensaje	Indicar el tipo de mensaje.
14-225	212	Datos	Contiene las correcciones, información sobre integridad de acuerdo con el tipo de mensaje.
226-249	24	Información de paridad	Detección de errores.

Tabla 5.1: Formato mensaje EGNOS.

Los diferentes tipos de mensaje que se pueden transmitir se describen en la Tabla 5.2.

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	Factores degradantes de las correcciones rápidas
9	Posición, velocidad y aceleración de los satélites
10	Factores degradantes de las correcciones ionosféricas y a largo plazo
12	Sincronización tiempo EGNOS y UTC
17	Almanaques de los satélites GEO
18	Máscaras IGP
24	Correcciones rápidas y a largo plazo
25	Correcciones a largo plazo
26	Correcciones ionosféricas
27	Servicio de mensajería EGNOS
28	Matriz de covarianzas de los relojes de los satélites
62	Mensaje sin contenido
63	Mensaje tipo nulo

Tabla 5.2: Tipos de mensajes.

Todos estos diferentes tipos de mensajes se pueden englobar en tres subgrupos: los que contienen información relativa a los satélites, los que contienen información de la ionosfera y mensajes complementarios.

5.3. Servicios EGNOS

5.3.1. OS

El servicio abierto de EGNOS es aquel accesible para cualquier usuario en Europa que disponga del receptor apropiado mediante el cual se consigue mejorar la precisión en el posicionamiento a través de la aplicación de correcciones, en comparación con el posicionamiento obtenido de GNSS.

Existen diferentes fuentes de error que influyen en la señal, como los relojes, distorsiones producidas por el propio equipamiento del satélite, incertidumbre en la posición de los satélites o errores ionosféricos. También hay otros errores, como los troposféricos, el multicamino o el propio receptor del usuario, que pueden alterar la señal y son fuentes de error que no pueden ser corregidas mediante SBAS².

El servicio se encuentra operativo desde 2009 y su rendimiento estándar garantiza una precisión horizontal (bidimensional con límite de confianza del 95 %) de 3 m y precisión vertical (unidimensional con límite de confianza del 95 %) de 4 m.

5.3.2. SoL

El servicio *Safety of Life* está diseñado para las operaciones de aviación civil garantizando el cumplimiento de los límites definidos por ICAO y también los definidos por SARPs (*Standard and Recommended Practices*) para SBAS que dependen del tipo de procedimiento. Dentro de la aviación se espera el uso para procedimientos NPA y APV-I. Este servicio también prevé dar soporte a otros ámbitos como el marítimo, ferrocarril o carretera.

Este servicio está disponible para usuarios que cuenten con un receptor EGNOS certificado dentro del área de cobertura y una autorización emitida por una autoridad competente. El servicio está disponible desde 2011.

5.3.3. EGNOS CDDS

El EGNOS *Commercial Data Distribution Service* (CDDS) es un servicio que no se transmite por las señales de los satélites, sino por otros canales como Internet, para su uso comercial y profesional (los usuarios están en tierra, no es un servicio aeronáutico).

El primero paso fue el desarrollo de *EGNOS Data Access System* (EDAS) por parte de la Comisión Europea para la transmisión de datos de acuerdo al standard RTCM SC 104 (uso marítimo) y para el acceso a los datos GNSS brutos de las RIMS, todo ello en tiempo real. Pero este es sólo el germen del futuro EGNOS CDDS.

El EDAS está disponible desde 2012 y está pensado para aplicaciones móviles, marítimas, ferroviarias, para el control de flotas en carretera, suponiendo un cierto valor añadido gracias a las buenas prestaciones.

5.4. Implementación EGNOS

Tal y como hemos visto, a día de hoy la navegación convencional basada en radioayudas sigue siendo la principal herramienta de ayuda en las operaciones de aviación. Estos sistemas son muy caros, tanto su coste inicial como su mantenimiento, por lo que el diseño de procedimientos basados en GNSS con sistemas de aumentación se ha convertido en una alternativa económica y viable frente a las radioayudas. Otra ventaja añadida es la previsible mejora de la eficiencia en la explotación del espacio aéreo, al permitir rutas más flexibles.

Una vez que hemos visto los conceptos de PBN y conocemos EGNOS nos preguntamos cómo poder materializarlos y elaborar procedimientos que utilicen dichas herramientas, cumpliendo los estándares establecidos.

²Lo que se quiere decir en este apartado es que, mientras que la corrección del error ionosférico se realiza mediante la modelización dinámica en tiempo real de la ionosfera mediante los IGP, las correcciones relativas al error troposférico se obtienen mediante un modelo estático, donde las correcciones se encuentran tabuladas y dependen de la posición del usuario. Lo mismo ocurre con el efecto multicamino.

La OACI establece unas pautas para la implementación que sirven como referencia para todos los estados, pero en este caso nos centraremos en la implementación de aproximaciones en aeropuerto usando EGNOS, que por supuesto debe cumplir los requisitos impuestos por la OACI.

Mediante el servicio SoL se pretende garantizar el cumplimiento de los estándares proporcionando la seguridad necesaria en operaciones en aproximación y aterrizaje, al tiempo que se busca el aumento de productividad del propio aeropuerto. Los procedimientos que se pretenden validar/implementar son de tipo APV y LPV³.

Procedimiento de aproximación		Tipo de navegación	
		Convencional	RNAV
No Precisión	NPA	NDB	DME/DME
		VOR	GNSS Básico
		LOC	
Con guiado vertical	APV-I	–	Guiado Lateral: NPA Guiado Vertical: Baro, SBAS
	APV-II	–	SBAS GBAS
Precisión	PA-I	ILS	SBAS
	PA-II	MLS	GBAS
	PA-III	ILS	GBAS

Tabla 5.3: Procedimientos de aproximación instrumental.

En los procedimientos LPV y APV la tripulación tiene disponible un sistema de guiado geométrico para realizar su trayectoria de aproximación. Mediante la utilización de EGNOS, las alturas de decisión pueden ser más bajas y además se puede mejorar el alineamiento con la pista. Esto supondría un aumento de la capacidad operacional del aeropuerto al incrementar el número de llegadas, agilizando los aterrizajes para evitar retrasos al tiempo que se consigue una mayor rentabilidad del mismo.

Para la implantación de operaciones LPV y APV:

- Se necesita un certificado expedido por la EGNOS Service Provider (ESSP) que es un proveedor de servicios de navegación aérea (ANSP) definido en el marco del Cielo Único Europeo (SESAR⁴).
- Los equipos embarcados necesarios con receptor SBAS certificado para así poder garantizar que su uso permite conseguir las prestaciones de un sistema de navegación aérea.
- Certificación de los procedimientos de aproximación APV. Mediante un proceso de validación previo, como el que se presenta en este TFG (ver Página 61), se permite comprobar que los requerimientos se cumplen en la zona de vuelo, para el posterior diseño de procedimientos.

Para conseguir la certificación de aeronavegabilidad expedido por la EASA y la aprobación de las operaciones se debe llevar a cabo un proceso de certificación para cada pista de un aeródromo.

En el presente TFG se pretende validar un procedimiento GNSS en el aeródromo de Casinos con aproximaciones de tipo APV-I. Actualmente, en España, solo existen dos aeropuertos con procedimientos GNSS certificados y en funcionamiento, Santander y Málaga. Las ventajas de implementar

³APV se corresponde con una aproximación de no precisión pero con guiado vertical, y LPV se corresponde con una aproximación de precisión (PA) con guiado vertical con prestaciones análogas al ILS

⁴El Single European Sky ATM Research (SESAR) es un proyecto que engloba a EUROCONTROL y a muchas empresas relacionadas con el sector aeronáutico con el objeto de crear una red ATM unificada en toda Europa. El proyecto se aprobó debido a la previsión de crecimiento del tráfico aéreo en los próximos años, donde se busca la modernización de los equipos (desarrollo de nuevos sistemas y tecnologías), el intercambio de datos de manera más eficiente y la inclusión de los RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), entre otros aspectos. El plan se ordena en tres fases: definición, desarrollo y despliegue.

este sistema hacen prever que este tipo de aproximaciones pronto se convertirán en una realidad en la mayoría de aeropuertos nacionales.

Parte II

OBTENCIÓN Y TRATAMIENTOS DE DATOS GNSS

Capítulo 6

Formatos

En este capítulo se procede a describir brevemente los formatos y protocolos usados para el tratamiento y transmisión de los datos GNSS.

La elección del formato a usar es función del tipo de receptor GNSS que se está utilizando, así como del formato admitido por el software. En este caso, nos centraremos principalmente en el formato RINEX, que es el que se utilizará en este trabajo, describiéndose asimismo el proceso de tratamiento de los mismos y los programas usados detalladamente a continuación.

6.1. RTCM

El formato RTCM (*Radio Technical Commission for Maritim Services*) es un conjunto de recomendaciones para la transmisión de las correcciones diferenciales al segmento usuario de GPS.

Existen diferentes versiones del formato puesto que se han ido aplicando modificaciones en el mismo. Se trata de un formato inicialmente diseñado para el uso en navegación marítima y terrestre, con envío de correcciones a nivel local y con requerimientos en tiempo real.

Este formato de datos se usa en la transmisión de las correcciones diferenciales como estándar en todos los receptores de GPS.

6.2. NTRIP

El protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Intenet Protocol*) es un protocolo de transmisión de datos encapsulados a través de Internet. Los datos de las correcciones diferenciales son encapsulados y enviados mediante telefonía móvil.

6.3. RTCA

El formato RTCA (*Radio Technical Commission for Aeronautics*) fue ideado para la transmisión de las correcciones en sistemas locales con requerimientos de tiempo real, como es el caso de la aviación, donde se utiliza como estándar de transmisión.

Además, cabe apuntar que EGNOS utiliza las recomendaciones proporcionadas por RTCA expuestas en el documento RTCA/DO-229C, y que el procesamiento de los mensajes es bastante complejo debido a ciertas peculiaridades.

6.4. NMEA

El formato NMEA (*National Marine Electronics Association*) es un estándar concebido para la comunicación de datos sorteando incompatibilidades como el ritmo de los datos y el formato de

los mensajes entre dispositivos electrónicos marítimos. El interés en nuestro caso es su uso en la transmisión de datos entre receptores GNSS y otros dispositivos.

Posee diferentes actualizaciones. El estándar define una interfaz eléctrica y un protocolo de comunicación. La codificación de la información se encuentra organizada en bloques transmitidas en código ASCII (estándar NMEA-0183 usado en GPS).

6.5. RINEX

El formato RINEX (*Receiver Independent Exchange*) es el utilizado en el intercambio de información GPS, donde cada fichero contiene los datos almacenados por una estación receptora de GPS durante una sesión (período y frecuencia de recepción de datos). Se utiliza para post-procesado.

El formato fue creado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna a finales de los años 80 con el propósito de intercambiar los datos recibidos los diferentes tipos de receptores GNSS (al principio el GPS americano, y con el paso del tiempo se han sumado GLONASS y Galileo en las nuevas versiones) sin modificar la estructura del formato. Con el uso del formato ASCII se garantiza que cualquier software sea capaz de leerlos.

Existen diferentes versiones de RINEX, empezando por RINEX Version 1, seguida por RINEX Version 2 que a su vez ha contado con diferentes subversiones. En el presente trabajo los archivos de navegación y observables están en versión RINEX 2.11, la más común actualmente, que como novedad permite almacenar tanto medidas Doppler como medidas de pseudorángos en portadora de fase. Estas medidas pueden provenir de GPS, GLONASS y asimismo de sistemas de aumentación como EGNOS o WAAS.

El formato RINEX, que se encuentra organizado en ficheros con encabezado y datos, presenta tres tipos ficheros:

- Ficheros de observación.
- Ficheros de navegación (GPS, GLONASS).
- Ficheros con datos meteorológicos.

De éstos, nos interesan los ficheros de observación y los de navegación, que son los necesarios para la simulación, junto con los ficheros SBAS.

Los nombres de los ficheros RINEX¹ vienen determinados por la siguiente convención recomendada:

ssssdddf.yyt

Donde:

- **t** representa el tipo de archivo:
 - O: fichero de observación.
 - N: fichero mensaje de navegación GPS.
 - M: fichero de datos meteorológicos.
 - G: fichero mensaje de navegación GLONASS.
 - L: fichero mensaje de navegación Galileo.
 - P: fichero mensaje de navegación mixto.
 - H: fichero mensaje de navegación de carga útil SBAS.
 - B: fichero de emisión de datos SBAS.
 - C: fichero de reloj.
 - S: fichero resumen.

¹Existen ficheros de 15 minutos o de todo el día, y éstos últimos son los de interés para este trabajo.

- **yy** representa las dos últimas cifras del año de observación, por ejemplo, si es 2017 se coge 17.
- **f** es una letra de la a a la x (sin pasar por la ñ) que representa la franja horaria de los datos recibidos.
 - A: 00:00:00 - 00:59:59.
 - B: 01:00:00 - 01:59:59.
 - ⋮
 - W: 22:00:00 - 22:59:59.
 - X: 23:00:00 - 23:59:59.
- **ddd** representa el día de observación del año con respecto al primero de enero, esto es:
 - 001: 1 de enero.
 - 211: 30 de julio.
 - 365: 31 de diciembre.
- **ssss** representa la estación de recepción de datos. En el caso de interés es VALE.

6.5.1. Ficheros de observación.

Los ficheros de observación RINEX están divididos en una cabecera y una sección con los datos. La cabecera es similar en todos los ficheros y contiene información relativa a la versión que se está usando, el sistema de navegación usado, la identificación de la institución que crea el fichero, información relativa a la antena receptora, etc.

En principio, cada fichero de observación es independiente al contener la información de una sola sesión (la frecuencia de toma de datos es variable) en una sola estación, pero estos pueden ser concatenados mediante la utilización del software adecuado para juntar información de varias estaciones, varias épocas o ambas cosas a la vez.

Los ficheros contienen información relativa a los observables, que son tres medidas fundamentales, más una cuarta incluida en esta versión, y que se definen según [30]:

- El **tiempo** que se mide es el tiempo del receptor de las señales. Éste es el mismo tiempo para las medias de fase y pseudo-rango, y también idéntico para todos los satélites que se observan en cada época.
Se expresa en tiempo del sistema GNSS utilizado, no en UTC, y en caso de usar varios sistemas simultáneamente, el tiempo se indica en el encabezado.
- El **pseudo-rango**, PR, es la distancia que existe entre las antenas transmisora del satélite y la receptora de la estación, incluyéndose las desviaciones de los respectivos relojes y otros factores de distorsión, como por ejemplo, los efectos atmosféricos.

$$PR = \text{distancia} + c \left(\begin{array}{ccc} \text{desviación} & - & \text{desviación} & + & \text{otras} \\ \text{reloj receptor} & & \text{reloj satélite} & & \text{distorsiones} \end{array} \right), \quad c \approx 3 \cdot 10^8 m/s$$

- La **fase** se mide en ciclos completos de portadora (frecuencias L1 y L2). Se pueden medir medios ciclos, mediante receptores de tipo cuadrático, con riesgo de aparición de ambigüedades al medir código y fase. La fase es un observable que no se corrige teniendo en cuenta los efectos atmosféricos y otros efectos adversos.
- La **desviación Doppler** es un observable adicional que se define positivo cuando el satélite se aproxima.

Los ficheros de observación presentan la siguiente estructura:

```

VALE211A: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
2.11 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
teqc 20110ct11 IGN-E 20170730 01:02:09UTC PGM / RUN BY / DATE
Linux 2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc -static|Linux x86_64|=+ COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
VALE MARKER NAME
13439M001 MARKER NUMBER
Area de Geodesia Instituto Geografico Nacional OBSERVER / AGENCY
1700071 LEICA GR10 3.11/6.403 REC # / TYPE / VERS
10190012 LEIAR25.R3 LEIT ANT # / TYPE
4929534.0457 -29050.6755 4033709.9250 APPROX POSITION XYZ
3.0390 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
8 L1 L2 L5 C1 C2 P2 S1 S2 # / TYPES OF OBSERV
1.0000 INTERVAL
Forced Modulo Decimation to 1 seconds COMMENT
DefaultJobName COMMENT
DefaultUserDiscription COMMENT
Project creator: COMMENT
SMR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT
teqc edited: all Galileo satellites excluded COMMENT
2017 7 30 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
15 LEAP SECONDS
END OF HEADER
17 7 30 0 0 0.0000000 0 18G02G05G06G07G09G13G20G28G30R01R02R08
R10R11R12R17R18R24
117595216.522 8 91632617.18347 22377621.760
22377614.220 48.400 42.100
110029656.980 8 85737391.477 7 20937942.120 20937937.680
20937936.960 51.250 47.650
128381401.356 7 100037459.115 6 95869242.161 7 24430164.360 24430164.320
24430163.560 43.000 39.950
114476440.878 8 89202451.421 7 21784124.880 21784120.000
21784119.540 51.150 45.250
124668052.404 7 97143987.036 7 93096323.392 8 23723522.820 23723521.120
23723520.660 47.900 43.700
119257577.214 8 92927967.95946 22693956.920
22693951.660 48.450 38.650
127231617.363 7 99141499.23145 24211367.960
24211362.780 43.600 33.700
121222390.744 7 94458997.09346 23067851.200
23067846.100 47.250 37.700

```

Figura 6.1: Fichero de observación VALE211A.170.

En la Figura 6.1 se puede observar que se distinguen dos partes bien diferenciadas, una cabecera de archivo y una estructura de almacenamiento de los datos. La explicación detallada se puede ver en [30].

6.5.2. Ficheros de navegación.

Los ficheros de navegación difieren entre diferentes sistemas de navegación, aunque todos siguen la misma estructura: de nuevo dividida en una cabecera y la recopilación de datos de navegación según se indica en la Figuras 6.2 y 6.3 .

TABLE A3 GPS NAVIGATION MESSAGE FILE - HEADER SECTION DESCRIPTION		
HEADER LABEL (Columns 61-80)	DESCRIPTION	FORMAT
RINEX VERSION / TYPE	- Format version (2.11) - File type ('N' for Navigation data)	F9.2,11X, A1,19X
PGM / RUN BY / DATE	- Name of program creating current file - Name of agency creating current file - Date of file creation	A20, A20, A20
* COMMENT	Comment line(s)	A60
* ION ALPHA	Ionosphere parameters A0-A3 of almanac (page 18 of subframe 4)	2X,4D12.4
* ION BETA	Ionosphere parameters B0-B3 of almanac	2X,4D12.4
* DELTA-UTC: A0,A1,T,W	Almanac parameters to compute time in UTC (page 18 of subframe 4) A0,A1: terms of polynomial T : reference time for UTC data W : UTC reference week number. Continuous number, not mod(1024)!	3X,2D19.12, 2I9)
* LEAP SECONDS	Delta time due to leap seconds	I6
END OF HEADER	Last record in the header section.	60X

Records marked with * are optional

Figura 6.2: Estructura de la cabecera de navegación.

TABLE A4 GPS NAVIGATION MESSAGE FILE - DATA RECORD DESCRIPTION		
OBS. RECORD	DESCRIPTION	FORMAT
PRN / EPOCH / SV CLK	<ul style="list-style-type: none"> - Satellite PRN number - Epoch: Toc - Time of Clock year (2 digits, padded with 0 if necessary) month day hour minute second - SV clock bias (seconds) - SV clock drift (sec/sec) - SV clock drift rate (sec/sec²) 	I2, 1X,I2.2, 1X,I2, 1X,I2, 1X,I2, 1X,I2, F5.1, 3D19.12 *)
BROADCAST ORBIT - 1	<ul style="list-style-type: none"> - IODE Issue of Data, Ephemeris - Crs (meters) - Delta n (radians/sec) - M0 (radians) 	3X,4D19.12
BROADCAST ORBIT - 2	<ul style="list-style-type: none"> - Cuc (radians) - e Eccentricity - Cus (radians) - sqrt(A) (sqrt(m)) 	3X,4D19.12
BROADCAST ORBIT - 3	<ul style="list-style-type: none"> - Toe Time of Ephemeris (sec of GPS week) - Cic (radians) - OMEGA (radians) - CIS (radians) 	3X,4D19.12
BROADCAST ORBIT - 4	<ul style="list-style-type: none"> - i0 (radians) - Crs (meters) - omega (radians) - OMEGA DOT (radians/sec) 	3X,4D19.12
BROADCAST ORBIT - 5	<ul style="list-style-type: none"> - IDOT (radians/sec) - Codes on L2 channel - GPS Week # (to go with TOE) Continuous number, not mod(1024)! - L2 P data flag 	3X,4D19.12
BROADCAST ORBIT - 6	<ul style="list-style-type: none"> - SV accuracy (meters) - SV health (bits 17-22 w 3 sf 1) - TGD (seconds) - IODC Issue of Data, Clock 	3X,4D19.12
BROADCAST ORBIT - 7	<ul style="list-style-type: none"> - Transmission time of message (**) (sec of GPS week, derived e.g. from Z-count in Hand Over Word (HOW)) - Fit interval (hours) (see ICD-GPS-200, 20.3.4.4) Zero if not known - spare - spare 	3X,4D19.12

Figura 6.3: Estructura de los datos de navegación.

En estos ficheros encontramos información relativa a parámetros del reloj atómico y correcciones temporales, precisión de la medida de pseudo-rangos, los datos de las efemérides, parámetros del modelo ionosférico, etc. Un ejemplo de fichero de navegación se muestra en la Figura 6.4.

```

VALE2110: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
  2.11          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
teqc 2017Jul3          20170803 18:39:47UTC PGM / RUN BY / DATE
Linux2.6.32-573.12.1.el6.x86_64|x86_64|gcc|win64-MinGW64|=+ COMMENT
  2.10          N: GPS NAV DATA          COMMENT
teqc 2011Oct11      IGN-E          20170730 01:02:09UTC COMMENT
Linux 2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc -static|Linux x86_64|=+ COMMENT
          END OF HEADER
1 17 7 29 22 0 0.0 5.658855661750D-05-3.410605131648D-13 0.000000000000D+00
3.300000000000D+01-1.618750000000D+01 4.664479913430D-09-2.684098400775D+00
-9.890645742416D-07 6.929675699212D-03 5.824491381645D-06 5.153680633545D+03
5.976000000000D+05 3.539025783539D-08 2.761721226123D+00-1.750886440277D-07
9.683122733843D-01 2.727812500000D+02 5.932398448093D-01-8.107480908848D-09
2.121516989861D-10 1.000000000000D+00 1.959000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 5.587935447693D-09 3.300000000000D+01
0.000000000000D+00
2 17 7 30 0 0 0.0 3.659506328404D-04-8.526512829121D-12 0.000000000000D+00
8.000000000000D+01-7.843750000000D+00 5.172715589197D-09-1.296463326421D+00
2.980232238770D-08 1.696026232094D-02 5.567446351051D-06 5.153551525116D+03
0.000000000000D+00 2.291053533554D-07 2.586535160829D+00 3.594905138016D-07
9.472414268761D-01 2.630937500000D+02-1.967480998601D+00-8.433922893403D-09
2.764400930388D-10 1.000000000000D+00 1.960000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-2.048909664154D-08 8.000000000000D+01
0.000000000000D+00
3 17 7 30 0 0 0.0-8.330866694450D-05 3.410605131648D-12 0.000000000000D+00
5.900000000000D+01-4.065625000000D+01 4.701624423120D-09-2.397407138065D+00
-2.153217792511D-06 8.534711087123D-04 8.445233106613D-06 5.153691301346D+03
0.000000000000D+00-3.725290298462D-08-2.599812454636D+00-1.043081283569D-07
9.601899795839D-01 2.150000000000D+02 2.273756589946D-01-8.107837956572D-09
-1.475061461864D-10 1.000000000000D+00 1.960000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 2.328306436539D-09 5.900000000000D+01
0.000000000000D+00
4 17 7 29 17 59 44.0 2.936925739050D-06 4.661160346586D-12 0.000000000000D+00
3.500000000000D+01 1.100000000000D+01 4.559118416125D-09-2.380156086232D+00
2.831220626831D-07 1.228432392236D-02 9.242445230484D-06 5.153669843674D+03
5.831840000000D+05 1.117587089539D-08 1.615581754162D+00-2.533197402954D-07
9.564873880532D-01 1.991875000000D+02 4.258154610831D-01-8.029262588138D-09
3.135844917068D-10 1.000000000000D+00 1.959000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 1.000000000000D+00-5.587935447693D-09 3.500000000000D+01
0.000000000000D+00
5 17 7 30 0 0 0.0-3.528594970703D-05 1.477928890381D-12 0.000000000000D+00
1.900000000000D+01-3.796875000000D+01 5.133427904980D-09 1.299955428910D+00
-1.743435859680D-06 5.120682064444D-03 8.501112461090D-06 5.153796369553D+03

```

Figura 6.4: Fichero de navegación VALE2110.170.

Capítulo 7

Obtención de datos

Una vez explicados los diferentes formatos y protocolos se va a explicar cómo se han obtenido los datos. Cabe apuntar que este proceso se ha realizado después de una fase inicial de validación, marcado por la OACI, como se describe en el Capítulo 9 (ver Página 61).

A nivel internacional existe un organismo integrado por diferentes agencias y organismos que son proveedores de recursos y datos GNSS en el mundo, esta es la *International GNSS Service* (IGS). En España, el organismo proveedor es el Instituto Geográfico Nacional (IGN) que tiene desplegado un conjunto de estaciones receptoras de datos GNSS por todo el territorio nacional. Esta red sirve de referencia para el acceso al sistema ETRS89. Los objetivos de la red se sintetizan en (ver [31]):

- Obtención de coordenadas muy precisas y campo de velocidades en los puntos de la red.
- Contribución a la definición de los nuevos Sistemas de Referencia Globales (ITRF) en el territorio nacional.
- Ser puntos fundamentales de la Red Europea EUREF de estaciones permanentes (EPN) para la densificación de los marcos globales y definición del sistema ETRS89.
- Utilización de los registros de datos continuos para estudios de troposfera, ionosfera, meteorología, geodinámica, etc.
- Definir una red fundamental como apoyo para aplicaciones en tiempo real de correcciones diferenciales (DGNSS) y RTK.
- Proporcionar a los usuarios de GNSS, públicamente, los datos para trabajos geodésicos, cartográficos, topográficos y de posicionamiento en general.

Existen acuerdos de colaboración con instituciones pertenecientes a las Comunidades Autónomas y Puertos del Estado para poder mejorar la eficiencia en el gasto y optimizar la densidad del sistema. Dichas instituciones proporcionan servicios de post-proceso (ficheros en formato RINEX procedentes de las estaciones con diferentes intervalos) y servicios de posicionamiento en tiempo real mediante conexión a Internet con los servidores del IGN.

La obtención de los ficheros RINEX se puede realizar mediante tres vías, tal y como se describe en [31]: a través de un servidor FTP (*File Transfer Protocol*), a través de la página web en la extensión «Datos Geodésicos» o mediante el Programa de Aplicaciones Geodésicas (PAG). Éste último método ha sido el elegido para la obtención de los ficheros de navegación y los observables.

La estación receptora utilizada ha sido la de Valencia, que posee el código VALE, y que presenta las características descritas en la Figura 7.1. Se ha elegido esta por ser la más cercana al aeródromo de Casinos (Valencia), al no haber una estación en el mismo, lo que convendría para la realización del estudio de manera rigurosa.

El servidor FTP se ha descartado porque habría que descargar un número de archivos muy elevado y, para más inri, se encuentran desorganizados alfabéticamente, lo cual es bastante poco práctico. Alternativamente, se ha utilizado el PAG, que es un software libre proporcionado por el IGN para descargar los datos GNSS de manera rápida y sencilla. El programa es bastante intuitivo al tener una interfaz (Datos GNSS [Ctrl+D], ver Figura 7.2) en la que se representa un mapa del territorio español con las diferentes estaciones de la red a seleccionar. Además, este posee un calendario para seleccionar la fecha de toma de los datos deseados, y asimismo, pestañas para seleccionar la frecuencia y la franja horaria.

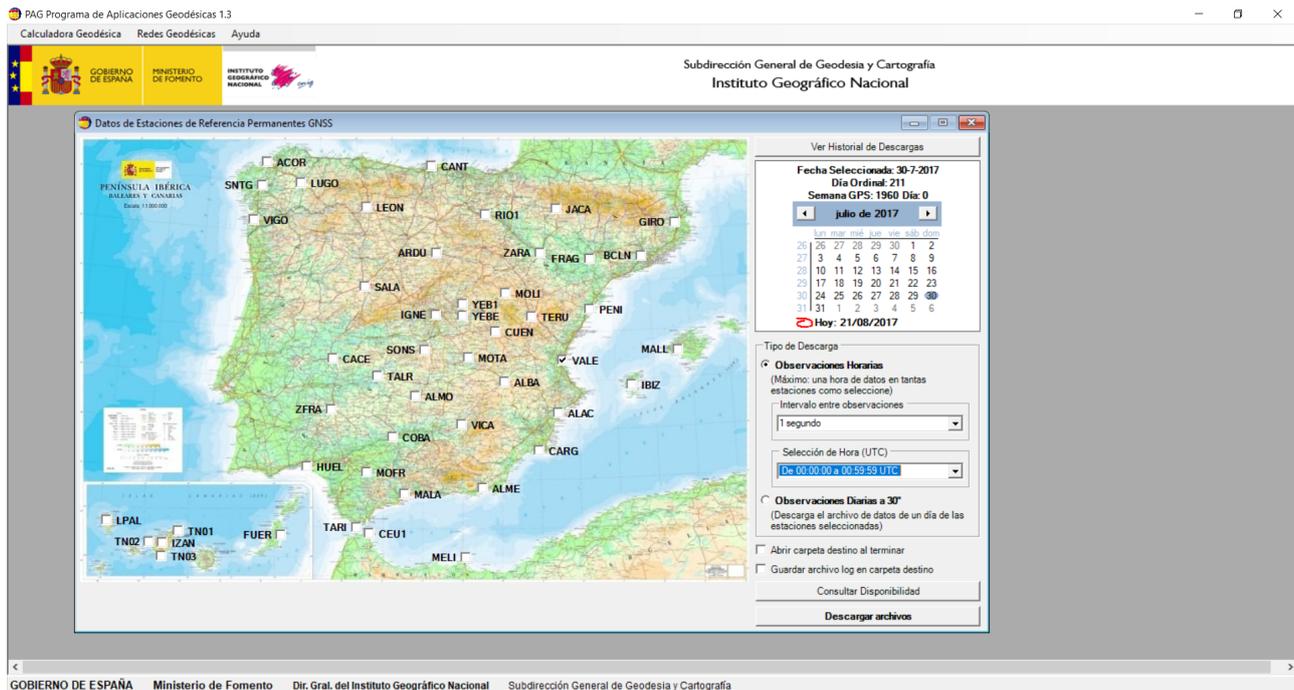


Figura 7.2: Interfaz Datos GNSS en PAG.

En el procedimiento de obtención de datos hemos elegido un intervalo entre observaciones de 1 segundo y hemos ido variando las franjas horarias y los diferentes días, desde el 26 al 30 de julio. Al descargar los archivos hemos obtenidos dos archivos comprimidos con extensión .d y .N, que se corresponden con los archivos de observación en formato comprimido con Hatanaka (ver Página 55) y los de navegación, respectivamente. El posterior tratamiento de estos datos se detalla en el capítulo Software ► Procesado Datos RINEX (ver Página 55).

Una vez que hemos obtenido los datos GNSS en formato RINEX tenemos que conseguir los ficheros SBAS con la información del sistema de aumentación, puesto que ya se ha apuntado que los datos GNSS por sí solos no presentan las prestaciones suficientes para poder servir como sistema de navegación en aeronáutica. Así pues, para conseguir que los requerimientos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad estén dentro del margen permitido para la validación de los procedimientos PBN (APV-I, en el presente caso) se deben obtener los ficheros SBAS correspondientes. Como estamos trabajando en Europa el SBAS a utilizar será EGNOS, y dentro del mismo, existe el sistema EDAS (*EGNOS Data Access System*) donde se encuentran almacenados y a disposición del usuario bajo previa demanda.

El servicio EDAS proporciona datos de interés comercial, SoL, OS, etc. ofrecido por EGNOS y se apoya en el uso de las constelaciones GNSS norteamericana, rusa y europea mediante las estaciones RIMS y NLES. Además, los satélites geostacionarios transmiten mensajes con información de aumentación EGNOS disponible en diferentes formatos usando el estándar RTCM.

La obtención de dichos datos requiere el registro previo en EGNOS Helpdesk con una posterior autorización, mediante la solicitud de un usuario y contraseña. Esto permite acceder al FTP de EDAS donde se encuentran los ficheros SBAS. Y a continuación es necesario instalar el programa WinSCP para poder visualizar los directorios del FTP (ver Figura 7.3). En el directorio se eligen el año y el día (en tiempo GPS) para la simulación. Después se eligen la estación deseada y el formato adecuado. El formato de EDAS elegido es el .b, que son archivos con la información de todo el día.

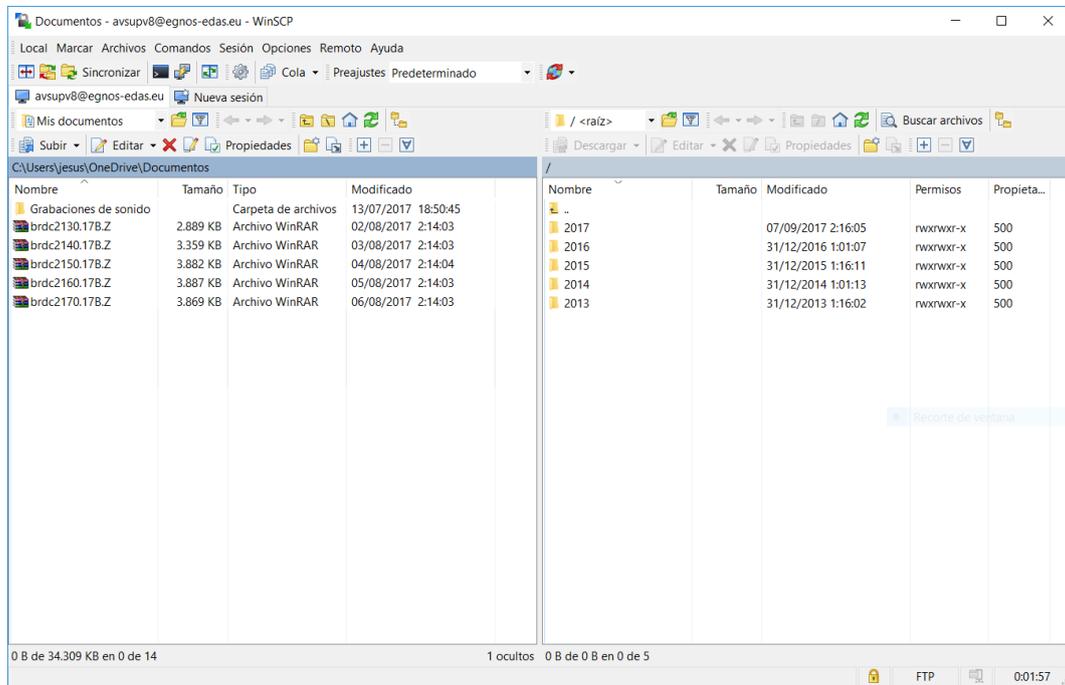


Figura 7.3: WinSCP y FTD de EDAS.

La nomenclatura de interés existente en este FTP sigue esta regla:

brdcddd0.yyB.Z

Donde:

- **ddd** representa el día del año en que se recogieron los datos, interesándonos los días que van del 207 al 211, ambos inclusive.
- **yy** representa los dos últimos dígitos del año de recepción de datos, **2017**.

Para concluir, una vez completado el proceso inicial de obtención de datos se tienen los siguientes ficheros descargados:

- Ficheros de observación: VALE**207/211A/X**.17d.
- Ficheros de navegación: VALE**207/211A/X**.17N.
- Ficheros SBAS: BRDC**207/2110**.17B.

Estos ficheros están preparados para ser tratados con software para ponerlos a punto para el posterior tratamiento que llevará a la conclusión de la validación en su segunda fase de toma de datos a corto plazo. El tratamiento de los mismos se detalla a continuación.

Capítulo 8

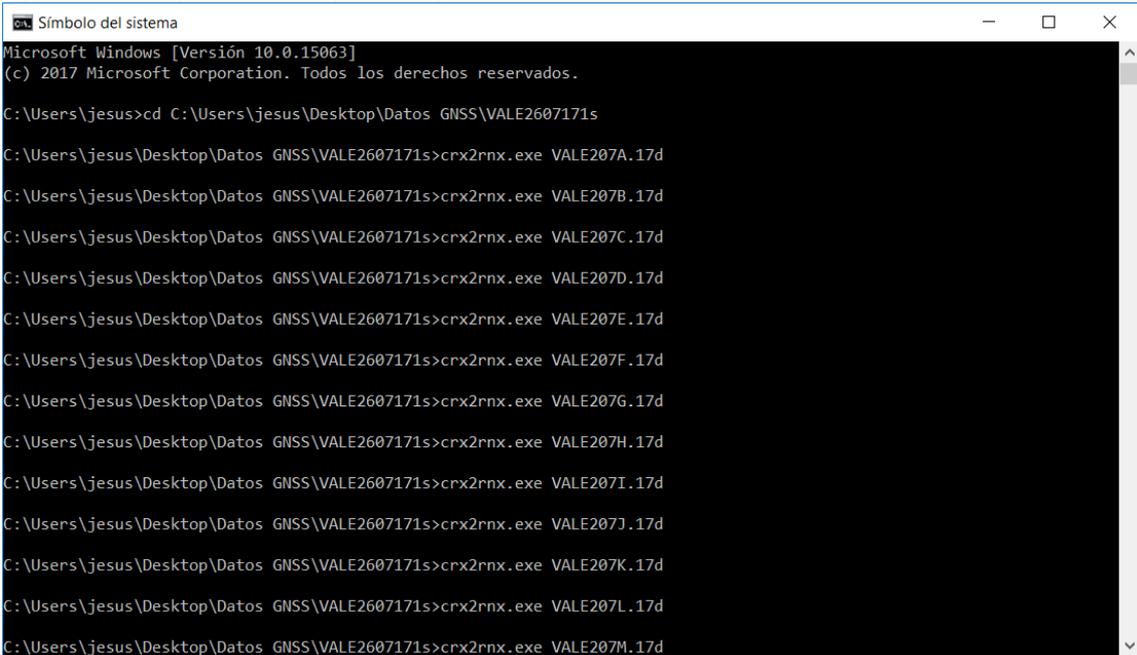
Software

8.1. Procesado datos RINEX

8.1.1. Hatanaka

HATANAKA es una aplicación que permite la compresión y descompresión de los ficheros de observación RINEX aprovechando la estructura de estos, es decir, transforma ficheros de extensión .d a .o y viceversa. El algoritmo de compresión se basa en formar diferencias de tiempo de orden superior en observaciones del mismo tipo y satélite. El programa es un software libre, que se puede conseguir en [32], que utiliza la ventana de comandos pudiéndose aplicar solo dos comandos diferentes: el de compresión (rnx2crx) y el descompresión (crx2rnx).

El procedimiento seguido para poder descomprimir los archivos de los datos de observación .d para pasarlos a formato RINEX .o consistió en poner todos los archivos con extensión .d en una carpeta y en la misma poner la aplicación crx2rnx de Hatanaka y los archivos por lotes CRZ2RNX y CRZ2RNX1. Una vez que tenemos todos los archivos descomprimido de .zip a .d, se pone cd y la ruta de la carpeta donde se encuentran en la ventana de comandos. Se pulsa intro y se selecciona la aplicación **crx2rn** VALE207A.17d y pulsar intro de nuevo. Prácticamente al instante aparece el archivo descomprimido RINEX observable con extensión .o. El proceso se repetirá hasta llegar a la X y para todos los días.



```
Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.15063]
(c) 2017 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\jesus>cd C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s

C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207A.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207B.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207C.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207D.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207E.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207F.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207G.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207H.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207I.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207J.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207K.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207L.17d
C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE2607171s>crx2rnx.exe VALE207M.17d
```

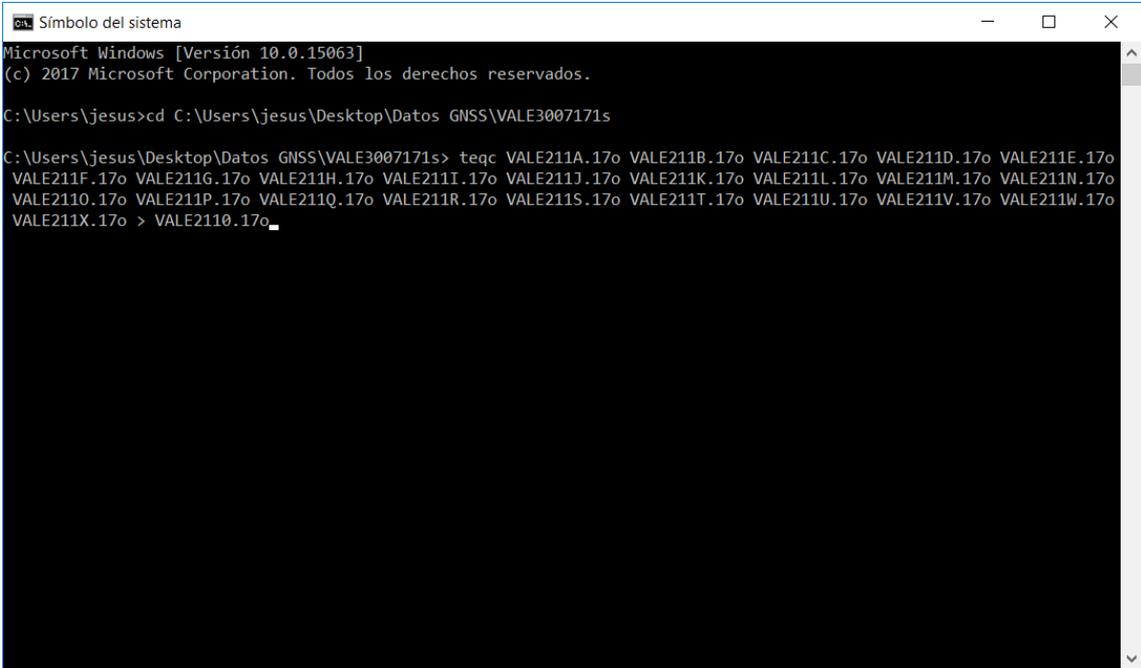
Figura 8.1: Ventana de comandos con Hatanaka

El peso de los archivos habrá aumentado bastante una vez descomprimidos.

8.1.2. TEQC

Una vez que tenemos todos los ficheros RINEX observables con extensión `.O` y `.N` hay que concatenarlos por días y en orden de franjas horarias. Para ello se utiliza la aplicación TEQC (es una aplicación libre que se puede descargar en [34]), que es una herramienta de UNAVCO que permite manipular los archivos RINEX. Existe un archivo tutorial en el que se presenta la diversidad de comandos existentes para poder realizar diferentes acciones. En nuestro caso la función principal es concatenar. Una vez descargada la aplicación se debe ubicar en la carpeta donde se encuentran los ficheros con extensión `.O` y `.N`.

El procedimiento de concatenación (ver Figura 8.2) consiste en ejecutar la ventana de comandos y poner `cd` y la ruta de la carpeta donde se encuentran los archivos. A continuación se presiona `intro`. Después se añade `teqc` y el nombre de todos los archivos `.O` a concatenar de un día separados por espacio normal. Después se añade `>` y el nombre del nuevo archivo concatenado `.O`. De manera análoga se debe hacer con los ficheros de navegación `.N`.



```
Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.15063]
(c) 2017 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\jesus>cd C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE3007171s

C:\Users\jesus\Desktop\Datos GNSS\VALE3007171s> teqc VALE211A.17o VALE211B.17o VALE211C.17o VALE211D.17o VALE211E.17o
VALE211F.17o VALE211G.17o VALE211H.17o VALE211I.17o VALE211J.17o VALE211K.17o VALE211L.17o VALE211M.17o VALE211N.17o
VALE211O.17o VALE211P.17o VALE211Q.17o VALE211R.17o VALE211S.17o VALE211T.17o VALE211U.17o VALE211V.17o VALE211W.17o
VALE211X.17o > VALE2110.17o_
```

Figura 8.2: Ventana de comandos con TEQC

Una vez que se presiona `intro` se ejecuta la aplicación que va uniendo los ficheros al tiempo que aparece en la ventana de comandos los mensajes `! Notice ! splicing RINEX files` tantas veces como ficheros se están concatenando menos una. Al final aparecerá el fichero concatenado.

Al concatenar, aparecen cabeceras entre medias de los datos. Estas pueden ser eliminadas o no, puesto que no afectan en el procesamiento. Además, usando el comando `teqc +qc` se evalúa la calidad del fichero analizado, para ver si existen errores. En la evaluación de los ficheros se ha obtenido que uno de los satélites de GPS no funcionaba correctamente. Sin embargo, el propio programa de procesamiento detectará e ignorará dichos datos.

Así pues, una vez concatenados los ficheros de navegación y de observación se tiene un total de 15 archivos para el procesado, cinco ficheros de navegación, de observación y SBAS de cada uno de los cinco días.

8.2. PEGASUS

PEGASUS es un software desarrollado por EUROCONTROL y que en el proyecto se emplea para el procesado de datos GNSS y ficheros SBAS (también funciona para GBAS) para obtener los valores de los requisitos. Además, se puede utilizar para simulaciones y para el cómputo del error en trayectorias.

El programa tiene una arquitectura modular que sirve para la conversión de los ficheros, el procesamiento de los datos y la obtención de gráficas que sirvan para analizar el resultado del procesamiento. El programa tiene diferentes escenarios que servirían para poder familiarizarnos con su uso, sin embargo, estos tienen fallos y no nos han servido para tal fin. Se ha procedido, por tanto, a utilizarlo directamente obteniendo los datos GNSS y los ficheros de aumentación con la ayuda de los manuales proporcionados por el tutor de TFG.

8.2.1. Módulos

Convertor

La primera fase del procesado consiste en la conversión de los datos (RINEX) a formato ASCII para el eventual análisis. De dicha conversión se encarga el módulo Convertor de PEGASUS.

En este módulo se introducen los ficheros de navegación y observación ya preparados y, asimismo, el fichero de aumentación del mismo día nombrado de igual manera que los anteriores. En los ficheros de entrada, *input files*, se escoge el fichero con extensión .b (SBAS). Una vez completado el proceso se obtendrán los mensajes junto con una serie de archivos, y otro con extensión *cnv.rng* que servirá como entrada para el siguiente módulo.

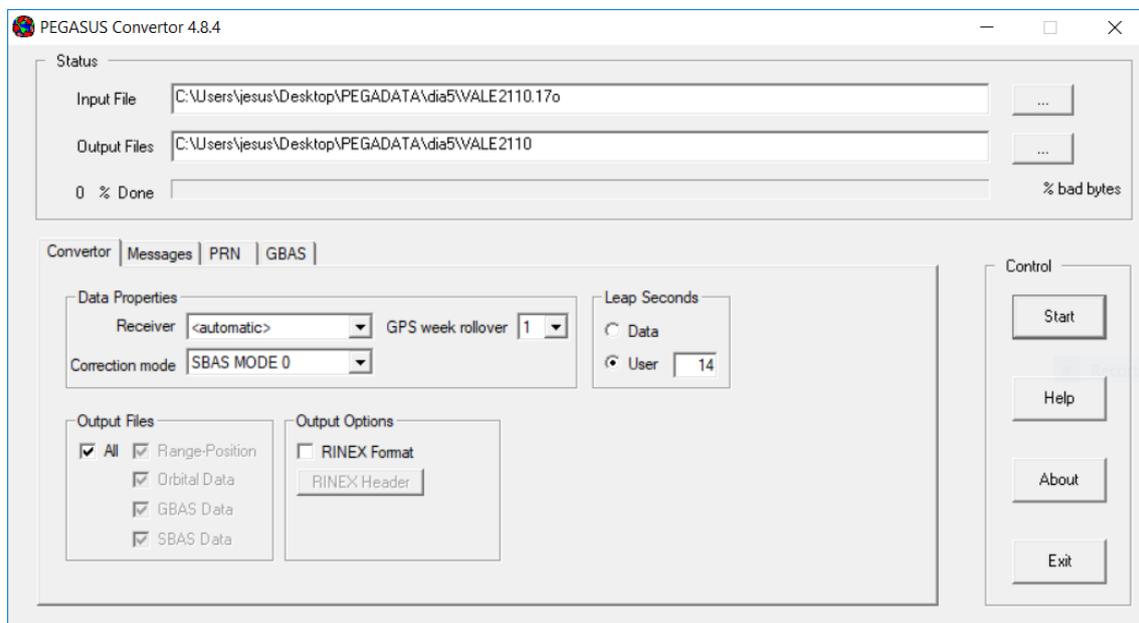


Figura 8.3: Interfaz del módulo Convertor.

GNSS Solution

El procesamiento de los datos como tal lo realiza este módulo de PEGASUS: GNSS Solution. Con este módulo se obtienen la precisión y los ficheros de configuración de los niveles de protección y errores. En dicho módulo se introduce el fichero de extensión ya mencionada. También se debe introducir manualmente las coordenadas de la estación de referencia (Valencia). La ejecución de este

módulo es más lenta al tener que procesar gran cantidad de datos, y además debe ejecutarse una vez por cada día. Para que funcione bien, el programa debe prescindir del almanaque. El resultado de la ejecución es otro archivo de extensión -sol.mif que servirá de entrada en el siguiente módulo de PEGASUS.

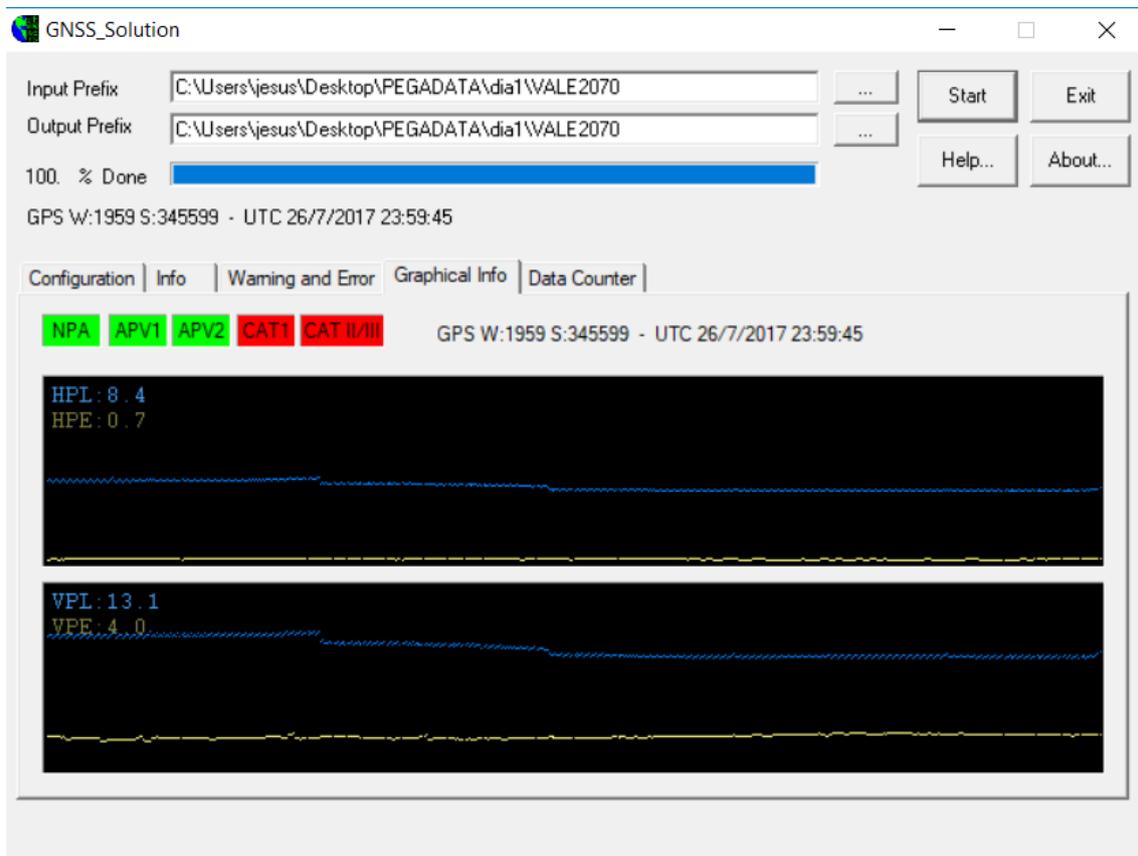


Figura 8.4: GNSS Solution procesando.

MFile Runner

Con MFile Runner de PEGASUS se pueden hacer tangibles los resultados obtenidos al ser representados en gráficas.

Para ver las gráficas, que se representan en Matlab, se debe instalar una extensión llamada mcr 8.2.

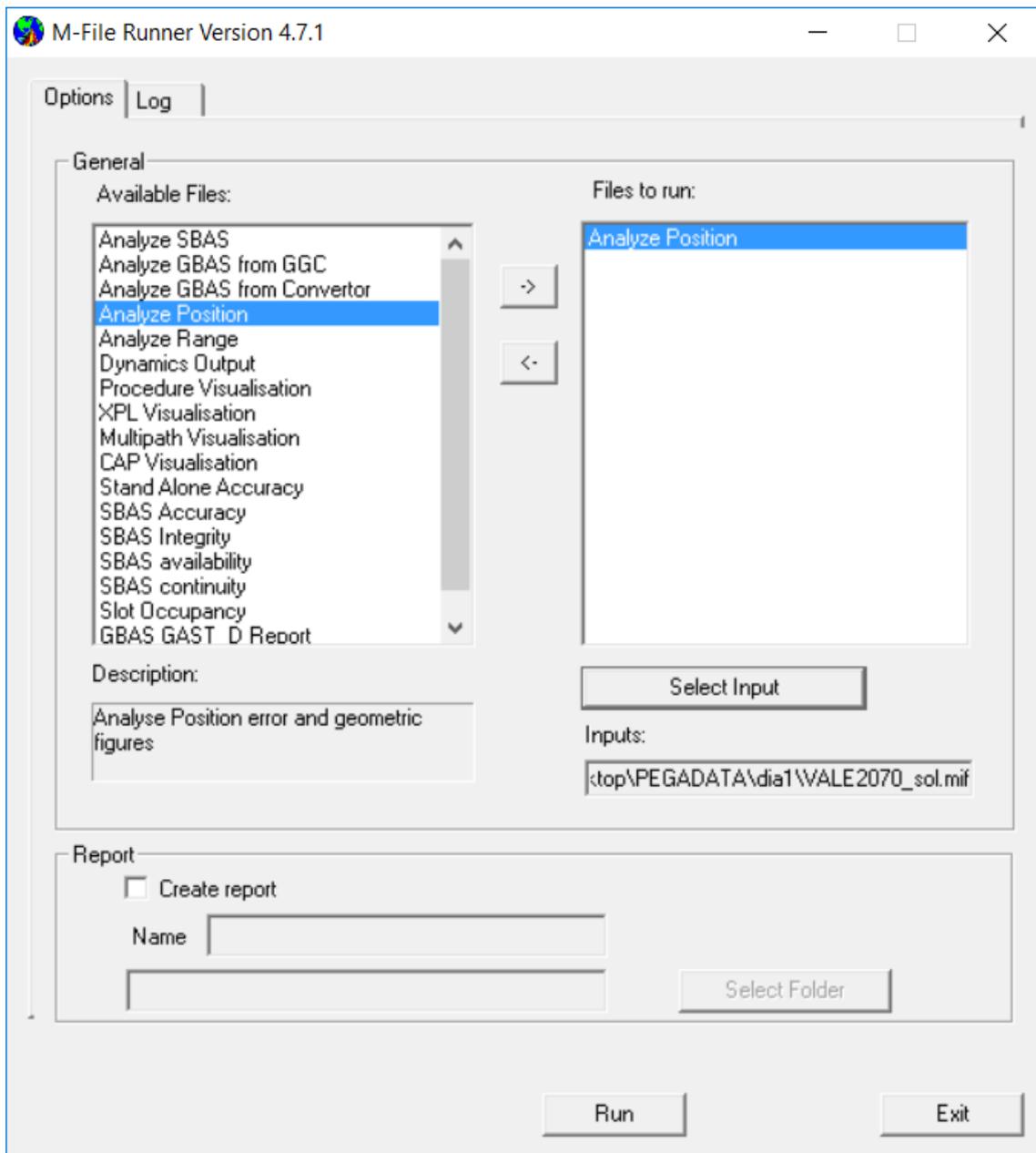


Figura 8.5: Interfaz MFile Runner.

Mediante el uso de las pestañas *Analyze Position*, *SBAS Accuracy*, *SBAS availability* y *SBAS continuity* se obtienen los resultados de la simulación EGNOS mediante gráficas con la integridad (tanto diagramas de Stanford como con el uso de los niveles de protección para horizontal y vertical), y los valores de continuidad, disponibilidad y precisión (en archivos .xml). Todos estos permitirán determinar, mediante la comparación con los valores marcados por la OACI, si se cumplen los requerimientos para poder usar los satélites GNSS con el sistema de aumentación EGNOS como sistema de navegación en el área estudiada para un tipo de procedimientos determinado (APV-I). Los resultados se exponen en la Página 64.

Las pestañas de continuidad y disponibilidad no han funcionado correctamente, al encontrar como error la falta de un archivo que existe, pero no lo detecta. El error no se ha podido subsanar, por lo que para conseguir los valores de los requisitos se ha recurrido a la página web de la ESSP, véase [38], donde se encuentran unos mapas con los valores de continuidad y disponibilidad para los diferentes procedimientos para los días de interés.

Parte III
VALIDACIÓN

Capítulo 9

Validación de procedimientos SBAS

Los procedimientos de navegación basada en prestaciones (PBN) deben pasar por un proceso de validación definido por la OACI. Dicho proceso consta de tres fases: una campaña de toma de datos a largo plazo, toma de datos a corto plazo (campaña de datos sobre el terreno con recepción de datos GNSS en estación) y un ensayo de vuelo (recepción de datos mediante receptor de datos GNSS en dron o aeronave).

9.1. Toma de datos a largo plazo

Como ya se ha apuntado, la primera fase de la campaña consiste en la obtención de los resultados de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad que se proporcionan en la página web de la *European Satellite Services Provider* (ESSP) que publica unos informes mensuales con los resultados del rendimiento del sistema. Estos resultados se deben contrastar con los valores de los requerimientos establecidos, para así constatar que estos se cumplen.

En el caso de este TFG, los seis meses que se han elegido son de Enero de 2017 hasta Junio, para el área de Valencia, teniendo siempre en mente que el aeródromo donde se quiere realizar el estudio es Casinos (Valencia). Los resultados se muestran a continuación de manera separada junto con las conclusiones (cumplimiento o no de los requerimientos).

9.1.1. Resultados disponibilidad

La disponibilidad indica el porcentaje de tiempo que la señal en el espacio está disponible con respecto al tiempo total. Los datos de disponibilidad del sistema EGNOS recogidos en los informes mensuales de la ESSP en el período establecido son los siguientes:

Disponibilidad SIS (%)	Enero 2017	Febrero 2017	Marzo 2017	Abril 2017	Mayo 2017	Junio 2017
PRN 120	99.82	99.99	99.99	99.99	99.85	99.88
OP2*	99.99	100	99.95	99.99	99.99	100
PRN 120 OR OP2	100	100	100	100	100	100
PRN 120 AND OP2	99.82	99.99	99.95	99.99	99.85	99.88

Tabla 9.1: Resultados de disponibilidad de la toma de datos a largo plazo.

*Nótese que OP2 se entiende como PRN 136 SoL mode (hasta 20/03/2017) o PRN 123 SoL mode (a partir de 20/03/2017).

Es inmediato percatarse a través de los datos de que se cumplen los requisitos establecidos por la OACI, puesto que siempre hay disponible uno de los satélites geoestacionarios de EGNOS.

La disponibilidad también está recogida de forma que se expresa el porcentaje de tiempo en el que

se cumplen los requisitos para un determinado tipo de operaciones (LPV-200 y APV-I, siendo este último el de nuestro interés). Esto implica el cumplimiento de los niveles de protección horizontal y vertical durante dicho porcentaje de tiempo. Los resultados obtenidos de mapas de contorno semejantes al de la Figura 9.1 son los siguientes:

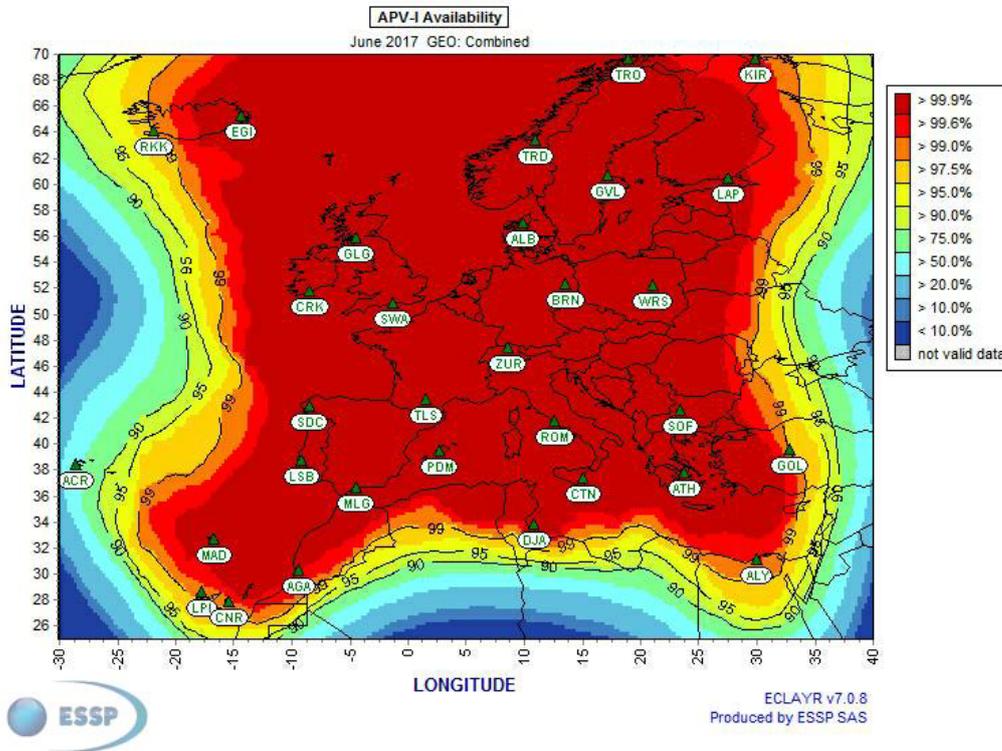


Figura 9.1: Disponibilidad EGNOS APV-I.

Disponibilidad APV-I (%)	Enero 2017	Febrero 2017	Marzo 2017	Abril 2017	Mayo 2017	Junio 2017
HPL<40 m AND VPL<50 m	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9

Tabla 9.2: Resultados de disponibilidad APV-I de la toma de datos a largo plazo.

Se vuelve a ver como se cumplen los requisitos de disponibilidad (ver Tabla 4.1), fila correspondiente a operaciones APV-I).

9.1.2. Resultados precisión

La precisión se expresa como el percentil 95 de los errores de navegación horizontal y vertical cuando el sistema carece de fallos de integridad. Para operaciones APV-1 en la OACI se recogen los valores umbral marcados en la Tabla 4.1. Los resultados del informe se refieren a las estaciones RIMS, y puesto que no hay ninguna en Casinos, nos deberíamos poner en el lado de la seguridad y escoger el valor correspondiente al caso más desfavorable. Teniendo esto en cuenta, se obtienen los siguientes valores de precisión vertical y horizontal:

Precisión APV-I (m)	Enero 2017	Febrero 2017	Marzo 2017	Abril 2017	Mayo 2017	Junio 2017
HNSE 95 %	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
VNSE 95 %	2.2	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2

Tabla 9.3: Resultados de precisión de la toma de datos a largo plazo APV-I.

Como los valores de la tabla no superan los umbrales establecidos por la OACI para el tipo de operaciones bajo estudio, se concluye que el requisito de precisión se cumple.

9.1.3. Resultados continuidad

El análisis de la continuidad del sistema EGNOS para operaciones APV-I consiste en obtener la relación entre el número de eventos (fallos de continuidad) en un período de 15 segundos y el número de muestras totales. Los resultados obtenidos, que se recogen mapas de contorno similares al de la Figura 9.2, se muestran a continuación resumidos en la Tabla 9.4

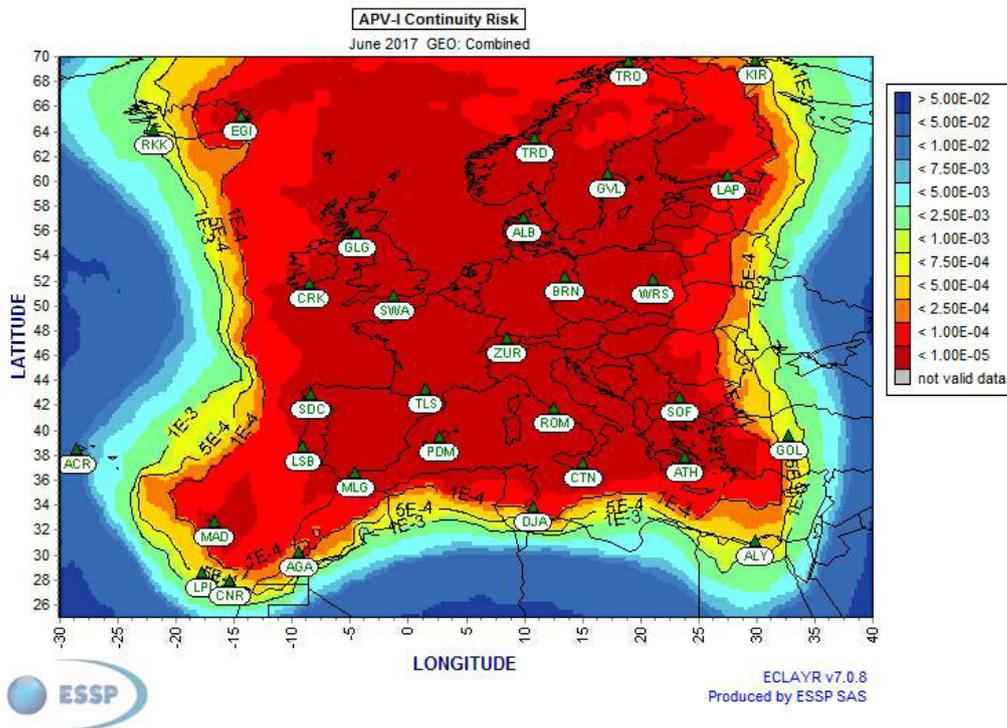


Figura 9.2: Continuidad EGNOS APV-I.

Continuidad (/15s)	Enero 2017	Febrero 2017	Marzo 2017	Abril 2017	Mayo 2017	Junio 2017
Todos los PRNs	$< 1 \times 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-4}$	$< 1 \times 10^{-5}$			

Tabla 9.4: Resultados de continuidad de la toma de datos a largo plazo APV-I.

Los valores de continuidad deben estar comprendidos entre los mencionados en la Tabla 4.1 en la fila de operaciones APV-I. Así pues, se observa fácilmente que este requisito de navegación no se cumple. Sin embargo, como ya se ha apuntado anteriormente, este requisito es más flexible y se permite su incumplimiento siempre que se satisfagan las condiciones adecuadas para poder mitigar los efectos de este fallo.

9.1.4. Resultados integridad

Como ya se ha mencionado anteriormente, la integridad se puede estudiar mediante el cálculo de los índices de seguridad vertical y horizontal, no debiéndose sobrepasar la unidad para poder satisfacer los requisitos establecidos (ver Página 34). Los resultados son los siguientes obtenidos directamente de los histogramas disponibles en los informes:

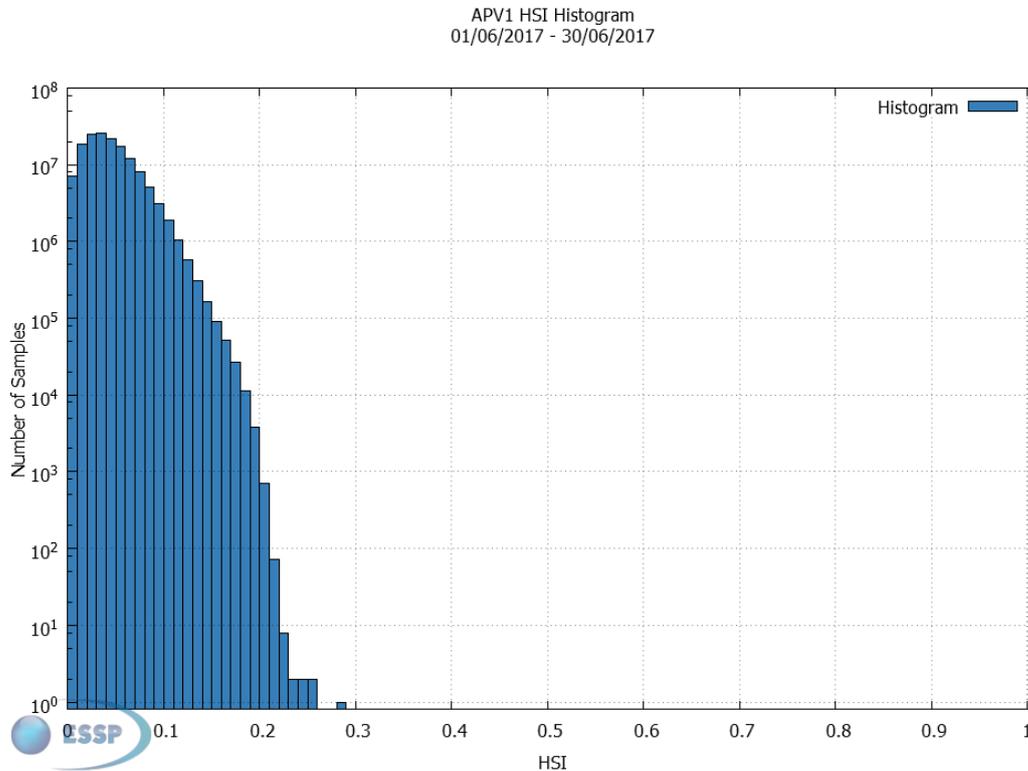


Figura 9.3: Índice de seguridad horizontal EGNOS APV-I Junio 2017.

Integridad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Índices de seguridad	2017	2017	2017	2017	2017	2017
HSI	0.26	0.32	0.26	0.37	0.26	0.29
VSI	0.41	0.43	0.53	0.36	0.31	0.3

Tabla 9.5: Resultados de integridad de la toma de datos a largo plazo APV-I.

Se puede comprobar que no se supera la unidad en ningún caso, cumpliéndose así el requisito de integridad tanto en vertical como en horizontal.

9.2. Toma de datos a corto plazo

Una vez concluido el estudio a largo plazo mediante el uso de los informes proporcionados por la ESSP, ahora se procede a la obtención de los datos GNSS de la estación receptora de Valencia, por ser la más cercana al aeródromo de Casinos. No obstante, lo conveniente sería realizar la toma de datos en una estación que se encontrase justo en el punto donde se realizarán posteriormente las maniobras.

Los datos tomados se corresponden a los datos recibidos por la estación de Valencia durante 5 días (del 26 al 30 de julio de 2017).

Se ha explicado con todo lujo de detalles el procedimiento seguido en los apartados anteriores. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

9.2.1. Resultados disponibilidad

Los resultados de la disponibilidad para los cinco días correspondientes al estudio a corto plazo se muestran debajo.

26 de julio de 2017

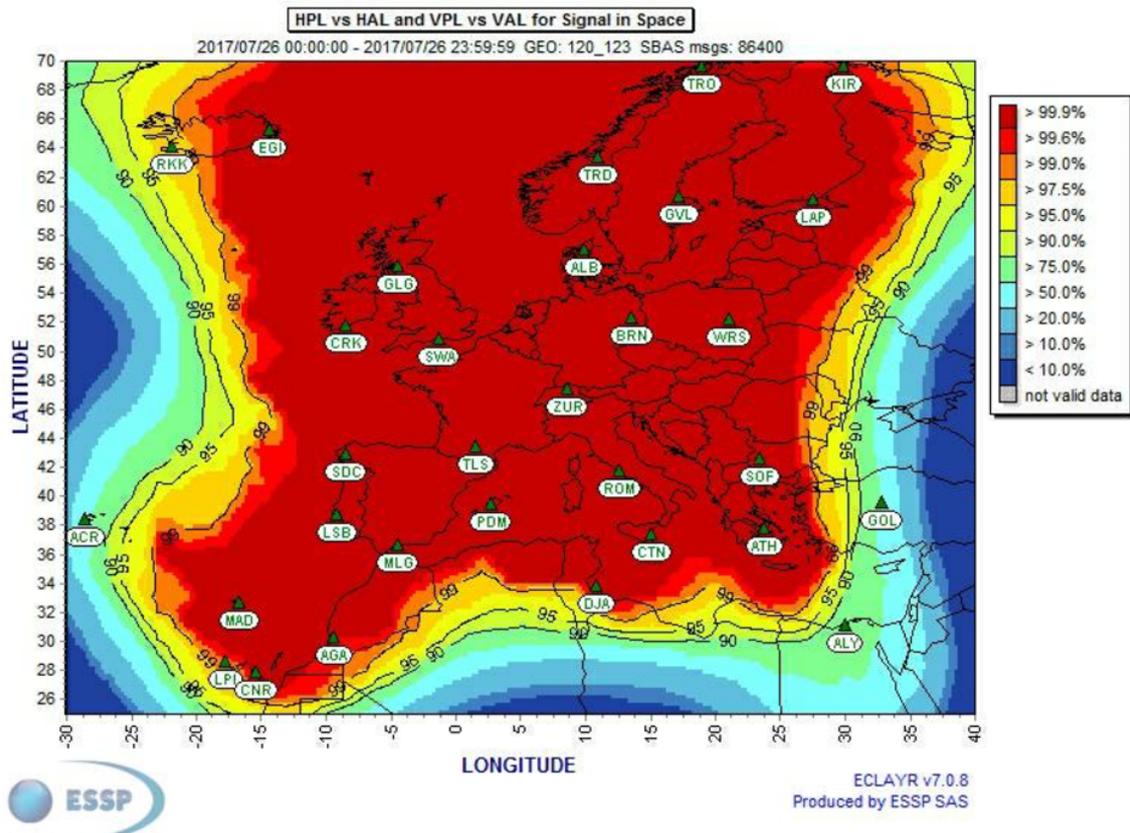


Figura 9.4: Disponibilidad del sistema a 26 de julio de 2017.

27 de julio de 2017

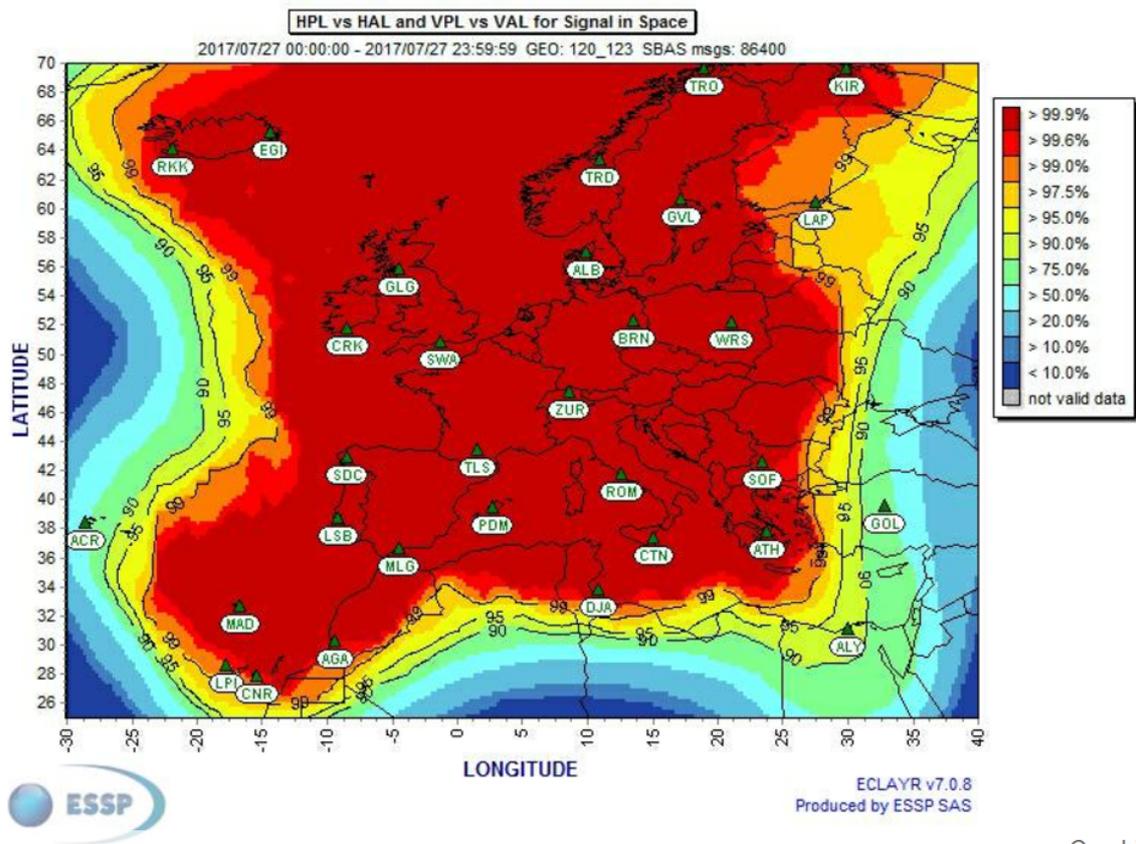
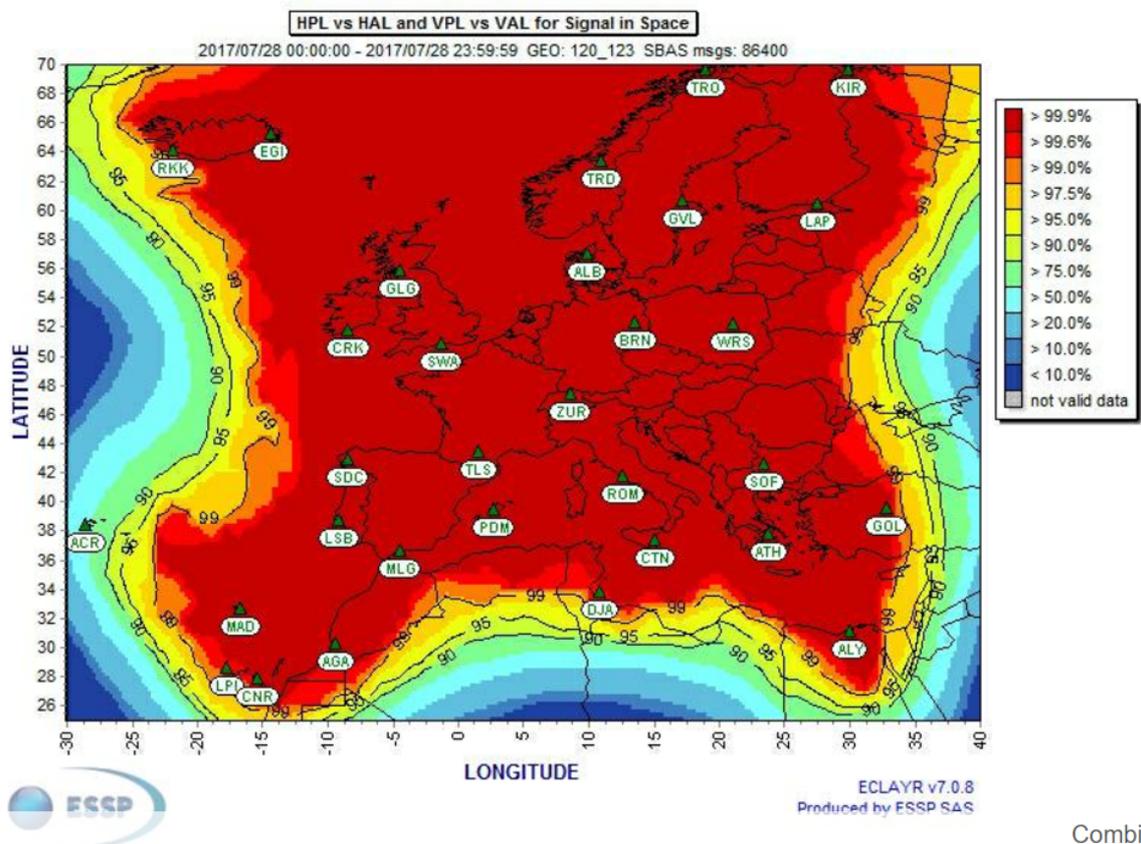


Figura 9.5: Disponibilidad del sistema a 27 de julio de 2017.

28 de julio de 2017



Combir

Figura 9.6: Disponibilidad del sistema a 28 de julio de 2017.

29 de julio de 2017

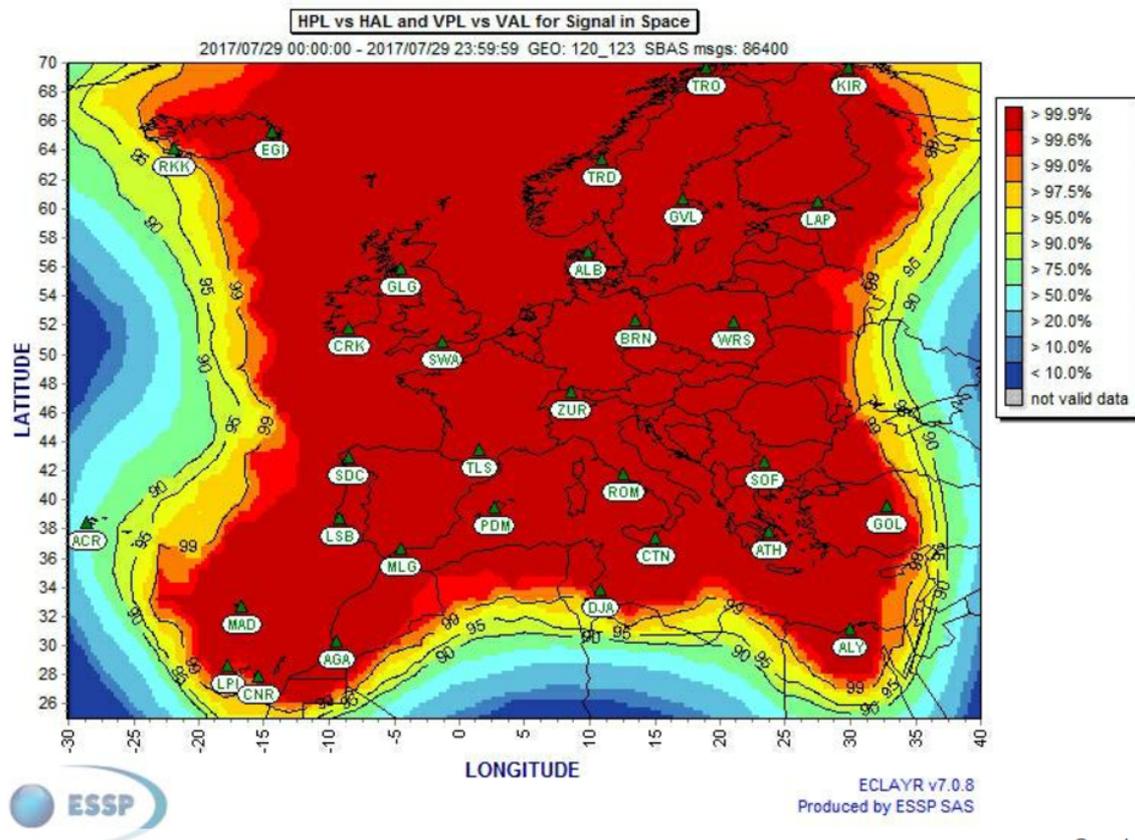


Figura 9.7: Disponibilidad del sistema a 29 de julio de 2017.

30 de julio de 2017

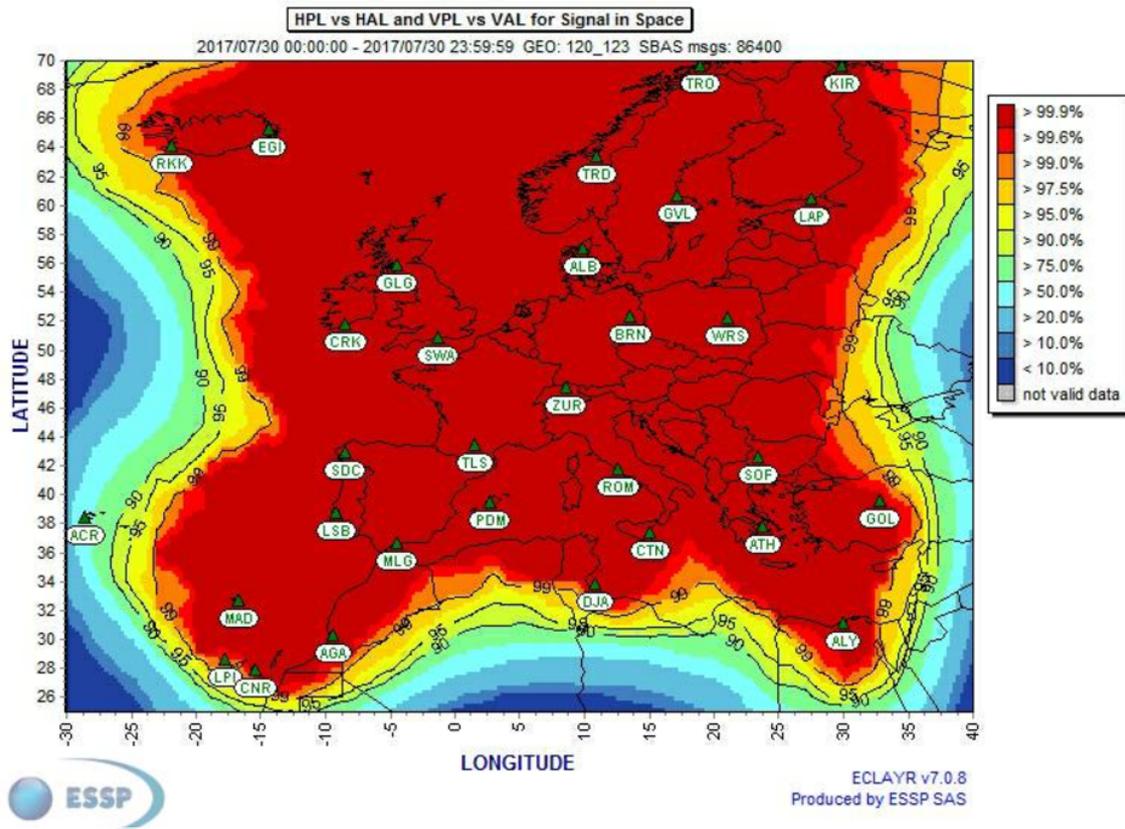


Figura 9.8: Disponibilidad del sistema a 30 de julio de 2017.

Como se puede observar, los valores de disponibilidad en todos los casos superan el 99.9% y por tanto cumplen el requisito de disponibilidad marcado en la Tabla 4.1 de la OACI para las aproximaciones tipo APV-I.

9.2.2. Resultados precisión

Los resultados de la precisión para los cinco días consecutivos del estudio a corto plazo están dispuestos a continuación.

26 de julio de 2017

<name> HNSE </name>	<name> VNSE </name>
<service> APV1 </service>	<service> APV1 </service>
<samples> 86040 </samples>	<samples> 86040 </samples>
<mean> 0.859671 </mean>	<mean> 3.34491 </mean>
<rms> 0.878818 </rms>	<rms> 3.3766 </rms>

Figura 9.9: Valores de precisión del 26 de julio de 2017.

27 de julio de 2017

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>APV1</service></code>	<code><service>APV1</service></code>
<code><samples>86039</samples></code>	<code><samples>86039</samples></code>
<code><mean>0.834278</mean></code>	<code><mean>3.50714</mean></code>
<code><rms>0.860676</rms></code>	<code><rms>3.5411</rms></code>

Figura 9.10: Valores de precisión del 27 de julio de 2017.

28 de julio de 2017

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>APV1</service></code>	<code><service>APV1</service></code>
<code><samples>86040</samples></code>	<code><samples>86040</samples></code>
<code><mean>0.811945</mean></code>	<code><mean>3.40227</mean></code>
<code><rms>0.834884</rms></code>	<code><rms>3.43316</rms></code>

Figura 9.11: Valores de precisión del 28 de julio de 2017.

29 de julio de 2017

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>APV1</service></code>	<code><service>APV1</service></code>
<code><samples>86040</samples></code>	<code><samples>86040</samples></code>
<code><mean>0.834954</mean></code>	<code><mean>3.31701</mean></code>
<code><rms>0.858296</rms></code>	<code><rms>3.34287</rms></code>

Figura 9.12: Valores de precisión del 29 de julio de 2017.

30 de julio de 2017

<code><name>HNSE</name></code>	<code><name>VNSE</name></code>
<code><service>APV1</service></code>	<code><service>APV1</service></code>
<code><samples>86040</samples></code>	<code><samples>86040</samples></code>
<code><mean>0.867091</mean></code>	<code><mean>3.31307</mean></code>
<code><rms>0.894258</rms></code>	<code><rms>3.34598</rms></code>

Figura 9.13: Valores de precisión del 30 de julio de 2017.

Como todos los valores de precisión en horizontal no superan 16 m y los valores en vertical no superan 20 m (ambos marcados en la Tabla 4.1), se puede afirmar que se cumple el criterio de precisión en el estudio a corto plazo.

9.2.3. Resultados continuidad

Los siguientes resultados de continuidad son los obtenidos tras el procesado de los datos GNSS y de aumentación correspondientes al estudio a corto plazo.

26 de julio de 2017

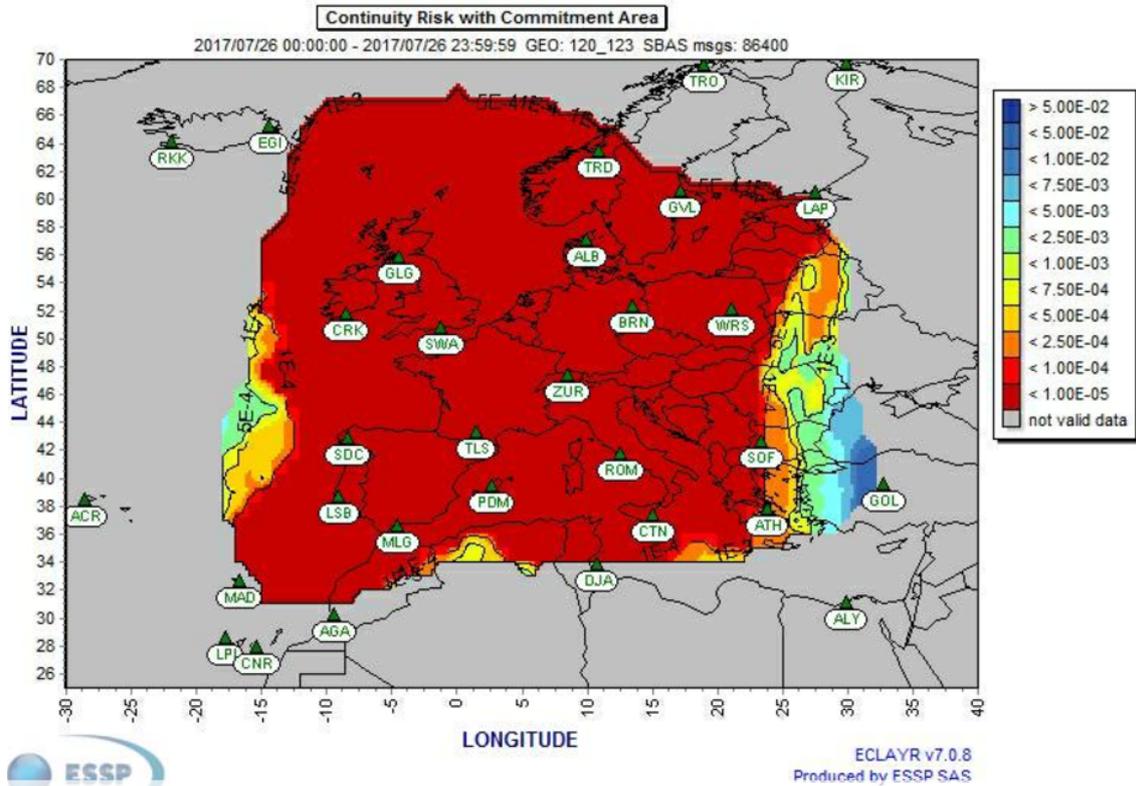


Figura 9.14: Continuidad del sistema a 26 de julio de 2017.

27 de julio de 2017

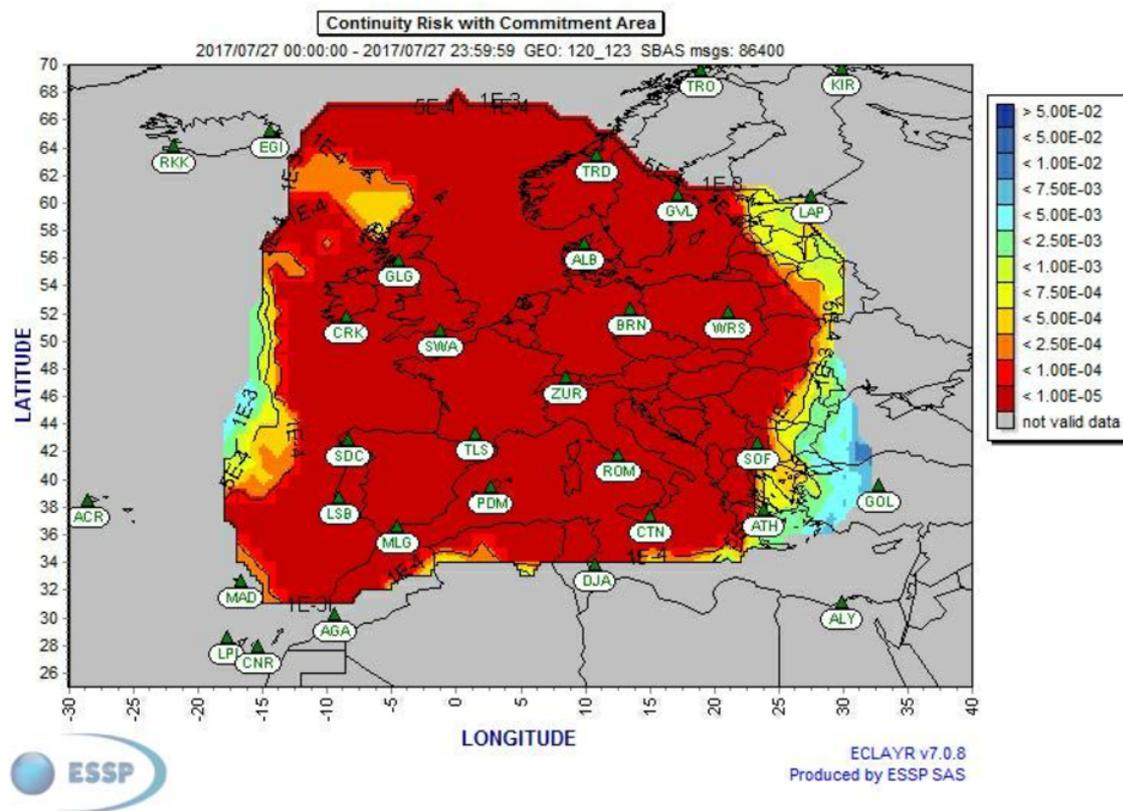


Figura 9.15: Continuidad del sistema a 27 de julio de 2017.

28 de julio de 2017

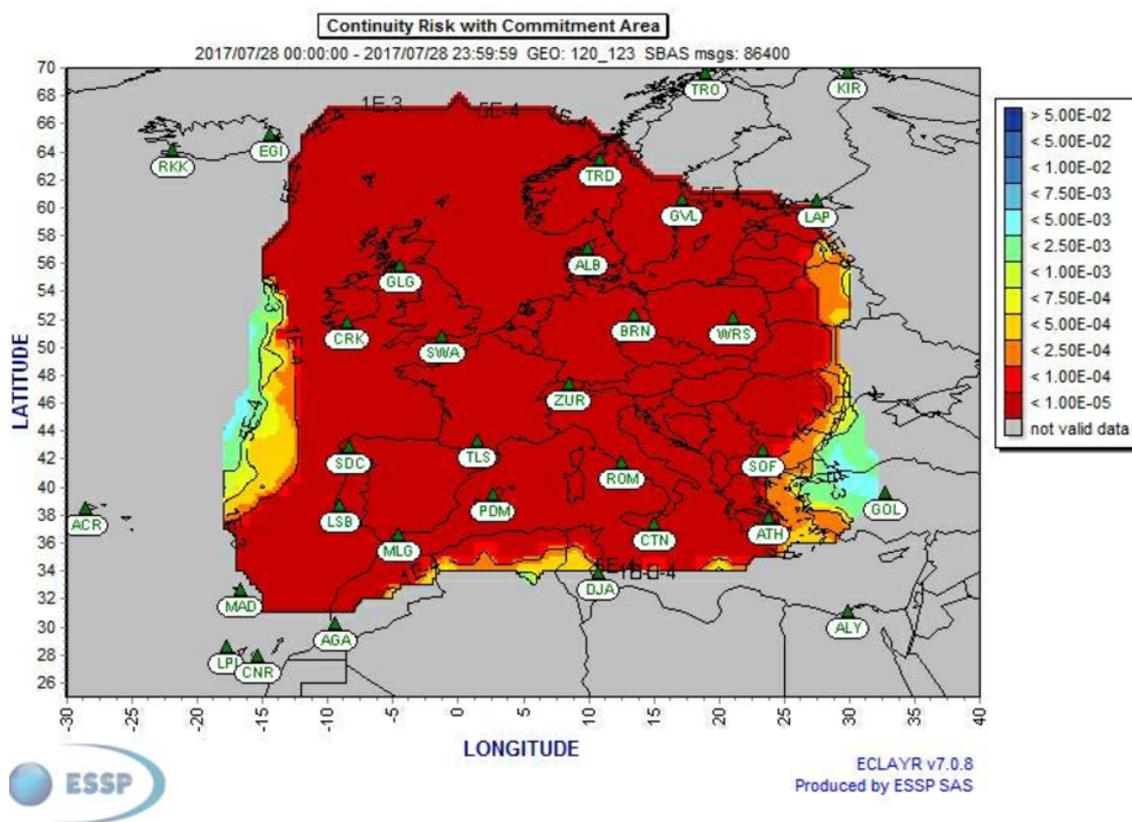


Figura 9.16: Continuidad del sistema a 28 de julio de 2017.

29 de julio de 2017

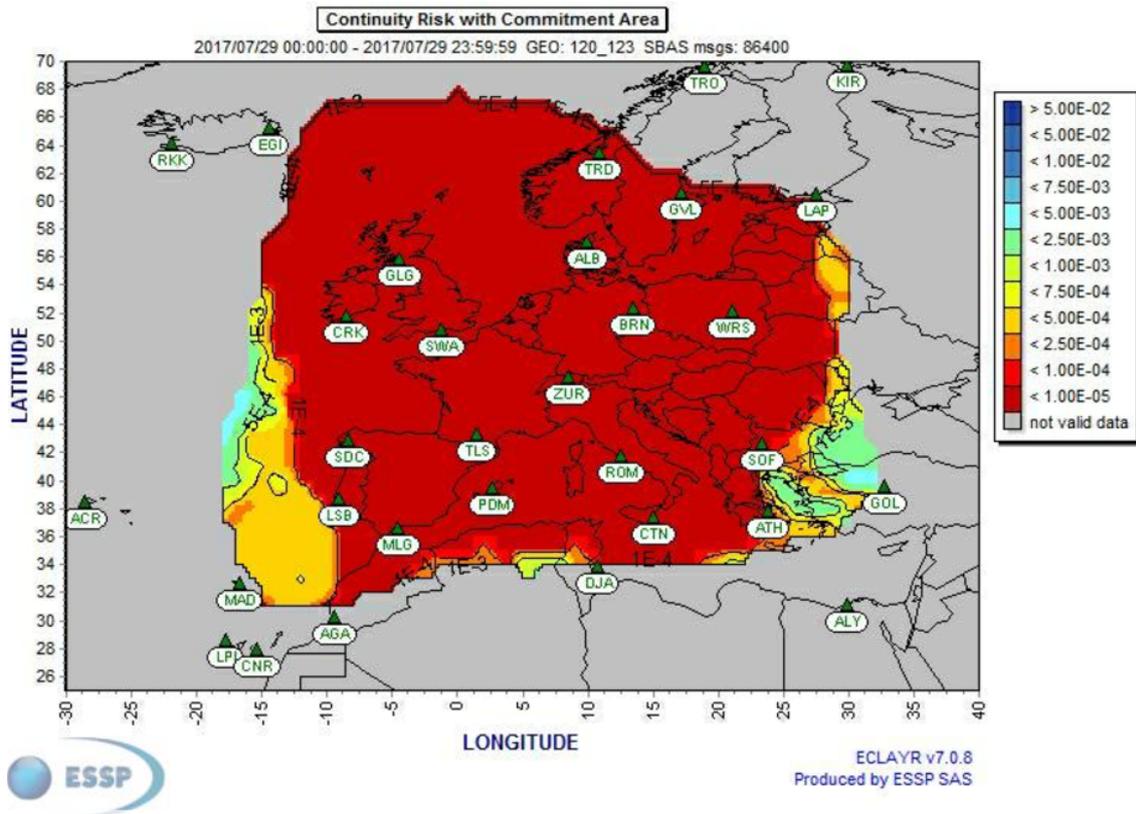


Figura 9.17: Continuidad del sistema a 29 de julio de 2017.

30 de julio de 2017

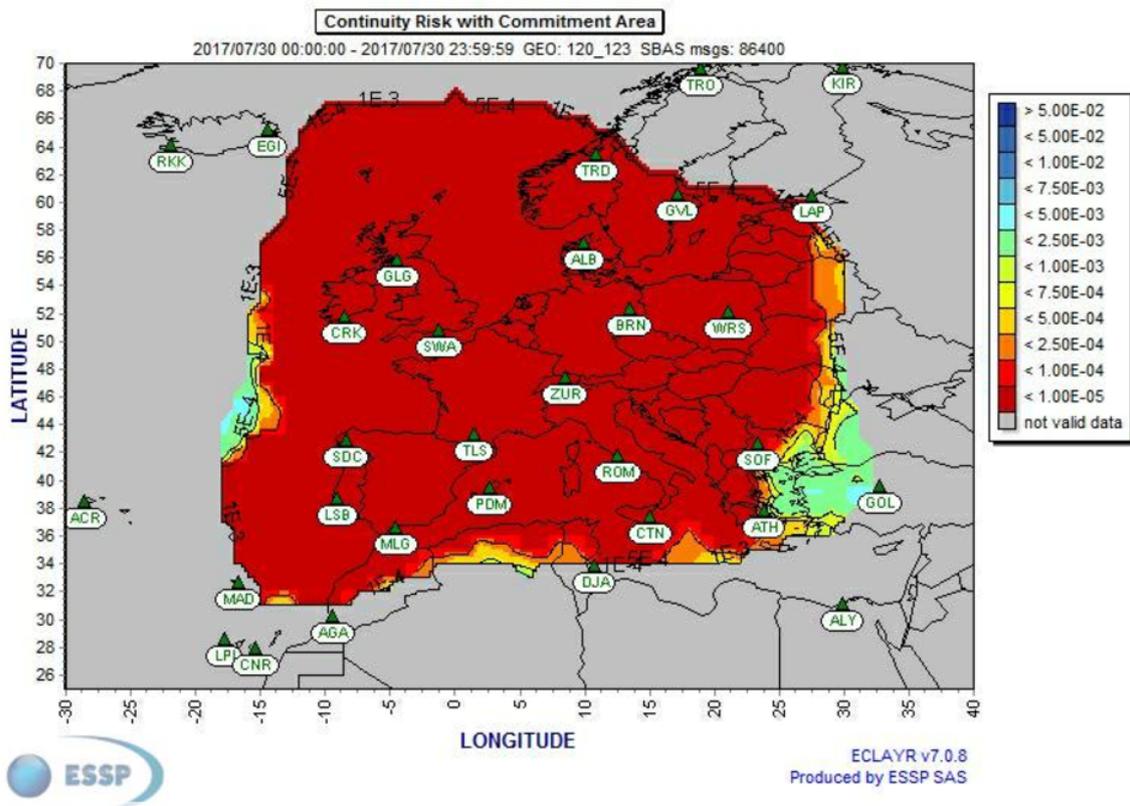


Figura 9.18: Continuidad del sistema a 30 de julio de 2017.

Como se puede observar, los valores obtenidos no se encuentran dentro de los umbrales correspondientes marcados en la Tabla 4.1. Por lo tanto este requisito no se cumple. No obstante, este requisito es algo más laxo y se permite su incumplimiento siempre que se den las condiciones necesarias para que se mitiguen los efectos desfavorables ligados al incumplimiento del requerimiento.

9.2.4. Resultados integridad

Los siguientes resultados se corresponden con la integridad para los cinco días consecutivos de la toma de datos a corto plazo.

26 de julio de 2017

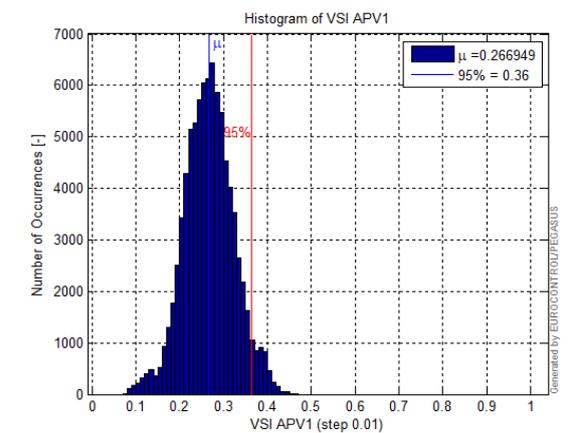
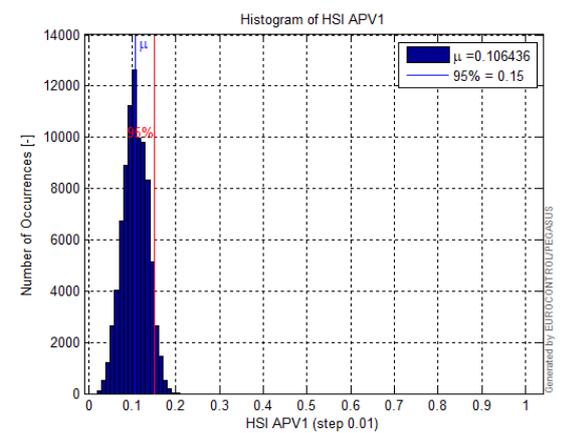
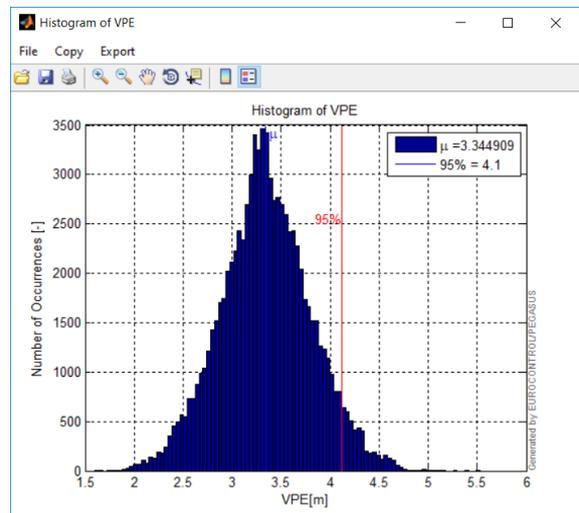
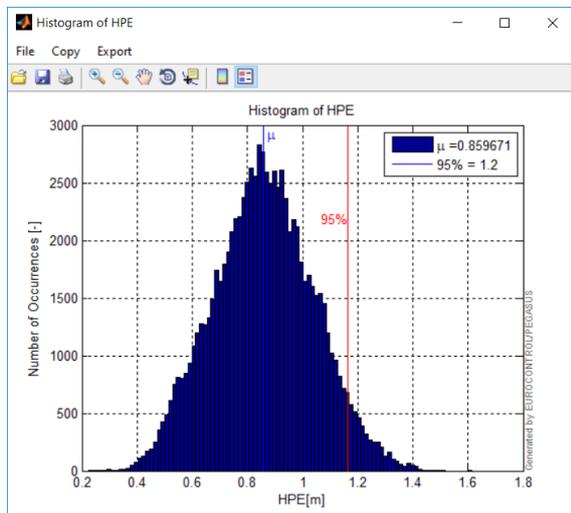
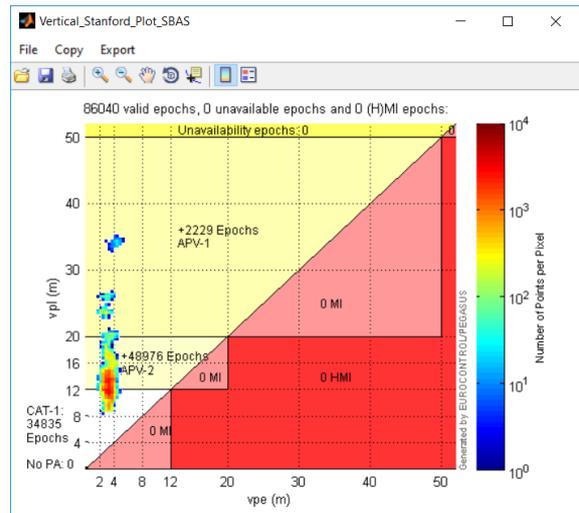
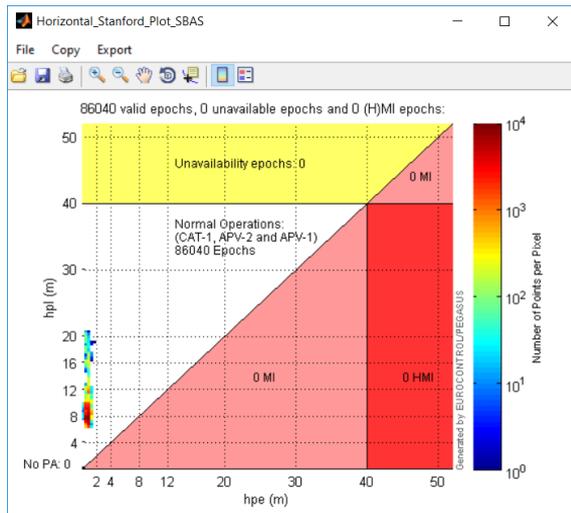


Figura 9.19: Resultados de integridad del 26 de julio de 2017

27 de julio de 2017

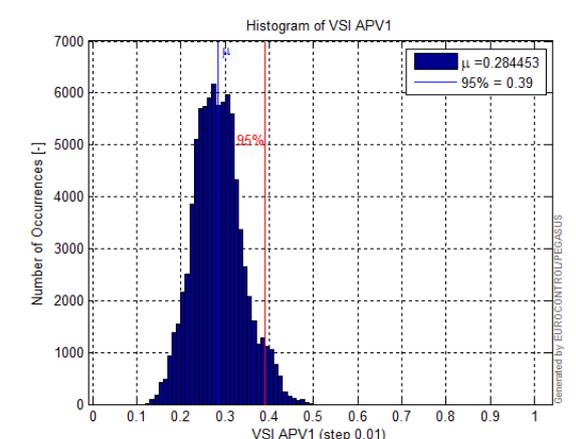
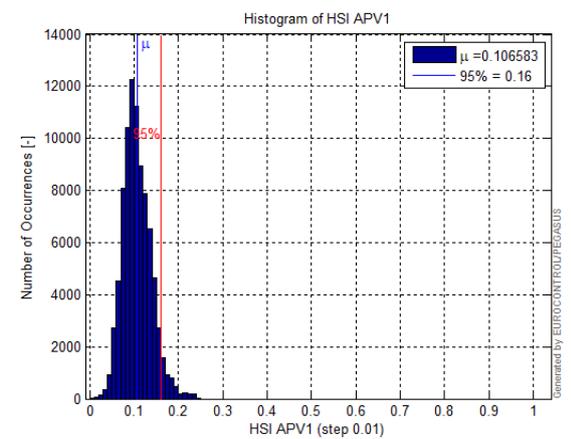
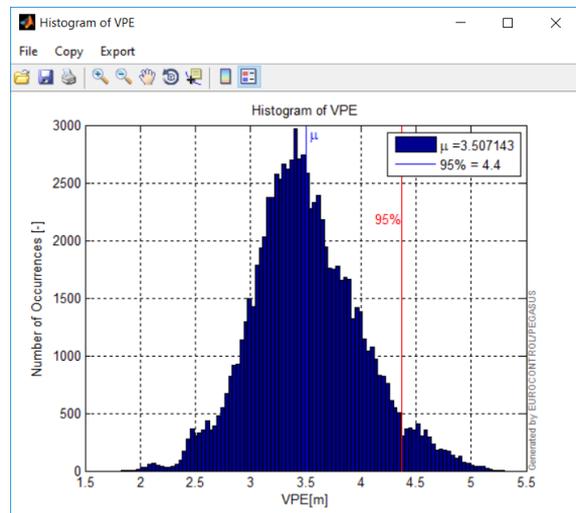
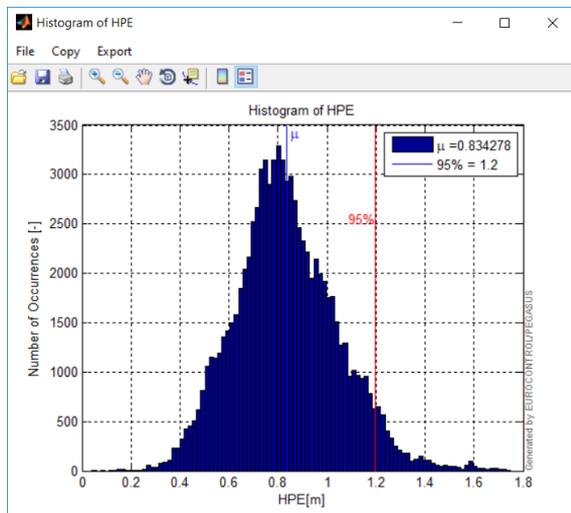
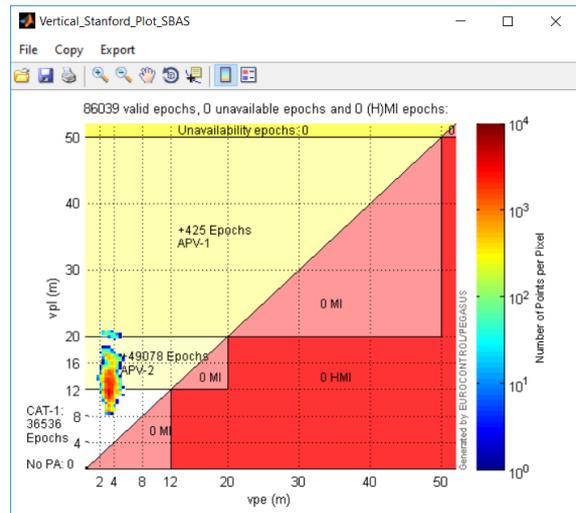
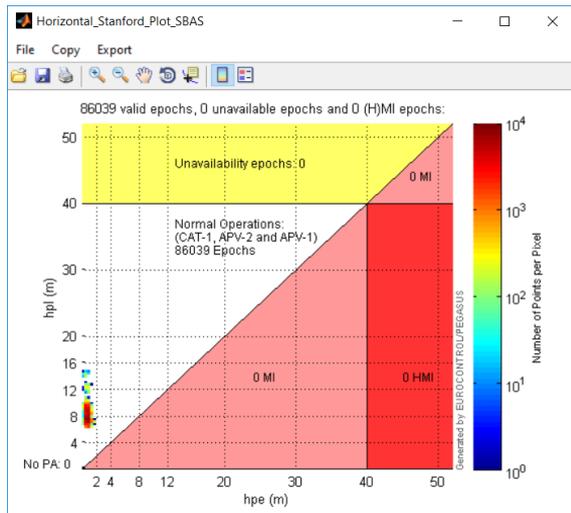


Figura 9.20: Resultados de integridad del 27 de julio de 2017

28 de julio de 2017

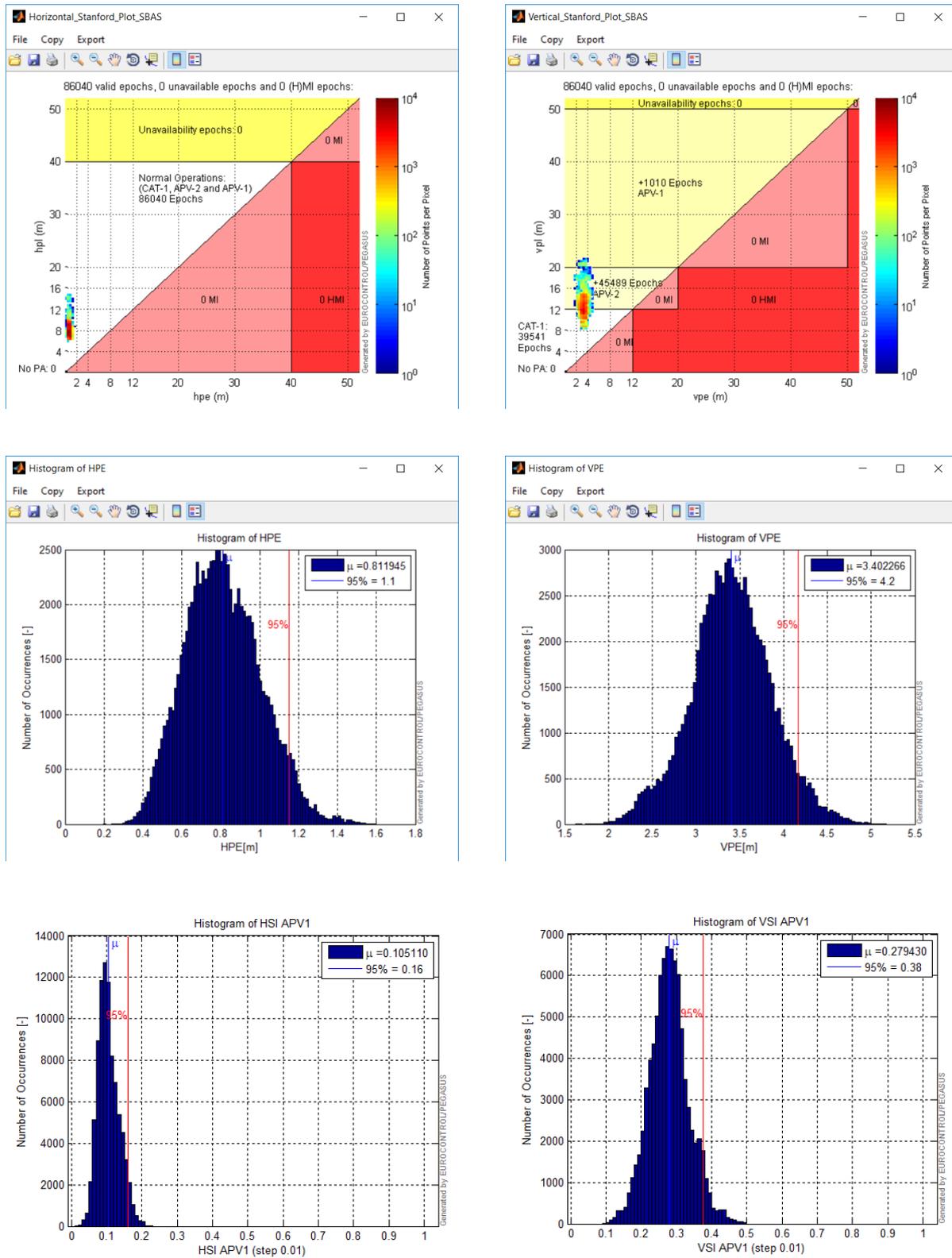


Figura 9.21: Resultados de integridad del 28 de julio de 2017

29 de julio de 2017

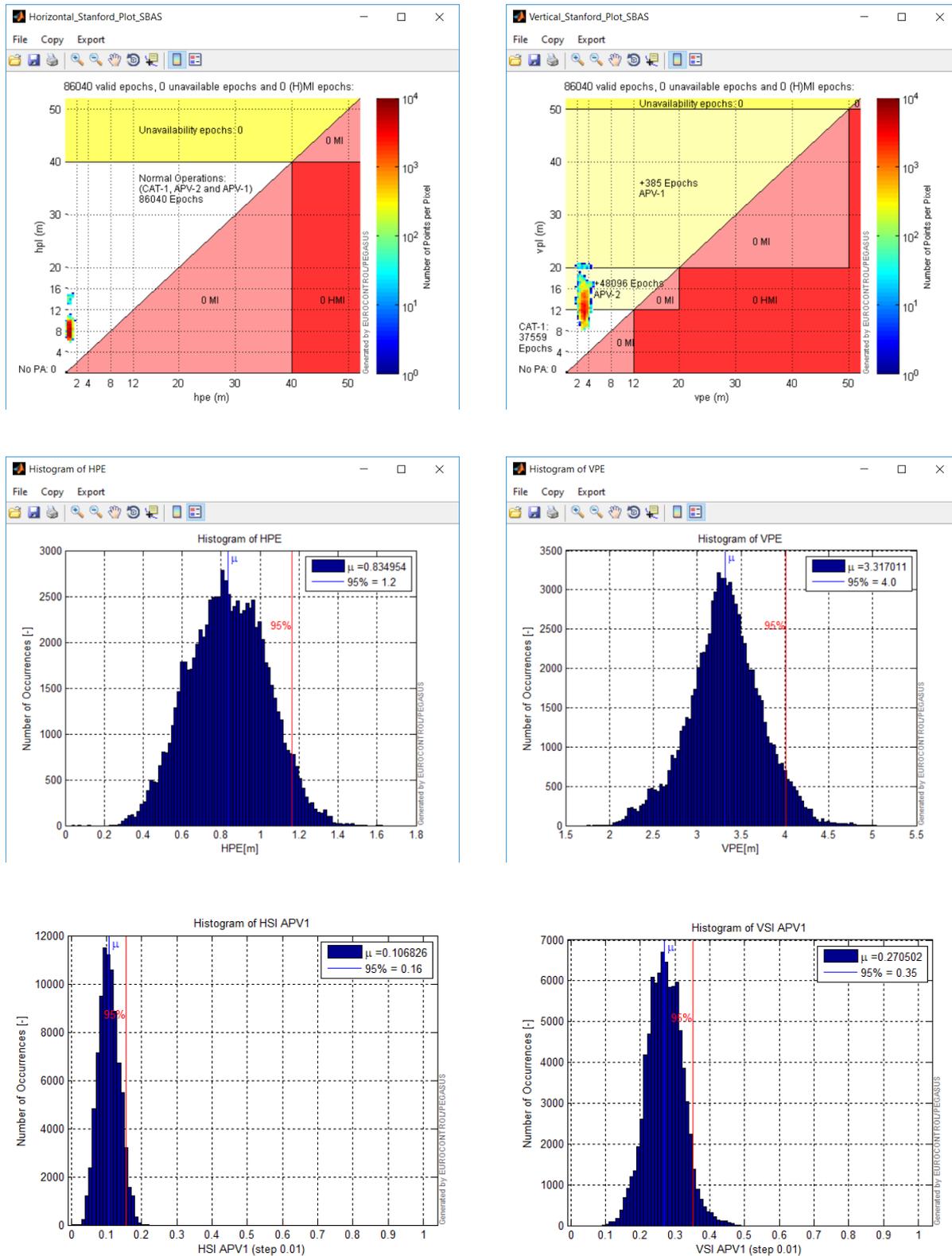


Figura 9.22: Resultados de integridad del 29 de julio de 2017

30 de julio de 2017

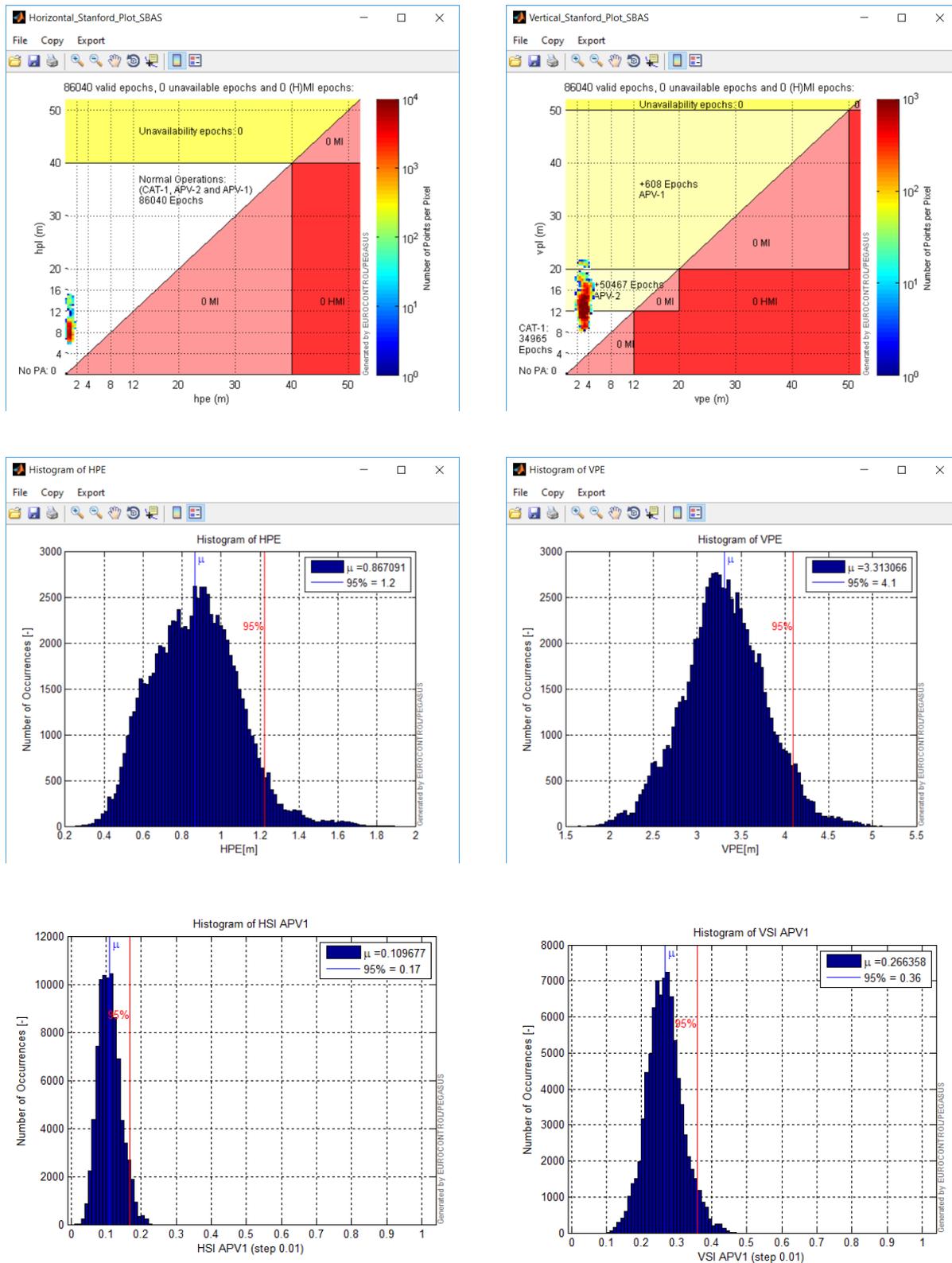


Figura 9.23: Resultados de integridad del 30 de julio de 2017

Una vez mostradas todas la gráficas relativas a la integridad se puede comprobar que en todos los diagramas de Stanford las muestras caen dentro del área con condiciones nominales, además, todos

cumplen los requisitos de operaciones tipo APV-I. En vertical, también se cumplen los requisitos como se ve en los diagramas.

Además, se pueden observar los índices de seguridad tanto para vertical como horizontal de los diferentes casos, y en ningún caso superan la unidad.

Así pues, por dos métodos diferentes pero análogos, se puede ver que el requisito de integridad se cumple en estos cinco días de fase de validación a corto plazo.

9.3. Ensayo de vuelo

Para concluir el proceso de validación se debe realizar unos ensayos de vuelo con dron. Estos deberán realizarse una vez que se han realizado las etapas anteriores y se han conseguido unos resultados satisfactorios, es decir, se han cumplido los requisitos establecidos (a excepción del de continuidad) garantizándose así la seguridad operacional durante un vuelo. Esta etapa podría ser objeto de estudio para un posterior TFG, así como el diseño de procedimientos.

9.4. Conclusiones de la validación

El principal objeto de este Trabajo Final de Grado es el de simular y analizar procedimientos SBAS a corto y largo plazo en el aeródromo de Casinos (Valencia). Aunque hemos tenido que tomar los datos de la estación de Valencia al no disponer Casinos de una propia.

En primer lugar se ha tratado de explicar un poco como se encuentra la situación actual de los sistemas de navegación y se ha justificado la elaboración del presente documento. Además, se ha hecho una breve introducción a los sistemas GNSS existentes y a diferentes conceptos base para el entendimiento de la navegación aérea y su evolución actual hacia conceptos PBN, con la importancia de las prestaciones y del usos de sistemas GNSS con sistemas de aumentación en el futuro de la misma.

Una vez acabada la introducción se ha procedido a obtener los datos necesarios para la validación. En primer lugar se ha validado a largo plazo, mediante el uso de los informes mensuales. Posteriormente se ha procedido a la obtención de los datos GNSS diarios y de los ficheros SBAS necesarios para llegar a la validación a corto plazo. Una vez tratados los ficheros de manera adecuada, se ha procedido al procesamiento de los datos y a la obtención de gráficas y datos para poder llegar a la conclusión de la validación usando PEGASUS.

Una vez obtenidos estos datos se ha llegado a la conclusión de que tanto para el corto como el largo plazo se cumplen los requerimientos marcados por la OACI (excepto el de continuidad, que es un requisito más laxo), y por tanto se puede proceder a realizar la validación mediante pruebas de vuelo que constituiría la fase final de la validación de un procedimiento GNSS en el aeródromo de Casinos.

Parte IV

Pliego de condiciones

Capítulo 10

Condiciones generales

10.1. General

Los puestos de trabajos que requieren el uso habitual de pantallas de visualización para la realización del mismo están sujetos a riesgos recogidos en la normativa nacional donde se establecen medidas de prevención de los mismos. En el caso de las pantallas de visualización los principales prejuicios son los relacionados con la visión y la postura.

El Real Decreto 488/1997 del 14 de abril establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud para el uso de sistemas que estén provistos de pantallas de visualización por parte de los trabajadores.

Los riesgos que corre el trabajador bajo estas condiciones pueden ser prevenidos considerando las siguientes variables durante la realización del TFG:

- Tiempo de trabajo frente a la pantalla, ya sea de manera continua o discontinua.
- Complejidad y exigencia de la tarea a realizar.
- Habilidad para buscar información de manera rápida y precisa.

Los factores a considerar para prevenir riesgos laborales son:

- Seguridad, puesto que durante la ejecución del trabajo se está en contacto con componentes eléctricos. También son posibles las caídas y golpes con el mobiliario existente en el puesto de trabajo.
- Higiene industrial, es decir, niveles adecuados en la iluminación, ruido y las condiciones de humedad y temperatura en la instalación donde se realiza el trabajo. Así mismo, se debe mantener el lugar limpio y desinfectado para evitar la contagio y acumulación de virus y bacterias en teclados y ratones.
- Ergonomía, es decir, ser consciente de la aparición de fatiga visual, que puede ir acompañada de picores, sequedad, dificultad para enfocar, y fatiga física y mental, al mantenerse demasiado tiempo en una misma postura y en una misma tarea, pudiéndose generar ansiedad, irritabilidad, etc.

10.2. 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.

10.3. Condiciones de especificaciones técnicas

10.3.1. Hardware

El hardware utilizado para la realización del presente Trabajo de Fin de Grado debe ser capaz de soportar la ejecución de los diferentes procesos envueltos, especialmente en lo que se refiere a la ejecución de las simulaciones. El software más limitante, debido a las prestaciones necesarias, es PEGASUS, pues requiere unos mínimos de procesador de 350 MHz, 5 GB de disco duro (60 MB de instalación y el resto para almacenamiento), 128 MB de memoria RAM (256 MB recomendados). En cualquier caso, se recomienda mayor capacidad para que las simulaciones sean livianas y no supongan la paralización del programa o la interrupción de procesos. El ordenador ASUS en el que se realiza cumple las prestaciones mencionadas.

10.3.2. Software

La singularidad del software de EUROCONTROL, PEGASUS, ha supuesto una dificultad significativa a la hora de trabajar con el mismo para llevar a cabo las simulaciones y obtener las conclusiones de la segunda fase de la validación.

Los programas utilizados durante la realización de este trabajo han sido:

- Adobe Acrobat Reader DC.
- Dropbox.
- Google Chrome.
- Hatanaka (crx2rnx).
- Internet Explorer.
- Microsoft PowerPoint.
- PAG 1.3.
- PEGASUS 4.8.4 y módulos (Convertor, GNSS Solution y MFile Runner).
- SBAS MeNTOR.
- SBAS TeACHER.
- SISNeTlab.
- SISNeT UAS.
- Símbolo de sistema.
- TEQC.
- Texmaker \LaTeX .
- WinSCP.

10.3.3. Conexión a Internet

Internet ha sido una herramienta fundamental en el desarrollo del presente trabajo. Ha sido la fuente de información primordial al proporcionar gran parte de la carga teórica del trabajo mediante la descarga de documentación, temario educativo y manuales. Además, también ha sido necesario para la obtención de los ficheros SBAS a través del FTP de EDAS y los datos GNSS de las estaciones del IGN.

10.3.4. Conocimientos previos y uso de material

Para la realización del trabajo se necesitan unos conocimientos básicos sobre la rama aeronáutica de navegación, especialmente, aquellos temas relacionados con la navegación por satélite, las constelaciones GNSS y la transmisión de información y el contenido y estructura de los mensajes. También es necesario conocer el procedimiento marcado por la normativa de la OACI para la validación de procedimientos GNSS en aeródromos .

Otros conocimientos extras son el uso de programas informáticos y también la capacidad para trabajar con manuales¹. Personalmente es necesario un conocimiento avanzado de inglés para poder entender la documentación y los programas, y capacidades como la autonomía, paciencia, constancia y la división de problemas grandes en menores a resolver uno por uno.

¹La mayoría de los programas usados durante la ejecución del trabajo no son comunes, e incluso alguno de ellos está en fase de desarrollo por lo que podrían presentar problemas durante el uso por la falta de establecimiento del mismo.

10.3.5. Supervisión

El trabajo debe estar supervisado por una persona familiarizada con el área de trabajo, relacionada con la certificación y validación de procedimientos GNSS, y también con el software necesario y proveer al alumno del mismo para la correcta ejecución del proyecto.

Parte V

PRESUPUESTO

Capítulo 11

Presupuesto

11.1. Introducción

Una vez que tenemos concluida la parte de simulación y validación del trabajo, se procede a calcular los costes que suponen la realización del presente Trabajo de Fin de Grado.

Los supuestos gastos vendrían del material usado, las licencias de software, el gasto de personal y el alquiler de oficina. En los gastos no se incluyen la instalación de una antena receptora GNSS (porque se ha usado la de Valencia), pero sí que se reflejará el gasto de una estación GNSS móvil que permita realizar la recogida de datos en el lugar específico de interés (aeródromo de Casinos).

Por tratarse de un Trabajo de Fin de Grado, se supone que es un proyecto de investigación, por lo que el IVA no será considerado. Si la misma investigación corriera a manos de una empresa con ánimo de lucro, sí que se debería considerar.

El coste de amortización se calcula mediante:

$$a = \frac{VC - VR}{n}, \quad t_h = \frac{a}{h}$$

Donde:

- a es la amortización (€/año).
- VC es el valor de compra (€).
- VR es el valor de residual al finalizar el período de amortización (€).
- n es el período de amortización (años).
- t_h es la tasa horaria (€/h).
- h son las horas trabajadas al año (h/año).

Los precios unitarios de personal se calcula mediante:

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = \frac{\text{semanas} - \text{semanas}_{\text{no laboral}}}{\text{año}} \cdot \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{semana}}$$

$$\text{Coste horario} = \frac{\frac{\text{Salario bruto año}}{\text{Horas trabajadas}}}{\text{año}}$$

Un año tiene 52 semanas, suponiendo mes y medio de vacaciones en total (cualquier día puntual se considera dentro de este período) y suponiendo una jornada laboral de 8 horas todos los días de diario se tiene:

$$h = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = (52 - 6) \cdot 8 \cdot 5 = 1840 \text{ h/año}$$

11.2. Estado de mediciones

Los recursos de hardware, software, personal e instalaciones necesarios para la ejecución del trabajo son:

Descripción	Unidades
Ordenador portátil ASUS	1
Licencia Microsoft Office 2010	1
Licencia PEGASUS 4.8.4	1
Licencia Hatanaka	1
Licencia TEQC	1
Licencia WinSCP	1

Tabla 11.1: Hardware y software.

Descripción	Unidades
Profesor titular	1
Ingeniero superior	1

Tabla 11.2: Personal especializado.

Descripción	Unidades
Oficina	1
Permisos de oficina	1
Seguro de oficina	1

Tabla 11.3: Costes de oficina.

11.3. Desglose de costes unitarios

11.3.1. Coste material y software unitario

Equipo informático

El ordenador portátil ASUS se puede considerar que tiene un valor residual del 25 % y un período de amortización de 10 años. El coste inicial fue de 1000€. De esto se deduce:

$$a = \frac{1000 - 250}{10} = 75 \text{ €/año}$$

$$t_h = \frac{75}{1840} = 0,041 \text{ €/h}$$

Software

Se deben distinguir dos tipos de software.

- Tanto PEGASUS 4.8.4 como Hatanaka, TEQC y WinSCP son software libre, es decir, el coste de su licencia es nulo, por lo tanto, estarán amortizados desde el comienzo y se considera que tienen valor residual nulo. Teniendo en cuenta esto, se tiene:

$$a = 0 \text{ €/año}$$

$$t_h = 0 \text{ €/h}$$

- Sin embargo, Microsoft Office 2010 no es software libre y su licencia tiene un coste medio de 49€. Sin valor residual y con tiempo de amortización de un año se tiene:

$$a = \frac{49}{1} = 49 \text{ €/año}$$

$$t_h = \frac{49}{1840} = 0,027 \text{ €/h}$$

11.3.2. Coste personal cualificado unitario

Profesor Titular de Universidad

Considerando que un Profesor Titular cobra un salario bruto anual de 35000€/año, se tiene:

$$\text{Coste horario} = \frac{35000}{1840} = 19,02 \text{ €/h}$$

Ingeniero Superior

Suponiendo que un Ingeniero Superior cobra un salario bruto anual de 22000€/año, se tiene:

$$\text{Coste horario} = \frac{22000}{1840} = 11,96 \text{ €/h}$$

11.3.3. Coste oficina unitario

La ejecución del trabajo se ha llevado a cabo en el ETS de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica de la UPV. Si el coste de alquiler de la oficina se estima en 900€, basándose en la media del coste alquiler de oficinas en Valencia¹, y suponiendo, asimismo, que el coste se reparte entre cuatro personas que trabajan en ella, se obtiene:

$$\text{Coste mensual oficina} = \frac{900}{4} = 225 \text{ €/mes}$$

Si además, el trabajo se ha ejecutado en un período poco mayor a tres meses, el coste total será de:

$$\text{Coste total} = 225 \cdot 3 = 675 \text{ €}$$

11.4. Desglose de costes totales

11.4.1. Coste material y software total

Concepto	Tasa horaria t_h	Horas	Importe (€)
Ordenador portátil ASUS	0.041	300	12.23
Licencia Microsoft Office 2010	0.027	300	7.99
Licencia PEGASUS 4.8.4	0	300	0
Licencia Hatanaka	0	300	0
Licencia TEQC	0	300	0
Licencia WinSCP	0	300	0
Total (€)			20.22

Tabla 11.4: Coste total del material y el software.

¹Se incluyen los gastos de seguro, suministro eléctrico, de agua y la climatización.

11.4.2. Coste personal cualificado total

Concepto	Tasa horaria t_h	Horas	Importe (€)
Profesor Titular	19.02	100	1902.17
Ingeniero Superior	11.96	50	597.83
Total (€)			2500

Tabla 11.5: Coste total del personal cualificado.

11.4.3. Coste oficina total

Concepto	Tasa mensual (€/mes)	Meses	Importe (€)
Alquiler y suministros oficina	225	3	675
Total (€)			675

Tabla 11.6: Coste total de la oficina.

11.5. Resumen del presupuesto total

Sumando los costes totales anteriores se obtiene un presupuesto total del proyecto que asciende a TRES MIL CIENTO CUARENTA Y CINCO EUROS CON VEINTIDÓS CÉNTIMOS (3145.22€).

Bibliografía

- [1] Cayetano Marco Ortuño, Israel Quintanilla. TFG *Simulación, proceso y análisis para la certificación del sistema de navegación aérea por satélite EGNOS en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID-UPV)*, Julio 2015
- [2] M^a Carmen Furquet Gascón, Israel Quintanilla. TFG *Estudio y análisis de la certificación y diseño de un SBAS (Satellite Based Augmentation System) para aeropuertos/helipuertos*, Julio 2016
- [3] Carlos Martínez Martínez, Israel Quintanilla. TFG *Certificación de sistemas de navegación GNSS: SBAS y GBAS aplicado a aeropuertos/helipuertos*, Julio 2016
- [4] PhD Israel Quintanilla *Apuntes de Navegación Aérea, Cartografía y Cosmografía (NACC) Curso 2015-2016*
- [5] Tomasi, Wayne (DeVry Institute of Technology, Phoenix, Arizona) *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Cuarta Edición. 2003
- [6] http://www.navipedia.net/index.php/GALILEO_Future_and_Evolutions
- [7] http://www.navipedia.net/index.php/BeiDou_General_Introduction
- [8] <http://www.insidegnss.com/node/3590>
- [9] OACI. Doc 9613 AN/937 *Performance-based Navigation (PBN) Manual*. Tercera Edición. 2008
- [10] OACI. Anexo 10 *Telecomunicaciones aeronáuticas. Volumen I: Radioayudas para la navegación*. Sexta Edición. 2006
- [11] OACI. Doc 8168 OPS/611 *Operaciones de Aeronaves. Volumen II: Construcción de procedimientos de vuelo visual y por instrumentos*. Sexta Edición. 2014
- [12] OACI. Doc 9906 AN/472 *Manual de garantía de validez para diseño de procedimientos de vuelo. Volumen I: Sistema de garantía de calidad del diseño de procedimientos de vuelo*. Primera Edición. 2009
- [13] OACI. Doc 9849 AN/457 *Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual*. Primera Edición. 2005
- [14] European Commission *EGNOS Open Service (OS) Service Definition Document*. Febrero 2015
- [15] European Commission *EGNOS Data Access Service (EDAS) Service Definition Document*. Diciembre 2014
- [16] European Commission *EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document*. Abril 2015
- [17] SESAR *European ATM Master Plan: The roadmap for delivering high performance aviation for Europe*. Edición 2015
- [18] China Satellite Navigation Office *Updates on BeiDou Navigation Satellite System*. IGNSS Symposium. 2015

- [19] PDI Pedro Yuste *Apuntes de Gestión del Espacio Aéreo II* Curso 2016-2017
- [20] <https://www.egnos-portal.eu/node/2442>
- [21] EASA AMC 20-27 *Airworthiness Approval and Operational Criteria for RNP APPROACH (RNP APCH) Operations Including APV BARO-VNAV Operations*. Diciembre 2009
- [22] EASA AMC 20-28 *Airworthiness Approval and Operational Criteria related to Area Navigation for Global Navigation Satellite System approach operation to Localiser Performance with Vertical guidance minima using Satellite Based Augmentation System*. Septiembre 2012
- [23] EGNOS ESSP *EDAS FTP SERVICE USER INFORMATION PACKAGE*. Noviembre 2016
- [24] EGNOS ESSP *Monthly Performance Report January 2017*. Febrero 2017
- [25] EGNOS ESSP *Monthly Performance Report February 2017*. Marzo 2017
- [26] EGNOS ESSP *Monthly Performance Report March 2017*. Abril 2017
- [27] EGNOS ESSP *Monthly Performance Report April 2017*. Mayo 2017
- [28] EGNOS ESSP *Monthly Performance Report May 2017*. Junio 2017
- [29] EGNOS ESSP *Monthly Performance Report June 2017*. Julio 2017
- [30] <https://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex211.txt>
- [31] <http://www.ign.es/web/ign/portal/mas-informacion-gnss>
- [32] <http://terras.gsi.go.jp/ja/crx2rnx.html>
- [33] UNAVCO *Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products*. Edición 2015
- [34] <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>
- [35] EUROCONTROL *PEGASUS Software User Manual: Module CONVERTOR*. Septiembre 2015
- [36] EUROCONTROL *PEGASUS GNSS_Solution SOFTWARE USER MANUAL*. Mayo 2011
- [37] EUROCONTROL *PEGASUS Software User Manual: Module MFILERUNNER*. Marzo 2008
- [38] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/content/about-sol
- [39] REAL DECRETO 488/1997, de 14 de abril, sobre *disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización*. Abril 1997
<http://www.boe.es/boe/dias/1997/04/23/pdfs/A12928-12931.pdf>