



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI UDINE**



**Dottorato di Ricerca Interateneo in
Ingegneria Civile–Ambientale e Architettura**

Curriculum: Ingegneria Civile-Ambientale
Settore Scientifico Disciplinare: ICAR06
XXXV Ciclo

**APPLICAZIONI DEL SISTEMA SATELLITARE EUROPEO
GALILEO ALLA NAVIGAZIONE TERRESTRE**

**DOTTORANDO
PAOLO SNIDER**

**COORDINATORE
PROF. ALBERTO SDEGNO**

**SUPERVISORE DI TESI
PROF. RAFFAELA CEFALO**

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Indice:

<i>Indice degli acronimi</i>	VIII
1. Introduzione.....	1
2. I sistemi satellitari globali di navigazione.....	5
2.1. Strutturazione dei sistemi GNSS.....	6
2.1.1. Il segmento di controllo.....	6
2.1.2. Il segmento spaziale	7
2.1.2.1. Assegnazione delle bande di frequenza.....	7
2.1.2.2. I satelliti	8
2.1.3. Il segmento utente	9
2.2. Il sistema GPS.....	10
2.2.1. GPS: il segmento di controllo	10
2.2.2. GPS: il segmento spaziale	12
2.2.2.1. GPS: la costellazione.....	12
2.2.2.2. GPS: i satelliti.....	12
2.2.2.3. GPS: i segnali	15
2.2.2.3.1. GPS: i nuovi segnali.....	17
2.2.2.4. GPS: messaggio navigazionale	19
2.2.3. Performance del sistema GPS	22
2.3. Il sistema GLONASS.....	23
2.3.1. GLONASS: il segmento di controllo	23
2.3.2. GLONASS: il segmento spaziale	24
2.3.2.1. GLONASS: la costellazione.....	24
2.3.2.2. GLONASS: I satelliti.....	24
2.3.2.3. GLONASS: i segnali	27
2.3.2.3.1. GLONASS: Modernizzazione dei segnali.....	29
2.3.2.4. GLONASS: messaggio navigazionale	31
2.3.3. Performance del sistema GLONASS	33
2.4. Il sistema BeiDou (Compass)	34
2.4.1. BeiDou: il segmento di controllo	34
2.4.2. BeiDou: il segmento spaziale.....	35
2.4.2.1. BeiDou: la costellazione	35

2.4.2.2.	I satelliti.....	36
2.4.2.3.	Beidou: i segnali	37
2.4.2.4.	BeiDou: messaggio navigazionale.....	38
2.4.3.	Performance del sistema BeiDou.....	40
2.5.	Il sistema Galileo	41
2.5.1.	Galileo: il segmento di controllo	42
2.5.2.	Galileo: il segmento spaziale	46
2.5.2.1.	Galileo: la costellazione	46
2.5.2.2.	Galileo: i satelliti.....	47
2.5.2.3.	Galileo: i segnali	49
2.5.2.4.	Galileo: messaggio navigazionale	56
2.5.3.	Performance del sistema Galileo	59
2.5.3.1.	Performance del servizio Open Service (OS)	59
2.5.3.2.	Performance del servizio High Accuracy Service (HAS)	63
2.5.3.3.	Performance del Public Regulated Service (PRS).....	63
2.5.3.4.	Performance del Search And Rescue service (SAR)	64
2.6.	I sistemi di navigazione satellitare regionali	65
2.6.1.	Il sistema IRNSS/NAVIC	65
2.6.1.1.	IRNSS/NAVIC: il segmento di controllo.....	65
2.6.1.2.	IRNSS/NAVIC: il segmento spaziale.....	66
2.6.1.2.1.	IRNSS/NAVIC La costellazione	66
2.6.1.2.2.	IRNSS/NAVIC I segnali.....	66
2.6.1.2.3.	Il messaggio navigazionale	67
2.6.1.3.	IRNSS/NAVIC: performance del sistema.....	67
2.6.2.	Il sistema QZSS	67
2.6.2.1.	QZSS: il segmento di controllo	67
2.6.2.2.	QZSS: il segmento spaziale.....	68
2.6.2.2.1.	QZSS: la costellazione	68
2.6.2.2.2.	QZSS: i segnali.....	69
2.6.2.3.	Performance del sistema QZSS.....	70
2.7.	Compatibilità e interoperabilità tra i diversi sistemi GNSS.....	71
2.7.1.	Interoperabilità in termini di sistema	71

2.7.2.	Interoperabilità in termini di segnale	71
2.7.3.	Sistemi di riferimento	72
2.7.4.	Sistemi di riferimento temporale	74
2.7.4.1.	GPS Time (GPST).....	75
2.7.4.2.	Galileo System Time (GST)	75
2.7.4.3.	GLONASS Time (GLONASST).....	76
2.7.4.4.	BeiDou Time (BDT)	76
3.	Stato dell'arte relativo agli studi e ricerche che riguardano le analisi di dati GNSS/Galileo statici e cinematici e in particolare alle loro applicazioni alla navigazione aerea, marittima e terrestre	77
4.	Analisi delle prestazioni del sistema satellitare Galileo	83
4.1.	Modalità di misura.....	83
4.1.1.	Introduzione al funzionamento dei sistemi GNSS.....	83
4.1.2.	Il rilievo differenziale	86
4.1.3.	GNSS interferenziale – utilizzo di misure di fase	87
4.1.4.	Errori nelle misure GNSS	90
4.1.4.1.	Errori legati alla strumentazione a terra	91
4.1.4.1.1.	Errori legati alle antenne del ricevitore	91
4.1.4.1.2.	Errori legati ai ricevitori	93
4.1.4.2.	Errori legati ai satelliti	94
4.1.4.2.1.	Errori di orologio nei satelliti e nei ricevitori	94
4.1.4.2.2.	Errore di posizione dei satelliti	95
4.1.4.2.3.	Errori legati al centro di fase dell'antenna del satellite	96
4.1.4.2.4.	Errori legati alla geometria dei satelliti	96
4.1.4.3.	Errori legati alla propagazione del segnale in atmosfera.....	98
4.1.4.3.1.	Errore ionosferico	99
4.1.4.3.2.	Errore troposferico	100
4.1.4.4.	Errori indotti dalle condizioni ambientali.....	101
4.1.4.4.1.	Errori da multipaths.....	101
4.1.5.	Effetti legati alla deformazione della crosta terrestre	102
4.2.	Campagne di misura	103
4.2.1.	Pianificazione del rilievo	104

4.2.2.	Campagna effettuata a marzo 2022.....	105
4.2.2.1.	Strumentazione utilizzata	107
4.2.2.1.1.	Il sistema MMS	107
4.2.2.1.2.	La traiettoria di riferimento MMS	113
4.2.2.2.	Dati raccolti	118
4.2.2.3.	Risultati dell'elaborazione dei dati	118
4.2.2.3.1.	Risultati dell'elaborazione dei dati ricevitore Septentrio – Rilievo urbano	121
4.2.2.3.2.	Risultati dell'elaborazione dei dati ricevitore Septentrio – Rilievo extraurbano.....	144
4.2.2.3.3.	Risultati dell'elaborazione dei dati dello smartphone – Rilievo urbano	169
4.2.2.3.4.	Risultati dell'elaborazione dei dati dello smartphone – Rilievo extraurbano.....	194
4.3.	Confronti dei risultati ottenuti nelle diverse campagne di misura	218
4.3.1.	Confronti nel tempo in ambito urbano	219
4.3.1.1.	Confronto fra i dati di posizione ottenuti con i sistemi satellitari Galileo e GPS	219
4.3.1.1.1.	GPS L1 L2 - Differenze planimetriche tra le traiettorie - Urbano...	220
4.3.1.1.2.	Galileo E1 E5b - Differenze planimetriche tra le traiettorie - Urbano	221
4.3.1.1.3.	Differenze planimetriche, deviazione standard, numero di epoche, numero medio di satelliti e PDOP – confronto diretto Galileo - GPS	222
4.3.1.2.	GPS L1 L2 + GLONASS G1 G2 Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Urbano	226
4.3.1.3.	GPS L1 L2 + Galileo E1 E5b Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Urbano	230
4.3.1.4.	GPS L1 L2 + GLONASS G1 G2 + Galileo E1 E5b Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Urbano	235
4.3.2.	Confronti nel tempo in ambito extraurbano	239
4.3.2.1.	Confronto fra i dati di posizione ottenuti con i sistemi satellitari Galileo e GPS	239
4.3.2.1.1.	GPS L1 L2 - Differenze planimetriche tra le traiettorie - Extraurbano	239

4.3.2.1.2.	Galileo E1 E5b - Differenze planimetriche tra le traiettorie - Urbano	241
4.3.2.1.3.	Differenze planimetriche, deviazione standard, numero di epoche, numero medio di satelliti e PDOP – confronto diretto Galileo - GPS.....	242
4.3.2.2.	GPS L1 L2 + GLONASS G1 G2 Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Extraurbano	246
4.3.2.3.	GPS L1 L2 + Galileo E1 E5b Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Extraurbano	250
4.3.2.4.	GPS L1 L2 + GLONASS G1 G2 + Galileo E1 E5b Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Extraurbano	255
5.	Conclusioni	260
	<i>Indice delle figure</i>	276
	<i>Indice delle tabelle</i>	288
	Riconoscimenti	292
	Ringraziamenti.....	293

Indice degli acronimi

AEP	<i>Architecture Evolution Plan</i>
AFSCN	<i>Air Force Satellite Control Network</i>
AltBOC	<i>Alternate Binary Offset Carrier</i>
AMCS	<i>Alternate Master Control Station</i>
ANTEX	<i>ANTenna EXchange format</i>
ARNS	<i>Aeronautical Radio Navigation Service</i>
ARP	<i>Antenna Reference Point</i>
BDT	<i>BeiDou Time</i>
BGTO	<i>BDT-GNSS Time Offset</i>
BIH	<i>Bureau International de l'Heure</i>
BOC	<i>Binary Offset Carrier</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CASC	<i>China Aerospace Science and Technology Corporation</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CHA	<i>Channel of High Accuracy</i>
CLAS	<i>Centimeter Level Augmentation Service</i>
CMCF	<i>Central Monitoring & Control Facility</i>
CODE	<i>Center for Orbit Determination in Europe</i>
COSPAS (КОСПАС)	<i>Cosmicheskaya Sistyema Poiska Avariynikh Sudov, sistema spaziale per la ricerca di navi in difficoltà</i>
CRC	<i>Cycle Redundancy Check</i>
CSA	<i>Channel of Standard Accuracy</i>
CSIM	<i>Constellation Simulator</i>
CSSR	<i>Compact-State Space Representation</i>
CTP	<i>Conventional Terrestrial Pole</i>
CTRS	<i>Conventional Terrestrial Reference System</i>
DASS	<i>Distress Alerting Satellite System</i>
DMI	<i>Distance Measuring Indicator</i>
DoD	<i>US Department of Defense</i>
DOP	<i>Dilution Of Precision</i>
DORIS	<i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite</i>
ECEF	<i>Earth Centered Earth Fixed</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EOP	<i>Earth Orientation Parameters</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
FDF	<i>Flight Dynamics Facility</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FEC	<i>Forward error Correction</i>

FOC *Full Operational Capability*
GA *Ground Antennas*
GACF *Ground Assets Control Facility*
GAMS *GPS Azimuth Measurement Subsystem*
GCS *Ground Control System*
GCS KMF *Ground Control System Key Management Facility*
GDOP *Geometrical Dilution Of Precision*
GEO *Geostationary Orbit*
GGTO *Galileo to GPS Time Offset*
GIOVE *Galileo in-Orbit Validation*
GLONASS *GLObal NAvigation Satellite System*
GMS *Ground Mission Segment*
GMS KMF *Ground Mission Segment Key Management Facility*
GNSS *Global Navigation Satellite System*
GPS *Global Positioning System*
GPS/INS *Global Positioning System/INertial System*
GRC *Galileo Reference Center*
GRSP *Geodetic Reference Service Provider*
GSC *European GNSS Service Centre*
GSMC *Galileo Security Monitoring Center*
GSS *Galileo Sensor Stations*
GST *Galileo System Time*
GTRS *Geocentric Terrestrial Reference System*
GTRF *Galileo Terrestrial Reference Frame*
HAS *High Accuracy Service*
HDOP *Horizontal Dilution Of Precision*
HEO *Highly Elliptical Orbit*
HPE *Horizontal Positioning Error*
IERS *International Earth Rotation Service*
IGS *International GNSS Service*
IGSO *Inclined Geosynchronous Satellite Orbit*
IMO *International Maritime Organization*
INC *ISRO Navigation Centre*
INS *INertial System*
IOC *Initial Operational Capability*
IONEX *IONosphere model EXchange format*
IOV *In-Orbit Validation*
IRCDR *IRNSS CDMA Ranging Stations*
IRDCN *IRNSS Data Communication Network*
IRIMS *IRNSS Range and Integrity Monitoring Stations*
IRNSS *Indian Regional Navigational Satellite System*

IRNWT *IRNSS Network Timing Centre*

IRSCF *IRNSS Spacecraft Control Facility*

ISB *Inter-System Bias*

ISRO *Indian Space Research Organization*

ITU *International Telecommunications Union*

KMF *Key Management Facility*

KPI *Key Performance Indicator*

LADO *Launch/Early Orbit, Anomaly Resolution, and Disposal Operations*

L2CL *L2 Civil Long*

L2CM *L2 Civil Moderate*

LDPC *Low Density Parity Check*

LEOP *Launch and Early Orbit Phase*

LLR *Lunar Laser Ranging*

LS *Laser Station*

LUT *Local User Terminal*

MBOC *Multiplexed Binary Offset Carrier*

MCC *Mission Control Center*

MCS *Master Control Station*

MEO *Medium Earth Orbit*

MEOLUT *Medium Earth Orbit Local User Terminal*

MEOSAR *Medium-Earth Orbit Search and Rescue*

MGF *Message Generation Facility*

MMS *Mobile Mapping System*

MMS™ *Mobile Mapping Suite*

MPL *Minimum Performance Level*

MS *Monitoring Stations*

MSB *Most Significant Bit*

MSF *Mission Support Facility*

MTPF *Maintenance and Training Platform*

MUCF *Mission Uplink Control Facility*

NAV *Navigation Message*

NAVIC *Navigation Indian Constellation*

NDS *Nuclear Detonation Detection System*

NGA *National Geospatial-Intelligence Agency*

NGS *U.S. National Geodetic Survey*

NRCAN *Natural Resources CANada*

OD & TS *Orbitography Determination and Time Synchronization*

OPF *Operations Preparation Facility*

OSPF *Orbit determination and Synchronization Processing Facility*

PCO *Phase Center Offset*

PCS *POS Computer System*

PCV *Phase Center Variation*
PDOP *Positioning Dilution of Precision*
PLB *Personal Locator Beacon*
POS/LV *Position and Orientation System/Land Vehicle*
POSPac™ *Position and Orientation System Post-Processing Package*
PPS *Precise Positioning Service*
PRN *Pseudo Random Noise*
PTF *Precision Timing Facility*
QPSK *Quadrature Phase Shift Keying*
QZO *Quasi-Zenith orbit*
QZSS *Quasi-Zenith Satellite System*
RCC *Rescue Coordination Centre*
RINEX *Receiver Independent Exchange Format*
RLS *SAR/Galileo Return Link Service*
RNSS *Radionavigation Satellite service*
RTK *Real Time Kinematic*
S/A *Selective Availability*
SARSAT *Search And Rescue Satellite-Aided Tracking*
SBAS *Satellite Based Augmentation System*
SCC *System Control Center*
SCCF *Spacecraft & Constellation Control Facility*
SCPF *Spacecraft & Constellation Planning Facility*
SGDSP *SAR/Galileo Data Service Provider*
SGS *SAR Ground Segment*
SISA *Signal-in-Space Accuracy*
SLAS *Sub-meter Level Augmentation Service*
SLR *Satellite Laser Ranging*
SOH *Seconds of Hours*
SoL *Safety-of-Life*
SOW *Seconds Of Week*
SPF *Service Product Facility*
SPOC *Search-and-Rescue Points of Contact*
SPS *Standard Positioning Service*
SSTL *Surrey Satellite Technology Ltd*
SVN *Space Vehicle Number*
TCG *Geocentric Coordinate Time*
TDOP *Time Dilution Of Precision*
TEC *Total Electron Content*
TRF *Terrestrial Reference System*
TSP *Time Service Provider*
TT&C *Telemetry, Tracking and Control*

ULS *Mission Uplink Stations*
UNOOSA *United Nations Office for Outer Space Affairs*
URA *User Range Accuracy*
URE *User Range Error*
USERE *User Equivalent Range Error*
USAF *United States Air Force*
USNO *United States Naval Observatory*
USSF *United States Space Force*
UTC *Coordinated Universal Time*
UTC(SU) *Coordinated Universal Time (Soviet Union)*
VDOP *Vertical Dilution Of Precision*
VPE *Vertical Positioning Error*
VSAT *Very Small Aperture Terminal*
WRC *World Radiocommunication Conference*
ZUPD *Zero velocity UPDate*

1. Introduzione

Nella prima parte di questa Tesi di Dottorato è stato trattato il funzionamento del sistema di posizionamento europeo Galileo, dapprima mediante un'introduzione sulla sua architettura, sulle caratteristiche tecniche confrontate con gli altri sistemi di posizionamento globale come GPS (Global Positioning System), GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) e BeiDou.

In particolare il capitolo 2 tratta la struttura dei sistemi satellitari GPS, GLONASS, BeiDou (Compass), Galileo e i sistemi di navigazione satellitari regionali IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System)/NAVIC (Navigation Indian Constellation) e QZSS (Quasi-Zenith Satellite System).

Nel capitolo 3 sono state trattate brevemente le basi teoriche relative alle misurazioni con strumentazione GNSS e i relativi errori, rimandando alla letteratura specifica per approfondimenti.

Successivamente è stata presentata uno Studio dell'Arte relativo agli studi e ricerche che riguardano le analisi di dati GNSS/Galileo statici e cinematici e in particolare alle loro applicazioni alla navigazione aerea, marittima e terrestre.

Data l'ampio raggio di argomenti e applicazioni oggetto di ricerche e studi a partire dalle prime fasi di implementazione del sistema Galileo, si è voluto, per questioni di spazio, restringere questa ricerca agli aspetti trattati nella parte sperimentale della Tesi.

Il Capitolo 4 della Tesi presenta una parte delle attività di ricerca svolte dal 2019 al 2022 nell'ambito del WP 5.3 "Field campaign" ed in particolare delle attività "Land urban and extra-urban data measurement campaigns" del Progetto europeo **GRC-MS (Galileo Reference Center – Member States)** GSA/GRANT/04/2016 co-finanziato da **EUSPA (EU Agency for the Space Programme)**, dall'Unione Europea e dal GeoSNav Lab, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste.

EUSPA, sotto la delegazione della Comunità Europea, ha assunto il ruolo di *Galileo Service Provider*. Come responsabile dell'operatività e del mantenimento del sistema Galileo, la missione primaria di EUSPA è quella di realizzare il monitoraggio indipendente e la valutazione della fornitura dei servizi di Galileo, tramite il Galileo Reference Centre (GRC). Esso è totalmente indipendente dal sistema e dagli operatori, sia rispetto alle soluzioni tecniche che alle operazioni di funzionamento. Il GRC fornisce al programma Galileo anche competenze relativamente alle performance del servizio, supporto alle analisi delle prestazioni del sistema e di possibili degradi dei servizi offerti e archiviazione dei dati relativi a questi aspetti durante la vita operativa del sistema. Quando possibile, il GRC verifica anche la compatibilità e interoperabilità fra Galileo e gli altri sistemi GNSS.

GRC comprende una struttura centrale localizzata a Noordwijk, Netherlands e gestisce dati e prodotti integrati da enti di ricerca partner e che appartengono a stati membri dell'Unione Europea, inclusi la Norvegia e la Svizzera (MS). I paesi che hanno firmato nel settembre 2017 un FPA (Framework Partnership Agreement) in supporto al GRC sono:

Austria, Francia, Germania, Italia, Norvegia, Polonia, Portogallo, Regno Unito, Repubblica Ceca, Romania, Spagna e Svezia. Questi paesi, tramite i partner che partecipano al Progetto, forniscono un supporto alle operazioni giornaliere e a campagne specifiche.

I contributi forniti nell'ambito del Progetto GRC-MS includono:

- Conferimento di dati da reti regionali e globali
- Prodotti di riferimento relativi alle orbite e agli orologi dei satelliti Galileo
- File di navigazione «Broadcast Galileo» BRDG
- Generazione di KPIs (Key Performance Indicators)
- Monitoraggio dei Signal in Space (SIS)
- Campagne Satellite Laser Ranging (SLR)
- Monitoraggio ionosferico
 - prodotti di riferimento relativi ai parametric ionosferici
 - valutazione delle prestazioni del modello NeQuick G
- Conferimento di dati da campagne di misura (con utilizzo di veicoli terrestri, marittimi e aerei) e di report relativi all'elaborazione e all'analisi dei dati;
- Competenze disponibili a livello degli Stati Membri.

Una parte importante relativa alla verifica delle prestazioni di Galileo da parte del GRC, riguarda la valutazione delle prestazioni sperimentate da un utente generico in diversi ambienti di propagazione del segnale.

Per questo motivo, in supporto al GRC e nell'ambito del Progetto GRC-MS, sono state svolte campagne periodiche di rilievo utilizzando ricevitori GNSS multi-costellazione.

Le campagne di rilievo di dati cinematici sono state condotte da gruppi di ricerca appartenenti a tre stati membri (Italia, Portogallo e Romania), in tre diversi ambiti (terrestre, aereo e marittimo) (WP 5.3 "Field campaigns").

L'analisi dei dati ha riguardato il confronto dei risultati ottenuti per ciascuno di questi domini, considerando le prestazioni del sistema Galileo utilizzato da solo e congiuntamente ad altri sistemi di posizionamento satellitare (GPS, GLONASS e BeiDou), mediante diverse attività sperimentali cinematiche.

A partire dalle necessità degli utenti e dai requisiti previsti per i diversi ambiti, sono state fatte diverse considerazioni relativamente ai set up sperimentali di misura e alle metodologie da utilizzare per la stima della "traiettoria di riferimento", integrate dai risultati numerici e da un'analisi dei motivi che stanno dietro possibili *under performance* del sistema con degrading della precisione o non funzionamenti.

Durante le attività progettuali sono stati messi a punto da parte dei partner settaggi hardware/software ottimizzati ad hoc in modo da garantire le migliori condizioni di acquisizione e testare le diverse combinazioni segnale/satellite e le diverse opzioni di elaborazione dei dati.

Le traiettorie elaborate della strumentazione rover e gli output prodotti sono stati confrontati con due diverse traiettorie di riferimento. La prima ottenuta mediante una

soluzione integrata GNSS/INS di elevata qualità (per le campagne di acquisizione aeree e terrestri). La seconda traiettoria di riferimento è stata ottenuta mediante una soluzione PPP GPS+GLONASS (NRCAN Natural Resources CANada) ed è stata utilizzata per tutte e tre i domini di applicazione (terrestre, marittimo ed aereo), con l'obiettivo di utilizzare una traiettoria omogenea per i tre ambiti.

Un ulteriore potenziale obiettivo posto all'inizio del Progetto riguarda l'analisi di eventuali miglioramenti delle precisioni del sistema satellitare Galileo nel corso del tempo legate all'implementazione del sistema. Questo aspetto verrà discusso nel Capitolo 4 e nelle conclusioni.

Le elaborazioni effettuate e descritte nel Capitolo 4 hanno riguardato il calcolo delle soluzioni PVT (Position Velocity Time) mediante tecniche di posizionamento geodetico interferenziale differenziale in modalità cinematica con relativa post-elaborazione dei dati registrati da un ricevitore GNSS Septentrio AsteRx-U collegato ad una antenna Septentrio PolaNt-x MF (utilizzato per tutte le campagne di misura) e da uno smartphone Xiaomi Mi8 (utilizzato solo nelle ultime due campagne di misura), installati a bordo di un veicolo MMS (Mobile Mapping System) del GeoSNav Lab, Università di Trieste e il successivo confronto con i dati provenienti dal sistema GPS/INS (INertial System) del MMS.

Le prestazioni del sistema satellitare Galileo sono state confrontate con quelle ottenute con il sistema GPS e il sistema GLONASS, nonché con le combinazioni GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo, sia in ambito urbano che extraurbano.

Nel paragrafo 4.2 sono state descritte le campagne di misura effettuate, partendo dalla pianificazione dei rilievi (par 4.2.1) e dalla descrizione in dettaglio della campagna di misura svolta a marzo 2022 (par. 4.2.2), le elaborazioni eseguite, i confronti con la traiettoria di riferimento GPS/INS MMS, le analisi svolte e i risultati ottenuti.

Sono stati infine presentati i confronti nel tempo (par. 4.3.1 e 4.3.2) relativi a tutte le campagne di misura effettuate da dicembre 2019 ad agosto 2022 ricavando i valori medi delle differenze planimetriche ed altimetriche rispetto alla traiettoria di riferimento, le deviazioni standard, il numero totale di soluzioni ottenute, il numero medio dei satelliti utilizzati nelle diverse sessioni di misura e il valore medio del parametro PDOP (Position Dilution Of Precision).

Da tutti i confronti effettuati sono state infine tratte delle conclusioni generali relativamente alle prestazioni del sistema satellitare Galileo nel campo della navigazione terrestre, in ambito urbano ed extraurbano, rimarcando come le ricerche e le attività presentate in questa tesi vanno intese come attività in divenire ("in progress") e dovranno essere continuate e ottimizzate nel tempo al fine di poter delineare meglio le caratteristiche e le performance del sistema e aprire la strada a studi che possano permettere un eventuale miglioramento ed un'estensione delle applicazioni e delle potenzialità di Galileo in campi come quello della navigazione di veicoli terrestri, particolarmente rilevanti anche nell'ambito degli ITS (Intelligent Transport Systems) al fine di migliorare sempre di più i servizi offerti agli utenti e la sicurezza in campo stradale.

I risultati presentati in questa Tesi sono stati co-finanziati dall'Unione Europea e dall'**European Union Agency for the Space Programme (EUSPA)** nell'ambito del progetto GRC-MS (Galileo Reference Center - Member States), Grant Agreement n° GSA/GRANT/04/2016 e dal **GeoSNav Lab (Geodesy and Satellite Navigation Laboratory)**, coordinato dalla Prof.ssa Raffaella Cefalo, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste.



2. I sistemi satellitari globali di navigazione

I sistemi satellitari globali di navigazione, noti come GNSS (Global Navigation Satellite System), sono dei sistemi composti da costellazioni di satelliti orbitanti attorno alla Terra, che tramite la trasmissione di particolari segnali, permettono agli utenti di identificare la propria posizione tridimensionale in ogni punto del pianeta.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati vari sistemi di questo tipo, in special modo per scopi militari, come ad esempio il sistema GPS sviluppato e mantenuto dal Dipartimento della Difesa statunitense e pienamente operativo dal 1992, diventando così il primo sistema GNSS ad entrare pienamente in funzione. Anche l'Unione Sovietica e in seguito la Federazione Russa, hanno sviluppato un loro sistema, il GLONASS, che ha subito un periodo di abbandono in seguito agli eventi del 1991 per poi essere reso nuovamente completamente operativo nel dicembre del 2011.

Il sistema di posizionamento Galileo, principale oggetto di questa Tesi ha cominciato a fornire alcuni servizi iniziali il 15 dicembre 2016, ma il completamento della costellazione è previsto per il 2023 [1].

Il sistema satellitare BeiDou invece ha iniziato la fase operativa regionale (nota come "Phase - II") coprendo il sud-est asiatico nel dicembre 2011 con una costellazione di 10 satelliti, 5 satelliti su orbita geostazionaria (Geostationary Orbit GEO) e 5 su orbita geosincrona inclinata (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit IGSO). Nel corso del 2012 sono stati lanciati altri 5 satelliti, 1 satellite su orbita GEO e 4 satelliti in orbita di tipo Medium Earth Orbit MEO portando a 14 il numero dei satelliti della costellazione [2].

Il 23 giugno 2020 è stato lanciato con successo il 55° e ultimo satellite BeiDou [3].

Due ulteriori sistemi satellitari di navigazione sono il sistema satellitare giapponese Quasi-Zenith QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) e il sistema di posizionamento satellitare regionale indiano (IRNSS da Indian Regional Navigational Satellite System). Tali sistemi riescono a servire solo alcune zone del globo poiché non coprono tutta la superficie terrestre.

Nei seguenti paragrafi saranno illustrate le caratteristiche tecniche di ognuno di questi sistemi e nei capitoli successivi verranno trattate le diverse metodologie operative utilizzabili per ottenere la propria posizione facendo uso dei GNSS.

2.1. Strutturazione dei sistemi GNSS

Un sistema GNSS è strutturato fondamentalmente in tre parti o segmenti (segment) principali (Figura 2.1):

- Il segmento di controllo (o segmento di terra): è la parte responsabile della corretta operatività del sistema;
- Il segmento spaziale: è la parte che comprende la costellazione di satelliti;
- Il segmento utente: è composto dai ricevitori GNSS che forniscono all'utente posizione, velocità e coordinate temporali precise [4].

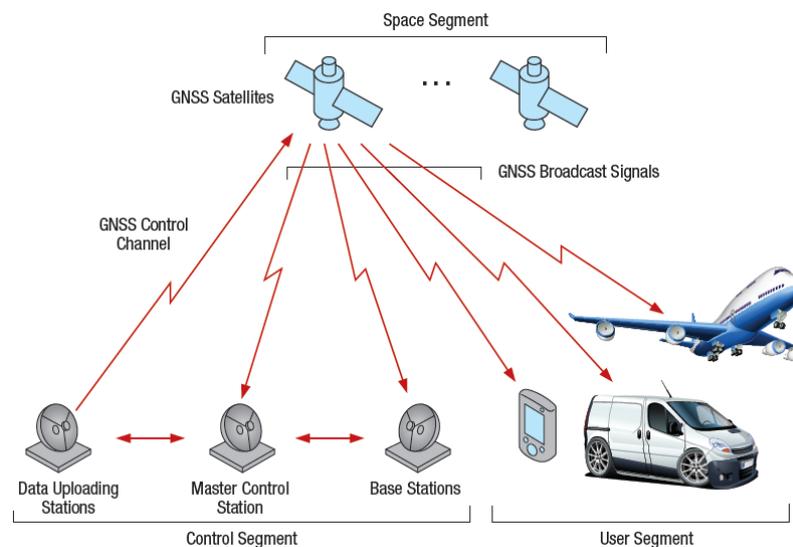


Figura 2.1 Segmenti di un sistema GNSS [5]

2.1.1. Il segmento di controllo

Il segmento di controllo (detto anche segmento di terra) è responsabile della corretta operatività del sistema GNSS. Le sue funzioni basilari sono:

- Controllare lo stato e mantenere l'integrità e l'accuratezza della costellazione satellitare;
- Utilizzare i dati delle stazioni di monitoraggio globali per calcolare le posizioni precise dei satelliti e predire le effemeridi cioè la posizione e velocità dei satelliti nello spazio;
- Mantenere la scala temporale corretta (attraverso l'utilizzo di orologi atomici) e aggiornare i messaggi navigazionali per tutti i satelliti;
- Eseguire la manutenzione dei satelliti e la risoluzione delle anomalie, incluso il riposizionamento dei satelliti per mantenere una costellazione ottimale.

Nei paragrafi successivi si illustreranno i vari segmenti di controllo dei sistemi GNSS.

2.1.2. Il segmento spaziale

I segmenti spaziali dei sistemi GNSS in fase operativa sono formati da costellazioni di satelliti concepiti in modo tale da garantire all'utente finale la visibilità di almeno quattro satelliti da ogni punto della Terra in qualsiasi momento.

Le principali funzioni del segmento spaziale sono quelle di generare e trasmettere i segnali di fase (carrier phase) modulati da codici (code). Queste trasmissioni sono controllate da orologi atomici altamente stabili installati a bordo dei satelliti.

Tutte le costellazioni GNSS trasmettono continuamente agli utenti su una o più frequenze in banda L (1-2 GHz) codici e i dati navigazionali inviati dal segmento di controllo che permettono all'utente di calcolare sia il tempo impiegato dal segnale per raggiungere il ricevitore (pseudodistanza), sia le posizioni orbitali dei satelliti stessi ad ogni epoca (effemeridi).

Le principali componenti del segnale trasmesso da un satellite sono le seguenti:

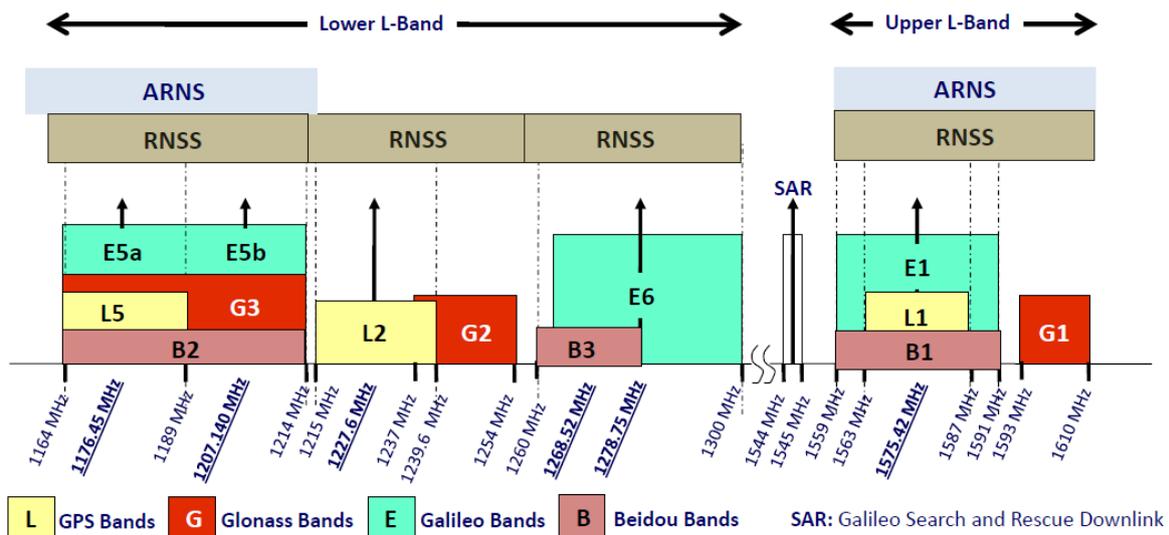
- *Carrier (Portante)*: è il segnale radio in forma sinusoidale a una data frequenza;
- *Ranging Code*: sequenza binaria che permette al ricevitore di determinare il tempo impiegato dal segnale nel tragitto satellite-ricevitore. Queste sequenze sono chiamate "PRN sequences" o "PRN code";
- *Navigation Data (Dati navigazionali)*: sono composti da un messaggio binario che fornisce lo stato di salute del satellite, informazioni sulle sue effemeridi, l'errore del suo orologio interno, l'almanacco (cioè le effemeridi di precisione ridotta relative a tutta la costellazione) ed altre informazioni complementari.

2.1.2.1. Assegnazione delle bande di frequenza

Siccome possono essere assegnate le stesse frequenze per differenti utilizzi in più Paesi e possono ricadere quindi nello stesso intervallo di spettro elettromagnetico, l'assegnazione delle bande di frequenza è un processo particolarmente complesso.

Per coordinare l'utilizzo dello spettro elettromagnetico nel mondo è stato quindi istituito l'ITU (International Telecommunications Union), un'agenzia delle Nazioni Unite che suddivide il suddetto spettro in bande dedicate ai diversi utilizzi (televisivi, radio, telefonico, trasmissioni satellitari ecc.).

In Figura 2.2 sono illustrate le bande assegnate ai servizi di navigazione radioassistita via satellite, Radionavigation Satellite service (RNSS).



ARNS: Aeronautical Radio Navigation Service RNSS: Radio Navigation Satellite Service

Figura 2.2 Assegnazione delle bande dei sistemi GNSS [6]

Come si può vedere dalla figura, ci sono due bande assegnate all’Aeronautical Radio Navigation Service (ARNS), collocate una nella parte superiore della banda L (1559-1610 MHz), che contiene la GPS L1, Galileo E1, GLONASS G1 e BeiDou B1, e una nella parte inferiore della banda L (1151-1214 MHz) in cui si trovano le bande GPS L5, GLONASS G3, Galileo E5 e BeiDou B2. Queste bande sono particolarmente indicate per applicazioni di tipo Safety of Life (SoL), poiché nessun utente in questa banda è autorizzato a interferire con i segnali GNSS.

I segnali GPS L2, GLONASS L2, Galileo E6 e BeiDou B3 si trovano nella banda 1215,60-1350 MHz. In queste bande operano anche i radar terrestri e servizi RNSS (Radio Navigation Satellite Service), per cui sono maggiormente suscettibili a interferenze rispetto ai segnali descritti precedentemente.

2.1.2.2. I satelliti

I satelliti, generalmente alimentati da pannelli fotovoltaici, possiedono diverse strutture e meccanismi per mantenere l’orbita prestabilita, comunicare con il segmento di controllo e trasmettere i segnali ai ricevitori a terra. Gli orologi dei satelliti, per i motivi illustrati in precedenza, sono uno degli elementi fondamentali di un sistema GNSS. I satelliti, per garantire un’elevata stabilità della misura del tempo, sono equipaggiati con orologi atomici ad altissima stabilità (al rubidio, al cesio, all’idrogeno).

Una descrizione dell’evoluzione tecnica dei satelliti dei vari sistemi GNSS sarà fatta all’interno dei paragrafi a essi dedicati.

2.1.3. Il segmento utente

Il segmento utente è composto da ricevitori GNSS. La loro funzione primaria è quella di ricevere i segnali GNSS, determinare gli pseudorange (e altri dati osservabili) e risolvere equazioni navigazionali per ottenere le coordinate del punto d'interesse e fornire un'accurata misura del tempo.

Gli elementi basilici che compongono un generico ricevitore GNSS sono:

- Un'antenna con preamplificazione;
- Una sezione elettronica dedicata alla ricezione delle frequenze radio;
- Un microprocessore;
- Un oscillatore di media precisione;
- Una sorgente di alimentazione;
- Una memoria per l'immagazzinamento dati;
- Un'interfaccia utente.

Si noti che la posizione è riferita al centro di fase dell'antenna, come sarà spiegato in modo esaustivo nei capitoli successivi.

Il progresso tecnologico ha portato alla progressiva miniaturizzazione dei ricevitori GNSS che al giorno d'oggi riescono ad avere dimensioni tali da essere installati nella circuiteria degli smartphone, che purtroppo non possono essere muniti di un'antenna adeguata.

2.2. Il sistema GPS

Il Global Positioning System (GPS), originariamente denominato Navstar GPS, è un sistema satellitare globale di navigazione di proprietà del governo degli Stati Uniti e gestito dalla United States Space Force (USSF) che sviluppa, mantiene e gestisce i segmenti spaziali e di controllo [7] [8] [9].

Il progetto GPS è stato sviluppato nel 1973 per utilizzi esclusivamente militari. Il GPS è stato creato e realizzato dal Dipartimento della Difesa statunitense (USDOD) con il lancio progressivo di 24 satelliti che hanno permesso di raggiungere dapprima l'Initial Operational Capability (IOC) e poi la Full Operational Capability (FOC) nel giugno 1995 [10].

Nel 1991 gli USA resero disponibile il servizio GPS per usi civili con il nome SPS (Standard Positioning System), con specifiche differenziate da quello riservato all'uso delle forze militari USA denominato PPS (Precision Positioning System). Il segnale civile era intenzionalmente degradato attraverso l'introduzione di errori nei segnali satellitari con lo scopo di ridurre l'accuratezza nel posizionamento, consentendo precisioni dell'ordine di 100–150 m. Tale degradazione del segnale, denominata Selective Availability (SA) è stata disabilitata dal mese di maggio 2000, grazie ad un decreto del presidente degli Stati Uniti Bill Clinton.

2.2.1. GPS: il segmento di controllo

Il segmento di controllo GPS è costituito da una rete globale di strutture a terra che tracciano i satelliti GPS, monitorano le loro trasmissioni, eseguono analisi e inviano comandi e dati alla costellazione.

L'attuale segmento di controllo operativo (OCS) comprende una stazione di controllo principale Master Control Station (MCS), una stazione di controllo principale alternativa, Alternate Master Control Station (AMCS), 11 antenne di comando e controllo Ground Antennas (GA), e 16 siti di monitoraggio, Monitoring Stations (MS) [11].

- La Master Control Station è situata a Colorado Springs negli USA è il centro nevralgico del segmento di controllo del sistema GPS. È responsabile del funzionamento del sistema e del servizio di comando, controllo e manutenzione per il segmento spaziale. Attualmente utilizza sistemi separati, Architecture Evolution Plan (AEP) e Launch/Early Orbit, Anomaly Resolution, and Disposal Operations (LADO) per controllare i satelliti operativi e non operativi. Una nuova, completamente funzionante stazione di riserva nota come Alternate Master Control Station (AMCS) è stata approntata alla Vandenberg Air Force Base negli USA.
- Le Monitoring Stations sono distribuite in diversi punti della Terra e sono munite di orologi atomici e ricevitori GPS per raccogliere continuamente i dati provenienti da tutti i satelliti GPS di cui vengono acquisiti i segnali. I dati raccolti sono inviati alla

Master Control Station, per essere processati con il fine di stimare le orbite dei satelliti (le effemeridi), gli errori d'orologio e per generare il messaggio navigazionale. Prima della modernizzazione del sistema, la rete delle Monitoring Stations comprendeva cinque siti dell'United States Air Force (USAF) per poi aggiungerne una sesta nel 2001. Con la modernizzazione iniziata nel 2005 questa rete fu espansa integrando le Monitoring Stations dell'US Department of Defense (DoD) gestite dalla National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) aggiungendo così ulteriori 10 stazioni. In totale si hanno quindi 16 stazioni, 6 dell'USAF e 10 della NGA.

- Le Ground Antennas (GA) sono quattro e sono collocate in siti in cui sono già presenti delle Monitoring Stations, ma sono presenti anche 7 Remote Tracking Stations dell'Air Force Satellite Control Network (AFSCN). Le Ground Antennas trasmettono i dati ai satelliti attraverso segnali radio sulla banda S (la banda che va da 2 a 4 GHz). Questi dati includono le correzioni degli orologi trasmessi nel messaggio navigazionale così come i comandi telemetrici dalla Master Control Station e le effemeridi. Ogni satellite può ricevere questi dati tre volte al giorno, ma normalmente ciò avviene una sola volta al dì.

GPS Control Segment

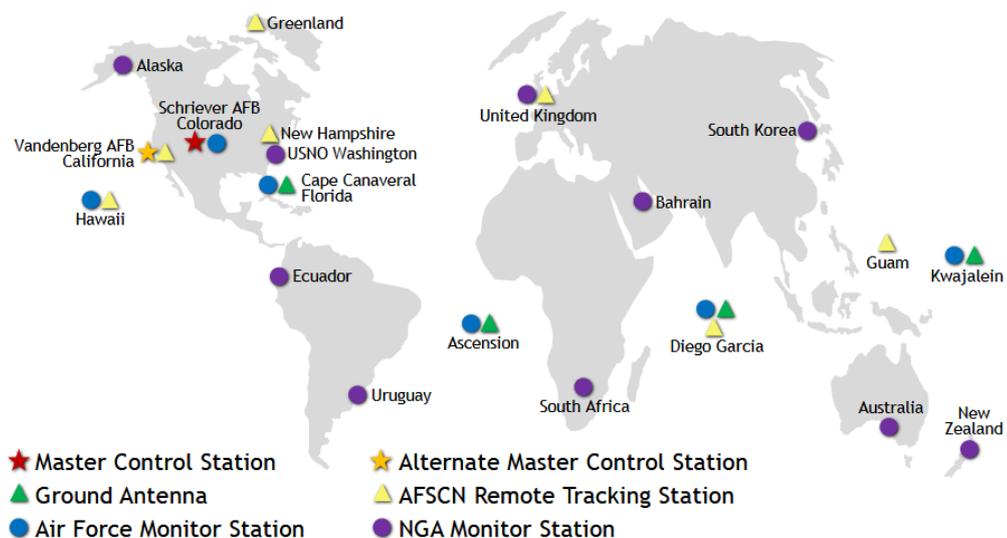


Figura 2.3 Segmento di controllo GPS [11]

In futuro, il Launch/Early Orbit, Anomaly Resolution, and Disposal Operations (LADO) e l'intero segmento di controllo GPS saranno sostituiti con il Next Generation Operational Control System (OCX) [12].

2.2.2. GPS: il segmento spaziale

2.2.2.1. GPS: la costellazione

Gli Stati Uniti si impegnano a mantenere la disponibilità di almeno 24 satelliti GPS operativi, per il 95% del tempo.

Per garantire questo impegno, la United States Space Force (USSF) ha mantenuto in funzione 31 satelliti GPS operativi per oltre un decennio. Infatti la USSF mantiene in funzione più di 24 satelliti GPS per mantenere la copertura ogni volta che qualche satellite della costellazione viene sottoposto a manutenzione o dismesso. I satelliti extra possono aumentare le prestazioni GPS ma non sono considerati parte della costellazione centrale.

I satelliti GPS sono ubicati in sei piani orbitali equidistanti, nei quali trovano posto quattro "slot", uno per satellite, in modo da garantire almeno 4 satelliti in vista da ogni punto del pianeta. Questi satelliti sono situati a una quota di 20200 km in una fascia nota come Medium Earth Orbit (MEO), con un'inclinazione di 55° rispetto all'equatore. Le orbite sono quasi circolari con un'eccentricità minore di 0.02, un semiasse maggiore di 26560 km e un periodo nominale di 11 ore, 58 minuti e 2 secondi pari a 12 ore siderali (le ore siderali differiscono da quelle terrestri a causa del movimento della Terra attorno al Sole).

Nel giugno 2011, la USSF ha completato con successo un'espansione della costellazione GPS nota come configurazione "Expandable 24". Tre dei 24 slot sono stati ampliati e sei satelliti sono stati riposizionati, in modo che tre dei satelliti extra diventassero parte della costellazione operativa. Di conseguenza, il GPS ora funziona effettivamente come una costellazione a 27 "slot" con un miglioramento della copertura su tutto il globo [13].

2.2.2.2. GPS: i satelliti

I satelliti della costellazione GPS sono un insieme di nuovi e vecchi satelliti suddivisi in "blocchi", ogni blocco raggruppa un insieme di satelliti lanciati in un certo intervallo temporale. Di seguito è riportata una descrizione dei differenti blocchi [14].

Block I, Navigation Development Satellites. Il primo blocco della costellazione fu lanciato fra il 1978 e il 1985 e consisteva in 11 satelliti con un peso di circa 845 kg e sebbene alcuni satelliti abbiano raggiunto 10 anni di operatività, avevano una vita operativa di 4.5 anni. Non erano ancora predisposti per indurre la Selective Availability (S/A) ed erano capaci di fornire servizi di navigazione a terra per 3 o 4 giorni senza alcun contatto con il Centro di Controllo.

Block II/IIA, Operational Satellites. Il secondo blocco consiste in 28 satelliti lanciati dal 1989 al 1997. Avevano un peso di 1500 kg ed una vita operativa di 7.5 anni, anche se alcuni di essi sono stati operativi per 26 anni. Dal 1990 fu lanciato il blocco IIA (avanzato) con

capacità d'intercomunicazione e di fornire servizi di navigazione a terra per 180 giorni senza alcun contatto con il centro di controllo, anche se nella normale modalità operativa dovevano comunicare giornalmente. Ad oggi sono stati tutti dismessi.

Block IIR, Replacement Operational Satellites. Furono progettati per sostituire i satelliti del secondo blocco che presentavano avarie o che raggiungevano il loro ciclo vitale, la lettera "R" nel blocco IIR riportava il termine "Replenishment" (ricostituzione o riapprovvigionamento). Con una vita operativa di 10 anni ed un peso di 2000 kg, questi satelliti erano capaci, tramite l'implementazione della funzionalità AUTONAV, di determinare autonomamente la loro orbita e di generare il proprio messaggio navigazionale, oltre a fornire misure di distanza fra loro e di trasmettere osservazioni ad altri satelliti o al segmento di controllo.

Erano concepiti per operare autonomamente per circa 6 mesi senza alcun contatto con il centro di controllo senza perdere precisione nell'accuratezza delle effemeridi.

Block IIR-M, Modernised Satellites. Questo blocco è un aggiornamento del precedente "IIR", completando così la costellazione GPS. Il primo satellite di questa tipologia fu lanciato nel settembre del 2005 e l'ultimo nell'agosto del 2009. Questa generazione di satelliti include un nuovo segnale militare M-Code e il nuovo segnale civile L2C.

Block IIF, Follow-on Operational Satellites. Il primo satellite di questo blocco fu lanciato nel maggio del 2010 e la sua principale caratteristica è l'estensione delle funzionalità della serie IIR-M introducendo un terzo segnale civile "L5" ubicato in una banda di frequenze protetta e utilizzata per "applicazioni salva-vita" (Safety-Of-Life applications). I satelliti di questo blocco hanno una vita operativa teorica di 15 anni e sono dotati di orologi atomici avanzati (2 orologi atomici uno al rubidio e uno al cesio con temporizzazione ad alta stabilità). La loro vita operativa stimata è di 12 anni.

Block III Satellites. Consiste in un'evoluzione maggiore del Blocco II, in parte dovuta all'evoluzione dei satelliti, ma anche agli aggiornamenti al segmento di controllo. Il Block III è necessario per completare l'implementazione delle capacità del segnale L2C e L5 iniziata con i satelliti dei blocchi IIR-M e IIF. La nuova generazione di satelliti GPS, con una vita operativa stimata di 15 anni, introduce anche miglioramenti significativi nelle capacità di navigazione, migliorando l'interoperabilità e la resistenza dei propri segnali al "jamming". Il jamming è un processo volto a rendere indecifrabile un segnale ai destinatari previsti. Questo processo è comunemente ottenuto trasmettendo un secondo segnale di potenza e larghezza di banda sufficiente per disturbare il segnale originale. I satelliti di questo blocco trasmettono il quarto segnale civile sulla banda L1 (L1C) interoperabile con altri segnali GPS e offrono la piena capacità di utilizzare il segnale militare M-Code. Prevede inoltre di fornire prestazioni migliorate per una maggiore precisione del sottosistema e una migliore risoluzione delle anomalie. Contiene più standard di frequenza atomica (orologi al rubidio),

una temporizzazione ad alta stabilità e un monitoraggio automatizzato dell'integrità. Il primo lancio è stato a dicembre 2018 ed è composto da 10 unità.

Block III Satellites Follow-on Operational Satellites. I satelliti di questo blocco introdurranno nuove capacità per soddisfare le crescenti richieste degli utenti sia militari che civili. Manterranno le caratteristiche tecniche basilari del blocco III, ma riducendo le dimensioni complessive, il peso e la potenza necessari per soddisfare il posizionamento, la navigazione, la temporizzazione e il sistema di rilevamento della detonazione nucleare Nuclear Detonation Detection System (NDS) ridisegnato. Questo nuovo blocco di satelliti cerca anche di portare a bordo nuove caratteristiche ospitando un modulo di ricerca e salvataggio, Search And Rescue (SAR), progettato per assistere nelle missioni di ricerca e salvataggio globale. Consente inoltre misurazioni di precisione della loro distanza, ospitando un apparato di riflettori laser. Con questo blocco si affronterà il consolidamento della telemetria, del monitoraggio e delle frequenze di comando, consentendo la conformità con la banda S unificata. Infine, il programma cercherà di aumentare le capacità anti-jam per i militari con una capacità di protezione militare regionale.

I satelliti GPS sono identificati in modi differenti:

- Dalla loro posizione nel piano orbitale;
- Dal loro numero di riferimento NASA;
- Dal loro codice Pseudo Random Noise (PRN);
- Dal loro Space Vehicle Number (SVN).

La costellazione GPS raggiunse la piena capacità operativa (Full Operative Capability, FOC), nel marzo del 1994, quando 24 satelliti del blocco II e IIA furono operativi nelle loro orbite assegnate. Nonostante ciò la FOC non fu dichiarata fino al 17 luglio 1995.

Il numero di satelliti per blocco, insieme a un riassunto delle caratteristiche dei satelliti dei vari blocchi è riportato in Figura 2.4:

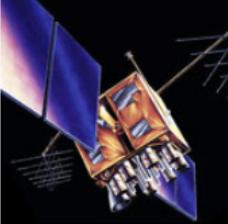
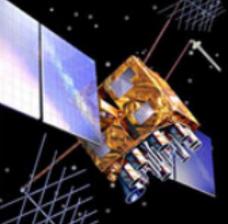
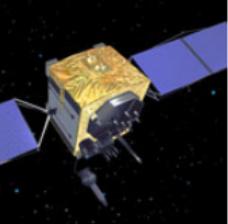
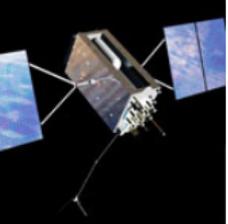
LEGACY SATELLITES		MODERNIZED SATELLITES		
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR-M	BLOCK IIF	GPS III/IIF
0 operational	7 operational	7 operational	12 operational	5 operational
<ul style="list-style-type: none"> Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users Precise P(Y) code on L1 & L2 frequencies for military users 7.5-year design lifespan Launched in 1990-1997 Last one decommissioned in 2019 	<ul style="list-style-type: none"> C/A code on L1 P(Y) code on L1 & L2 On-board clock monitoring 7.5-year design lifespan Launched in 1997-2004 	<ul style="list-style-type: none"> All legacy signals 2nd civil signal on L2 (L2C) LEARN MORE → New military M code signals for enhanced jam resistance Flexible power levels for military signals 7.5-year design lifespan Launched in 2005-2009 	<ul style="list-style-type: none"> All Block IIR-M signals 3rd civil signal on L5 frequency (L5) LEARN MORE → Advanced atomic clocks Improved accuracy, signal strength, and quality 12-year design lifespan Launched in 2010-2016 	<ul style="list-style-type: none"> All Block IIF signals 4th civil signal on L1 (L1C) LEARN MORE → Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity No Selective Availability LEARN MORE → 15-year design lifespan IIF: laser reflectors; search & rescue payload First launch in 2018

Figura 2.4 Numero e caratteristiche dei satelliti dei vari blocchi [13]

2.2.2.3. GPS: i segnali

Gli oscillatori a bordo dei satelliti generano una frequenza nominale f_0 pari a 10.23 MHz, tale frequenza è caratterizzata da elevatissima stabilità.

I segnali del sistema GPS sono trasmessi nella banda L e prendono il nome di Link 1 (L1) e Link 2 (L2), denominate anche come banda L1 e banda L2. Questi due segnali sono trasmessi con polarità circolare destrorsa e le loro frequenze sono derivate dalla frequenza fondamentale f_0 . Le caratteristiche fondamentali delle due portanti generate dal segnale GPS sono riportate nella Tabella 2.1:

Banda	Frequenza	Lunghezza d'onda
L1	$154 \times 10.23 \text{ MHz} = 1575.420 \text{ MHz}$	19.029 cm
L2	$120 \times 10.23 \text{ MHz} = 1227.600 \text{ MHz}$	24.421 cm

Tabella 2.1 Frequenze e lunghezze d'onda delle portanti GPS L1 e L2

Sono trasmessi inoltre due ulteriori segnali, il segnale L3 associato al Nuclear Detonation Detection System e il segnale L4 per altri scopi militari [6].

Con la generazione di satelliti del blocco IIF oltre alle bande sopra citate è stata istituita la banda L5 e con i satelliti del blocco III è stato introdotto il quarto segnale civile sulla banda L1 (L1C). Di queste due bande si parlerà esaurientemente nei paragrafi successivi.

Il sistema GPS utilizza come metodo di modulazione il Binary Phase Shift Keying (BPSK) e la tecnica Code Division Multiple Access (CDMA) per emettere diversi segnali sulla stessa frequenza radio.

Si noti che nell'attuale sistema GPS sono disponibili due tipologie di servizio:

Standard Positioning Service (SPS): È un servizio di posizionamento e temporizzazione disponibile per uso civile, commerciale e scientifico pacifico.

Dal 2020 include diversi segnali sulle bande L1 L2 e L5 [15], mentre precedentemente era un servizio che utilizzava una singola frequenza all'interno della banda L1.

Precise Positioning Service (PPS): È un servizio ristretto mediante tecniche crittografiche a utenti civili autorizzati e per scopi militari.

Il PPS è un servizio di posizionamento e temporizzazione fornito tramite accesso autorizzato ai segnali trasmessi sulle frequenze GPS L1 e L2. La frequenza L1, trasmessa da tutti i satelliti Navstar, contiene un segnale di codice Coarse Acquisition (C/A), con un messaggio navigazionale, disponibile per un pacifico uso civile, commerciale e scientifico; e un segnale di codice "di precisione" (P) con messaggio di dati navigazionali, riservato ad utilizzatori autorizzati. Il codice P viene normalmente alterato crittograficamente generando il codice Y che non è disponibile per gli utenti che non dispongono di chiavi crittografiche valide. I satelliti Navstar trasmettono anche un secondo segnale a codice P o Y (P(Y)) con un messaggio di dati navigazionali sulla frequenza L2. Il messaggio navigazionale è identico su tutti i codici e le frequenze, ma alcune porzioni del messaggio sono normalmente alterate crittograficamente in modo da non essere disponibili per gli utenti che non dispongono di chiavi crittografiche valide [16].

I segnali sono forniti sulle frequenze L1 e L2 il che permette, come si vedrà nei capitoli successivi, di eliminare l'errore legato alla rifrazione ionosferica che è una delle maggiori fonti di errore.

Sulle due portanti sono modulati inoltre i seguenti tipi di codice PRN e messaggi:

- *Coarse/Acquisition (C/A) code, conosciuto anche come codice civile C(t):* Questa sequenza contiene 1023 bits ed è ripetuta ogni millisecondo (si hanno quindi 1.023 Mbps). Il codice C/A è modulato solo sulla banda L1.
- *Precision code, P(t):* Questo codice è riservato ad utenti civili autorizzati e per scopi militari. La sequenza, chiamata sequenza PRN (Pseudo Random Noise) è ripetuta

ogni 266 giorni e una porzione settimanale di questo codice è assegnata ad ogni satellite. Questo segnale trasmette 10 Mbps ed è modulato su entrambe le bande L1 ed L2.

- *Navigation Message, D(t)*: Questo messaggio è modulato su entrambe le portanti a 50 bps e al suo interno sono inclusi i dati riguardanti le effemeridi dei satelliti, la deriva degli orologi a bordo dei satelliti, i coefficienti necessari per l'utilizzo della correzione ionosferica, lo stato della costellazione ed altre informazioni.

Per restringere l'accesso agli utenti civili all'accuratezza massima del sistema furono introdotte le seguenti protezioni:

- *S/A o Selective Availability*: Era un sistema di degradazione intenzionale della precisione dell'orologio interno (chiamato processo δ) e di manipolazione delle effemeridi (processo ϵ). Gli effetti sulla precisione del posizionamento orizzontale oscillano da circa 10 m con la S/A disattivata a 100 m con la S/A attivata. Il processo δ agisce direttamente sulla frequenza fondamentale dell'orologio, che ha un impatto diretto sugli pseudorange calcolati dai ricevitori a terra mentre il processo ϵ consiste nell'alterare le informazioni relative alle orbite. Il 2 maggio 2000 il presidente degli USA Bill Clinton ha ordinato la cessazione della S/A. La S/A è stata infine permanentemente rimossa nel 2008 e non prevista nelle generazioni di satelliti successive a tale data.
- *A/S o Anti-Spoofing*: Questo sistema consiste nella cifratura del codice P, che combinato con un altro codice segreto W, genera un codice detto Y che è modulato sulle due portanti L1 ed L2. Il fine di questa cifratura è quella di proteggere i ricevitori militari contro un eventuale nemico che provi a trasmettere una copia alterata del segnale per indurre in errore i ricevitori. Un altro fine è quello di negare l'accesso a utenti non autorizzati all'utilizzo del codice P sulle frequenze L1 e L2.

2.2.2.3.1. GPS: i nuovi segnali

La modernizzazione dei segnali GPS include l'aggiunta della banda L5 e numerosi altri codici sulle differenti portanti. Questi nuovi codici sono noti come segnali civili L1C, L2C, L5C e il codice militare M. Tutti questi segnali sono trasmessi con polarità circolare destrorsa.

Il segnale civile L1 C/A continuerà ad essere trasmesso, si avranno quindi un totale di quattro segnali GPS civili. Chiaramente gli utenti dovranno aggiornare o sostituire le loro apparecchiature per beneficiare dei nuovi segnali.

I nuovi segnali civili vengono gradualmente introdotti con il lancio, da parte dell'Air Force, di nuovi satelliti in sostituzione di quelli più vecchi. La maggior parte dei nuovi segnali sarà di utilità limitata fino a quando non saranno trasmessi da un numero di 18 - 24 satelliti.

La modernizzazione del sistema GPS incominciò nel 2005 con il lancio del primo satellite di tipo IIR-M. Questo satellite supportava il nuovo segnale militare M e il secondo segnale

civile L2C. Quest'ultimo segnale è stato concepito per soddisfare le richieste del mercato, permettendo lo sviluppo di ricevitori GPS a doppia frequenza a basso costo.

Il codice L2C è composto da due codici: il codice L2 Civil Moderate (L2CM) e il codice L2 Civil Long (L2CL). Il codice L2C è modulato mediante Binary Phase Shift Keying (BPSK) sulla banda L2 e trasmesso a una potenza effettiva più alta rispetto al segnale L1 C/A originale. Questo aspetto insieme alle potenti proprietà di correlazione incrociata, facilita la riconoscibilità fra satellite e satellite con grandi dispersione del livello di segnale, rendendo la ricezione migliore sotto la vegetazione ed anche in ambienti interni [17].

I segnali del codice militare M sono progettati per utilizzare gli estremi della banda con solamente una minima sovrapposizione del segnale sui preesistenti codici C/A e P(Y). Il codice militare M è modulato sulle portanti L1 e L2 utilizzando lo schema Binary Offset Carrier (BOC), ed è concepito per fare in modo che un ricevitore possa acquisirlo senza accedere ai codici C/A o P(Y).

La modernizzazione del sistema GPS continuò con il lancio dei satelliti del blocco IIF, che introdussero per la prima volta il terzo segnale civile sulla banda L5 (all'interno della banda altamente protetta ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service)). Il segnale L5 è dotato di maggiore potenza, maggiore larghezza di banda, nuovo tipo di modulazione ed è stato progettato per un'utenza che richiede applicazioni di tipo Safety-of-Life (SoL).

Al 26 giugno 2022 è trasmesso da 17 satelliti per arrivare a 24 satelliti nel 2027 [17].

Sono presenti due componenti del segnale: la L5-I composta da una modulazione BPSK con dati e codice e la L5-Q in quadratura rispetto la precedente, senza dati ma con codice modulato sempre mediante BPSK. Questo segnale grazie alla sua alta potenza possiede una migliore resistenza alle interferenze, inoltre grazie al maggior numero di impulsi al secondo (chipping rate, misurato in Megachips al secondo, Mcps) rispetto al codice C/A ha migliori performance nel caso di multipath.

Attualmente la banda L5 rimane pre-operativa e dovrebbe essere utilizzata a rischio e pericolo dell'utente fino a quando non verrà dichiarata operativa.

Il passo successivo è avvenuto con il lancio dei satelliti del blocco III, che hanno introdotto il quarto segnale civile sulla banda L1 (L1C). Questo segnale è progettato per abilitare l'interoperabilità fra GPS e in altri sistemi di navigazione satellitare come Galileo ed è modulato con il metodo MBOC (Multiplexed Binary Offset Carrier) per migliorare la ricezione nelle città e altri ambienti difficili. Anche il sistema satellitare Quasi-Zenith giapponese (QZSS) e il sistema cinese BeiDou stanno adottando segnali simili. La banda L1C comprende il canale dati L1C-I e il canale L1C-Q per il controllo. Questo segnale sarà trasmesso sulla stessa frequenza del preesistente segnale L1-C/A, che sarà mantenuta per garantire la retrocompatibilità.

Al 26 giugno 2022 è trasmesso da 5 satelliti per arrivare a 24 satelliti in circa 8 anni [17].

Nella Tabella 2.2 e nella Figura 2.5 sono esposti i differenti segnali GPS attuali e futuri, con le frequenze e modulazioni applicate:

Link	Carrier freq. (MHz)	PRN code	Modulation Type	Code rate (Mcps)	Data Rate (bps)	Service
L1	1575.420	C/A	BPSK (1)	1.023	50	Civil
		P	BPSK(10)	10.23	50	Military
		M	BOC _{sin} (10,5)	5.115	N/A	Military
		L1C-I data	MBOC(6,1,1/11)	1.023	50	Civil
		L1C-Q pilot			-	
L2	1227.600	P	BPSK(10)	10.23	50	Military
		L2C M L	BPSK(1)	1.023	25	Civil
			M		BOC _{sin} (10,5)	N/A	Military
L5	1176.450	L5-I data	BPSK(10)	10.23	50	Civil
		L5-Q pilot			-	

Tabella 2.2 Segnali GPS attuali e futuri [6]

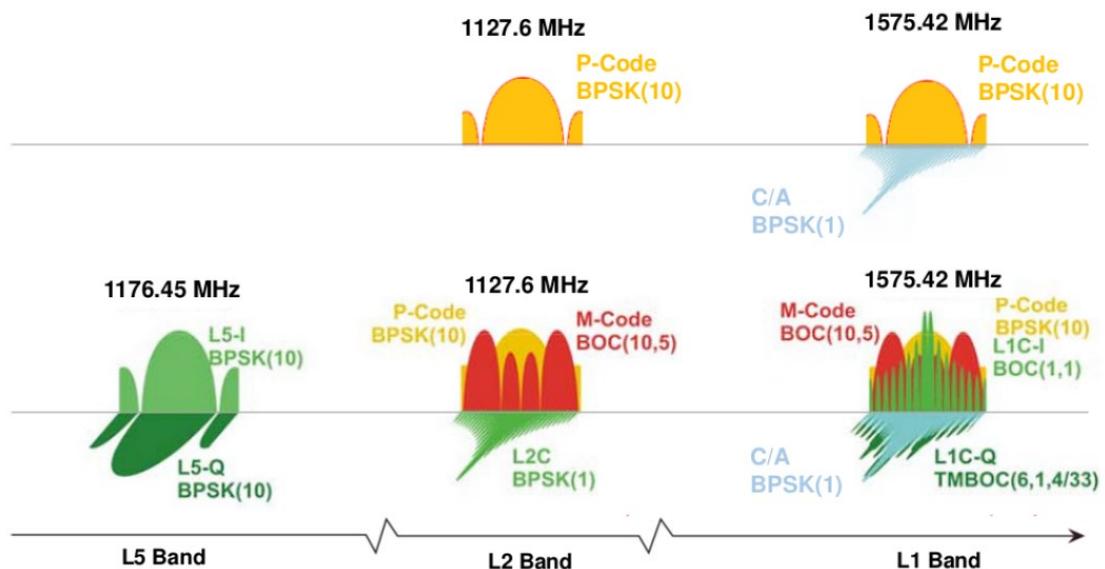


Figura 2.5 Spettro dei segnali GPS prima (parte superiore figura) e dopo la modernizzazione (parte inferiore figura) [6]

2.2.2.4. GPS: messaggio navigazionale

Ogni satellite riceve dalle antenne a terra del segmento terrestre i dati navigazionali che i satelliti GPS poi trasmettono all'interno del messaggio navigazionale ai ricevitori dell'utenza.

Il messaggio navigazionale contiene tutte le informazioni necessarie ai ricevitori degli utenti per calcolare la loro posizione, cioè:

- I parametri delle effemeridi, necessarie per calcolare le coordinate dei satelliti con sufficiente precisione;
- Gli almanacchi che permettono il calcolo della posizione di tutti i satelliti della costellazione, necessari per l'acquisizione del segnale da parte del ricevitore;
- La correzione dell'orologio e i parametri temporali, necessari per calcolare le conversioni temporali e l'asincronismo fra gli orologi atomici dei satelliti;
- I parametri del modello ionosferico, per ridurre l'errore ionosferico nei ricevitori a singola frequenza;
- I parametri di servizio con le informazioni riguardanti lo stato di salute del satellite.

L'almanacco è aggiornato almeno ogni sei giorni mentre le effemeridi e i parametri riguardanti gli orologi sono solitamente aggiornati ogni due ore.

Il messaggio navigazionale (Navigation Message NAV) è modulato su entrambe le portanti a 50 bps. L'intero messaggio, che richiede 12.5 minuti per essere trasmesso, contiene 25 pagine o "frames" lunghi 30 s l'uno, formando il messaggio completo "master frame". Ogni frame è suddiviso in cinque "subframes" di 6 secondi l'uno; composti da 10 parole di 30 bits l'una.

Ogni subframe inizia sempre con il termine di telemetria TLM che sta per "telemetry", necessaria per la sincronizzazione, a cui segue il termine di trasferimento (HOW). Il termine di trasferimento fornisce le informazioni temporali (i secondi della settimana GPS), permettendo al ricevitore di acquisire il segmento di codice P(Y).

I contenuti di ogni subframe sono i seguenti:

- *Subframe 1*: contiene le informazioni sui parametri che vanno applicati per la correzione al tempo determinato dall'orologio atomico del satellite. Questi valori sono coefficienti polinomiali che permettono di convertire il tempo a bordo del satellite in tempo GPS;
- *Subframe 2 e 3*: contiene le effemeridi del satellite;
- *Subframe 4*: fornisce le informazioni sul Coordinated Universal Time UTC, parte dell'almanacco e indicazioni se la selective availability (che trasforma il codice P nel codice criptato Y) è attiva o meno. Fornisce inoltre i parametri necessari per definire il modello ionosferico (per poter correggere la rifrazione ionosferica);
- *Subframe 5*: contiene i dati sullo stato della costellazione e dell'almanacco permettendo la rapida identificazione del satellite da cui proviene il segnale. Per completare l'almanacco sono necessari 25 "frames".

I subframes 1, 2 e 3 sono trasmessi con ogni frame (cioè vengono ripetuti ogni 30 s). I subframes 4 e 5 contengono diverse pagine (25 ciascuno) del messaggio navigazionale.

La trasmissione del messaggio navigazionale completo necessiterà quindi di un tempo pari a: $25 \times 30 \text{ s} = 750 \text{ s} = 12.5 \text{ min}$.

I dati dell'almanacco per tutti i satelliti in orbita possono essere ottenuti da un singolo satellite poiché i contenuti dei subframes sono comuni a tutti i satelliti.

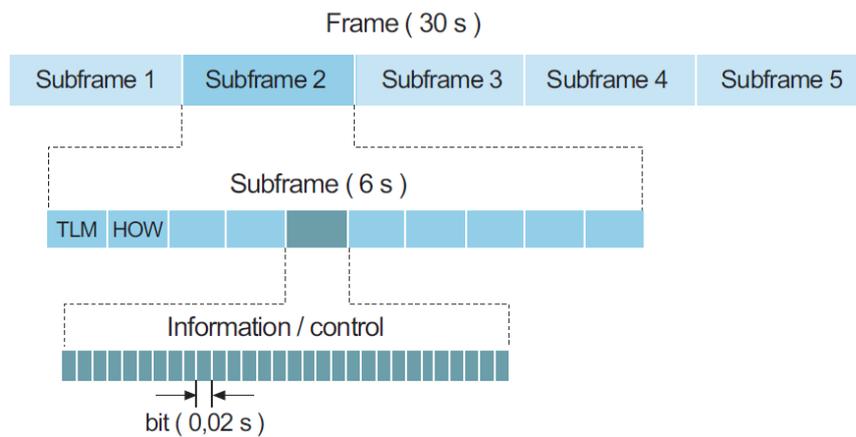


Figura 2.6 Struttura del messaggio navigazionale GPS prima della modernizzazione [6]

Con la cosiddetta modernizzazione del sistema GPS sono stati introdotti quattro nuovi messaggi:

- CNAV
- CNAV-2
- L5-CNAV
- MNAV

I primi 3 messaggi sono messaggi civili, mentre il messaggio MNAV è un messaggio militare. Questi messaggi forniscono dati navigazionali più accurati e frequenti rispetto al messaggio NAV precedente alla modernizzazione.

I messaggi CNAV e MNAV hanno una struttura e un formato dati simile. Il nuovo formato permette un miglior controllo dei contenuti e più flessibilità, poiché il messaggio è costituito non più da frames, ma da pacchetti dove i singoli messaggi possono essere trasmessi in un ordine flessibile con cicli di ripetizione variabili. Sono previsti inoltre metodi di rilevazione e correzione degli errori come il Cycle Redundancy Check (CRC) e il Forward error Correction (FEC). Il messaggio MNAV include anche nuovi miglioramenti per la sicurezza e robustezza del messaggio.

Il messaggio L5-CNAV, modulato sul segnale L5I, contiene sostanzialmente le stesse informazioni dei messaggi NAV e CNAV, ma in un formato differente. Il messaggio CNAV-2, modulato sul segnale L1C-I, fornisce dati più accurati ed è diviso in frames che sono suddivisi in tre subframes.

2.2.3. Performance del sistema GPS

L'accuratezza in termini di posizionamento e di sincronizzazione temporale per il GPS in modalità Standard Positioning Service (SPS) è riportata nella Tabella 2.3.

Position/Time Accuracy Standard	Conditions and Constraints
Global Average Position Accuracy <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 8 m 95% Horizontal Error • ≤ 13 m 95% Vertical Error 	<ul style="list-style-type: none"> • Defined for a position/time solution meeting the representative user conditions • Position/time solution is available
Worst Site Position Accuracy <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 15 m 95% Horizontal Error • ≤ 33 m 95% Vertical Error 	<ul style="list-style-type: none"> • Defined for a position/time solution meeting the representative user conditions • Position/time solution is available
Global Average Velocity Accuracy <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 0.2 m/sec 95% velocity error, any axis 	<ul style="list-style-type: none"> • Defined for a position/velocity/time solution meeting the representative user conditions • Position/velocity/time solution is available
Time Transfer Accuracy <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 30 ns Time Transfer error 95% of time (SIS only) 	<ul style="list-style-type: none"> • Defined for a time transfer solution meeting the representative user conditions • Time transfer solution is available

Tabella 2.3 Accuratezza in termini di posizione/velocità/tempo per il sistema GPS in modalità SPS [18]

I dati riportati nella tabella sono tratti dai documenti di specifica delle prestazioni del GPS SPS cioè [18]. Stando a quanto riportato da [19], il servizio Precise Positioning Service (PPS) raggiunge prestazioni simili a quelle dello Standard Positioning Service (SPS) con la Selective Availability (S/A) disattivata.

2.3. Il sistema GLONASS

Il GLONASS (russo: ГЛОНАСС; Глобальная НАвигационная Спутниковая Система; **Global'naja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema** o **GLObal NAVigation Satellite System**) è un sistema satellitare globale di navigazione russo, gestito dalle Forze Spaziali Russe autonomo e indipendente agli altri sistemi GNSS come il GPS statunitense e il sistema di posizionamento europeo Galileo.

Lo sviluppo del sistema GLONASS iniziò nel 1976. Dal 12 ottobre 1982 iniziarono le messe in orbita dei satelliti per raggiungere il completamento della costellazione nel 1995.

Dopo un declino del sistema verso la fine degli anni '90, nel 2001, il ripristino del sistema è diventato prioritario e si ebbe un incremento degli investimenti tale da raggiungere, nel 2010, un terzo dell'intero budget dell'Agenzia Spaziale della Federazione Russa.

Dal 2010 il sistema GLONASS riuscì a servire l'intera Federazione Russa e dall'ottobre 2011 raggiunse nuovamente la copertura globale.

2.3.1. GLONASS: il segmento di controllo

Similmente a quanto visto per la costellazione GPS, il segmento di controllo del sistema GLONASS monitora lo stato dei satelliti, determina le effemeridi e gli scarti degli orologi rispetto al GLONASS Time e al Coordinated Universal Time (UTC), infine due volte al giorno, invia i dati navigazionali ai satelliti [6].

Il segmento di controllo GLONASS comprende:

- Il System Control Center (SCC) situato a Krasnoznamenensk (nella regione di Mosca), coordina tutte le funzioni e operazioni principali, processa informazioni provenienti dalle Command e Tracking Stations per determinare lo stato degli orologi e le orbite dei satelliti, infine aggiorna il messaggio navigazionale per ciascun satellite;
- Quattro Monitoring Stations (MS) sul territorio russo a cui se ne aggiungeranno altre sei anche nella Comunità degli Stati Indipendenti;
- Due Laser and Ranging Stations (LS);
- Le Command and Tracking Stations comprendono una rete di cinque Telemetry, Tracking and Control (TT&C) stations distribuite sul territorio russo (a San Pietroburgo, Schelkovo, Yenisseisk, Komsomolsk e Ussuriysk). Alcune di esse sono equipaggiate con sistemi di misura laser (Laser Station (LS)) ed altre strutture di monitoraggio (MS);
- Una Central Synchroniser (CC-M), l'orologio del sistema, situata a Schelkovo (sempre nella regione di Mosca) è responsabile dell'accuratezza della scala temporale del sistema GLONASS ed è connessa con il "phase control system" che monitora gli orologi dei satelliti e le fasi dei segnali;
- Tre upload stations.

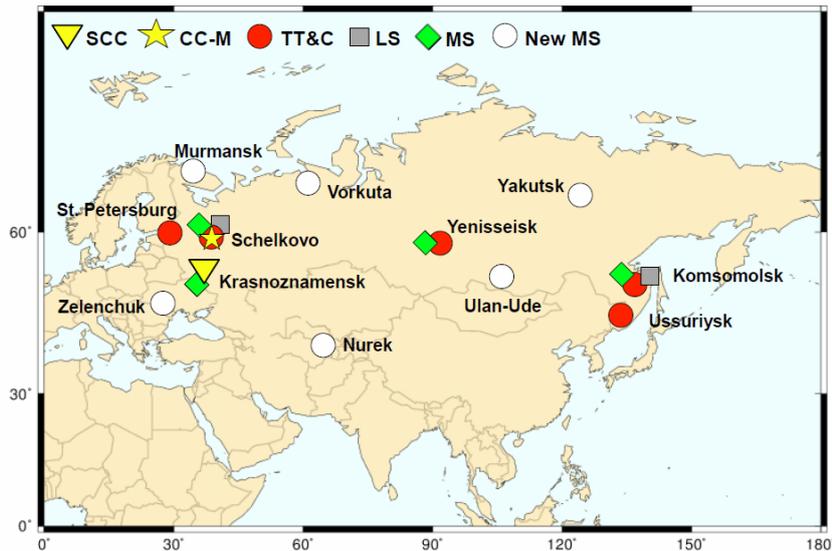


Figura 2.7 Segmento di controllo del sistema GLONASS [6]

2.3.2. GLONASS: il segmento spaziale

2.3.2.1. GLONASS: la costellazione

La costellazione del sistema GLONASS è costituita da 24 satelliti operativi (più altri di riserva) disposti su tre piani orbitali di tipo Medium Earth Orbit (MEO). Le orbite sono approssimativamente circolari, con un'inclinazione di circa 64.8° , un'altitudine di 19100 km con un periodo nominale di 11 ore, 15 minuti e 44 secondi e una geometria che si ripete ogni otto giorni siderali.

Al 21 settembre 2022 risultavano disponibili 26 satelliti di cui 22 operativi, tre in fase di manutenzione ed uno in fase di messa in servizio [20].

2.3.2.2. GLONASS: I satelliti

I satelliti della costellazione GLONASS analogamente a quelli della costellazione GPS sono un insieme di nuovi e vecchi satelliti suddivisi in "blocchi", ogni blocco raggruppa un insieme di satelliti lanciati in un certo intervallo temporale. Di seguito è riportata una descrizione dei differenti blocchi [21]:

Prototypes (Generazione Zero). I primi prototipi di satelliti GLONASS (chiamati Uragan), furono messi in orbita nell'ottobre del 1982 e fra il 1982 e il 1985 ne furono lanciati 18. Questi satelliti sono noti anche come satelliti del "Block I".

First Generation. Quelli che si possono considerare i primi veri satelliti GLONASS, furono lanciati fra il 1985 e il 1990. Sono suddivisi in differenti blocchi (Block IIa, IIb e IIv), caratterizzati da differenti periodi di vita operativa. I periodi di vita operativa variavano dai

due anni di longevità dei satelliti del Block IIb ai tre anni del Block IIv, sebbene alcuni satelliti abbiano raggiunto i quattro anni e mezzo di vita. Questi satelliti, tutti stabilizzati su tre assi, erano equipaggiati con un sistema di propulsione per permettere il riposizionamento del satellite ed avevano una massa di circa 1250 kg. Rispetto a quelli della generazione zero, gli orologi avevano una migliore precisione e le frequenze erano più stabili.

Second Generation. La seconda generazione di satelliti GLONASS prende il nome di GLONASS-M (o Uragan-M) dove la lettera “-M” sta per “modernizzato” o “modificato”. Furono sviluppati a partire dal 1990 e il primo di essi fu mandato in orbita nel 2001. I satelliti GLONASS-M adottano degli orologi al cesio, presentano dei miglioramenti al sistema di propulsione e grazie a queste migliorie una vita utile di progetto di ben sette anni. Tuttavia tale periodo di operatività è sempre inferiore a quello di dieci anni raggiunto dai satelliti NAVSTAR-GPS.

Un'importante caratteristica di questa generazione di satelliti è l'aggiunta di un secondo segnale civile sulla banda G2, che permette agli utenti civili di eliminare l'errore ionosferico. Questi satelliti hanno una massa di 1415 kg, un diametro di 2.71 m e 3.05 m di altezza con due pannelli solari di 7.20 m. Sono presenti inoltre dei riflettori laser per la misurazione precisa dell'orbita e per ricerche di tipo geodetico.

Third Generation. Questi satelliti sono noti come GLONASS-K1 (o Uragan-K). Hanno una vita operativa di 10-12 anni e un peso di 935 kg (il che permette il lancio di due satelliti per volta tramite razzi Soyuz-2-1a). Come la precedente generazione di satelliti, sono stabilizzati su tre assi e hanno due pannelli solari. Questa generazione di satelliti trasmette un nuovo segnale sulla banda G3 per usi civili con modalità Code Division Multiple Access (CDMA) mentre i segnali civili sulle bande G1 e G2 utilizzano la tecnica Frequency Division Multiple Access (FDMA), e include il servizio Search and Rescue (SAR).

Tuttavia il primo satellite di questa generazione di satelliti GLONASS-K1, è stato lanciato il 26 febbraio 2011 mentre il secondo è stato lanciato solo il 30 novembre 2014. A questi due satelliti se ne sono aggiunti altri due, il primo lanciato il 25 ottobre 2020 e l'ultimo il 7 luglio 2022. Attualmente solo due satelliti di questa generazione risultano essere operativi dato che il primo ad essere lanciato è stato disattivato il 11 novembre 2021 [22] mentre l'ultimo è in fase di test.

Generazione in sviluppo. Questa nuova generazione di satelliti, noti come GLONASS-K2 è attualmente in fase di sviluppo e il primo lancio era previsto nel 2022 anche se era stato programmato inizialmente per il 2018 [23]. I satelliti GLONASS-K2 avranno una vita operativa di 10 anni, un peso di 1600 kg e una stabilità degli orologi di $\sim 5 \cdot 10^{-14}$. Oltre ai segnali CDMA su G3, i segnali CDMA saranno anche trasmessi su G1 e G2. I satelliti GLONASS-K2 trasmetteranno sia i segnali legacy FDMA sia i segnali CDMA e includeranno il servizio Search and Rescue (SAR). La Full Operational Capability (FOC) è stata raggiunta l'8

dicembre 2011 con la presenza di 24 satelliti operativi in orbita. In Figura 2.8 sono riassunte le caratteristiche delle varie generazioni di satelliti GLONASS.



Capabilities	Glonass	Glonass-M	Glonass-K	Glonass-K2
Time of Deployment	1982-2005	2003-2016	2011-2018	2017+
Status	Decommissioned	In use	Design maturation based on in-orbit validation	In development
Nominal Orbit Parameters	Circular Altitude - 19,100 km Inclination - 64,8° Period - 11 h 15 min 44 sec			
Number of Satellites in the Constellation (Used for Navigation)	24			
Number of Orbital Planes	3			
Number of Satellites in a Plane	8			
Launchers	Soyuz-2.1b, Proton-M			
Design Lifetime, years	3.5	7	10	10
Mass, kg	1500	1415	935	1600
Dimensions, m		2,71x3,05x2,71	2,53x3,01x1,43	2,53x6,01x1,43
Power, W		1400	1270	4370
Platform Design	Pressurized	Pressurized	Unpressurized	Unpressurized
Clock Stability, as per Specification/Observed	5×10^{-13} / 1×10^{-13}	1×10^{-13} / 5×10^{-14}	1×10^{-13} / 5×10^{-14}	1×10^{-14} / 5×10^{-15}
Signal Type	FDMA	FDMA (+CDMA for SVs 755-761)	FDMA and CDMA	FDMA and CDMA
Open Access Signals: (for FDMA Signals Center Frequency Values are Provided)	L1OF (1602 MHz)	L1OF (1602 MHz) L2OF (1246 MHz) L3OC (1202 MHz) for SVs 755+	L1OF (1602 MHz) L2OF (1246 MHz) L3OC (1202 MHz) L2OC (1248 MHz) for SVs 17L+	L1OF (1602 MHz) L2OF (1246 MHz) L1OC (1600 MHz) L2OC (1248 MHz) L3OC (1202 MHz)
Restricted Access Signals	L15F (1592 MHz) L25F (1237 MHz)	L15F (1592 MHz) L25F (1237 MHz)	L15F (1592 MHz) L25F (1237 MHz) L25C (1248 MHz) for SVs 17L+	L15F (1592 MHz) L25F (1237 MHz) L15C (1600 MHz) L25C (1248 MHz)
Satellite Crosslinks: RF Laser	— —	+ —	+ —	+ +
Search and Rescue	—	—	+	+

Figura 2.8 Caratteristiche della costellazione GLONASS [24]

2.3.2.3. GLONASS: i segnali

I satelliti GLONASS trasmettono i segnali in polarità circolare destrorsa centrati su due frequenze sulla banda L, L1 e L2 che saranno chiamate in questa Tesi bande G1 e G2 per distinguerle in modo più agevole dalle bande L1 ed L2 del sistema GPS.

Attualmente il sistema GLONASS rende disponibili due tipologie di servizio:

Channel of Standard Accuracy (CSA): è un servizio aperto e gratuito per tutti gli utenti. Dal 2004 con l'entrata in servizio dei satelliti GLONASS-M viene trasmesso anche un secondo segnale navigazionale civile sulla banda G2 oltre a quello inizialmente offerto sulla banda G1.

Channel of High Accuracy (CHA): è un servizio che utilizza le due bande G1 e G2 ed è destinato a scopi militari e a utenti civili autorizzati.

Ogni satellite GLONASS trasmette una particolare frequenza all'interno della banda, diversamente dai satelliti GPS che utilizzano tutti le stesse frequenze. Questa frequenza determina il numero del canale di frequenza del satellite per permettere ai ricevitori degli utenti di identificare i satelliti con la tecnica FDMA (Frequency Division Multiple Access).

La modernizzazione del sistema GLONASS comprende la trasmissione di ulteriori segnali CDMA sulle bande G1, G2, G3 e di mantenere sulle bande G1 e G2 i segnali FDMA [25].

Le attuali frequenze del segnale GLONASS sulle bande G1 e G2 possono essere calcolate in base al numero di canale k assegnato applicando le seguenti espressioni:

$$\text{Frequenza della banda G1: } f_{KL1} = f_{0L1} + k \Delta f_{L1} \quad (2.1)$$

$$\text{Frequenza della banda G2: } f_{KL2} = f_{0L2} + k \Delta f_{L2} \quad (2.2)$$

$$\text{Frequenza della banda G3: } f_{KL3} = f_{0L3} + k \Delta f_{L3} \quad (2.3)$$

dove:

- k rappresenta il canale di frequenza,
- $f_{0L1} = 1602$ MHz per la banda GLONASS G1,
- $\Delta f_{L1} = 562,5$ kHz separazione tra le portanti GLONASS nella banda G1,
- $f_{0L2} = 1246$ MHz per la banda GLONASS G2,
- $\Delta f_{L2} = 437,5$ kHz separazione tra le portanti GLONASS nella banda G2,
- $f_{0L3} = 1201$ MHz per la banda GLONASS G3
- $\Delta f_{L3} = 437,5$ kHz di separazione tra le portanti GLONASS nella banda G3.

Il numero k era originariamente previsto per fornire 24 canali, con $k = 1, \dots, 24$, ma per impedire interferenze con frequenze radio astronomiche e servizi di comunicazione satellitari l'International Electric Communication Union impose di utilizzare un $k = -7, \dots, 6$. La riduzione da 24 a 12 canali è stata resa possibile in quanto due satelliti sulla stessa orbita trasmettono esattamente la stessa frequenza ma occupano posizioni agli antipodi. Conseguentemente i due satelliti non saranno mai simultaneamente in vista da nessun utente sulla superficie terrestre poiché separati da 180° di longitudine come illustrato in Figura 2.9.

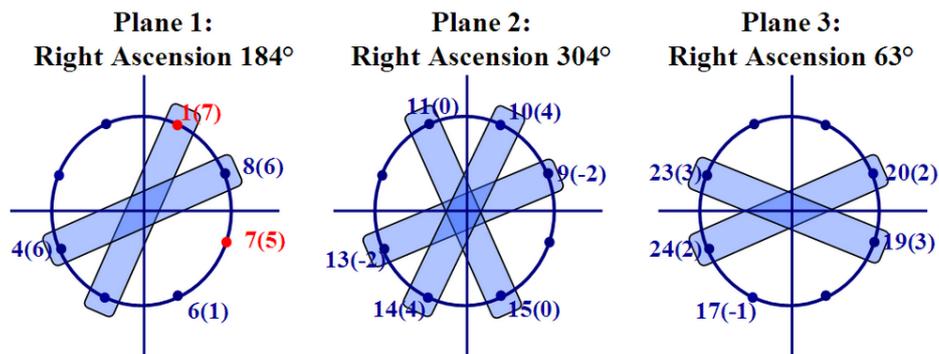


Figura 2.9 Assegnazione agli antipodi dei satelliti GLONASS. Il parametro $i(k)$ indica che il satellite nello slot dell'almanacco i trasmette sulla frequenza numero k [25]

Su queste frequenze sono modulati utilizzando la tecnica BPSK i codici C/A (Coarse Acquisition) cioè il codice civile aperto e il codice Precise (P) (militare) insieme a un messaggio navigazionale D. Il codice C/A è lungo 511 caratteri e la sua lunghezza temporale ad una frequenza di 511 kHz è pari a 1 ms. Il codice P ha una lunghezza di 33554432 caratteri che alla frequenza di 5.11 MHz comporterebbe un periodo di 6.566 s, ma di fatto viene troncato a 1 s.

Analogamente al sistema GPS, il codice C/A era modulato inizialmente solamente sulla banda G1, mentre il codice militare P è modulato su entrambe le portanti G1 e G2. Successivamente, con l'introduzione dei satelliti GLONASS-M (dal 2004) il segnale C/A viene trasmesso anche sulla banda G2. D'altro canto diversamente al sistema GPS, per i segnali modulati con la tecnica FDMA, le sequenze PRN (Pseudo Random Noise) di questi codici sono comuni a tutti i satelliti poiché i ricevitori identificano i satelliti dalla loro frequenza, tuttavia ciò non accade per i nuovi segnali modulati con la tecnica CDMA dove i satelliti utilizzano la stessa frequenza e diverse sequenze PRN.

Nel sistema GLONASS il codice militare P non è cifrato sebbene non sia mai stato reso pubblico e non è stato previsto nessun sistema di degradazione del segnale (presente inizialmente nel sistema GPS con la Selective Availability S/A). Ciò nonostante, il codice P può essere cambiato senza preavviso dal Ministero della Difesa Russo.

Nelle tabelle 2.4 e 2.5 sono riportati rispettivamente i segnali GLONASS delle bande G1 e G2 e la loro struttura:

Band	Carrier freq. (MHz)	PRN code	Modulation type	Code rate (Mcps)	Data rate (bps)	Service
G1	1602.0000+ +0.5625k	C/A	BPSK(0.511 Mcps)	0.511	50	Civil
		P	BPSK(5.11 Mcps)	5.11	50	Military
G2	1246.0000+ +0.4375k	C/A	BPSK(0.511 Mcps)	0.511	50	Civil
		P	BPSK(5.11 Mcps)	5.11	50	Military

Tabella 2.4 Segnali GLONASS [6]

Atomic clock frequency	$f_0 = 0.511 \text{ MHz}$
Frequencies L1	$9/16(2848 + k) = 1602.000 + 0.5625k \text{ MHz}$
Wavelength L1	18.7 cm (k = 0)
Frequencies L2	$7/16(2848 + k) = 1246.000 + 0.4374k \text{ MHz}$
Wavelength L2	24.1 cm (k = 0)
P code frequency (chipping rate)	$10f_0 = 5.11 \text{ Mcps}$
P chip wavelength	58.67 m
P code period	1 s
C/A code frequency (chipping rate)	$f_0 = 0.511 \text{ Mcps}$
C/A chip wavelength	586.7 m
C/A code period	1 ms
Navigation message frequency	50 bps
Frame length	$30 \text{ s (on CA), } 10 \text{ s (on P)}$
Total message length	$2.5 \text{ min (on CA), } 12 \text{ min (on P)}$

Tabella 2.5 Struttura del segnale GLONASS [6]

2.3.2.3.1. GLONASS: Modernizzazione dei segnali

Con l'introduzione dei satelliti della generazione GLONASS-K1 è stata aggiunta una nuova frequenza L3, chiamata qui G3, modulata con la tecnica CDMA nella banda ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service).

L'aggiunta di segnali CDMA è iniziata con l'introduzione della generazione di satelliti GLONASS-K1 su una frequenza $f = 1202.025 \text{ MHz}$ per la banda G3 per primi test.

In seguito la banda G3 è stata implementata su alcuni satelliti GLONASS-M lanciati dopo il 2014 sempre per testare il sistema.

Con il lancio dei nuovi satelliti GLONASS-K2 per rimpiazzare i vecchi satelliti GLONASS-M, sono previsti oltre ai vecchi segnali sulle bande G1 e G2 di tipo FDMA, anche nuovi segnali CDMA sulle bande G1, G2, G3. I segnali CDMA trasmessi saranno 4, due di questi saranno segnali offuscati situati a 1242 MHz (banda G2) e $1575,42 \text{ MHz}$ (banda G1) per usi militari

e gli altri due saranno segnali aperti situati a 1575,42 MHz (banda G1) e 1207,14 MHz (banda G3) per usi civili.

In Tabella 2.6 è riportato uno schema riassuntivo dei segnali per i diversi tipi di satellite, e in Figura 2.10 lo spettro dei segnali GLONASS prima e dopo la modernizzazione. Si noti che in questa trattazione si sono volutamente trascurate le informazioni relative alla generazione di satelliti GLONASS-KM (satelliti di futura generazione attualmente allo stadio di ricerca) su cui non si hanno fonti sufficientemente affidabili e aggiornate.

Tipo satellite	Segnali FDMA		Segnali CDMA		
	1602+ 0.562k MHz	1246+ 0.437k MHz	1600.995 MHz	1248.06 MHz	1202.025 MHz
GLONASS	G1OF G1SF	G2SF			
GLONASS-M	G1OF G1SF	G2OF G2SF			G3OC*
GLONASS-K1	G1OF G1SF	G2OF G2SF			G3OC
GLONASS-K2	G1OF G1SF	G2OF G2SF	G1OC G1SC	G2OC G2SC	G3OC

O: Open signal (Standard Positioning Service)
S: Obfuscated signal (Precise Positioning Service)
F: FDMA
C: CDMA
k: -7, -6, -5, ... ,6.
*: I Satelliti GLONASS-M prodotti dopo il 2014 trasmettono il segnale G3

Tabella 2.6 Segnali trasmessi dalle diverse generazioni di satelliti GLONASS

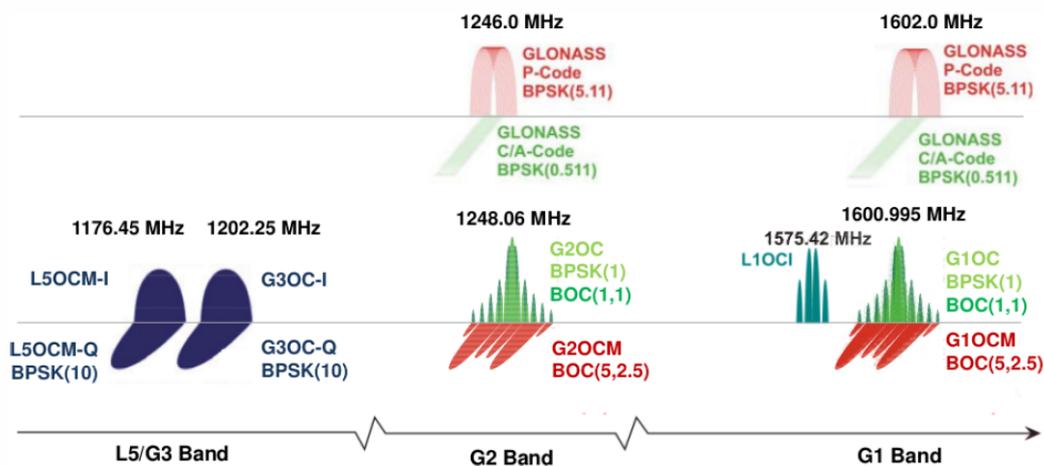


Figura 2.10 Spettro dei segnali GLONASS. I segnali FDMA prima e dopo la modernizzazione (parte superiore della figura) e i nuovi segnali CDMA dopo la modernizzazione (parte inferiore della figura) [6]

2.3.2.4. GLONASS: messaggio navigazionale

I satelliti GLONASS modulano due messaggi navigazionali a 50 bps sui segnali C/A e P, ognuno dei quali fornisce all'utenza le informazioni necessarie per il posizionamento, come i parametri per il calcolo delle coordinate dei satelliti, i parametri per la correzione degli orologi e altri parametri di sistema.

Il messaggio navigazionale del segnale C/A, Standard Accuracy Service è trasmesso come una ripetizione continua di "superframes" della durata di 2.5 minuti, a sua volta composto da 5 frames di 30 s. Ogni frame è composto da 15 stringhe dalla durata di 2 s lunghi 100 bits.

Il contenuto del messaggio è suddiviso in due diverse tipologie di dati: i dati di tipo immediato del satellite trasmittente e i dati non immediati per gli altri satelliti. I dati immediati sono ripetuti nelle prime quattro stringhe di ogni frame e comprendono i parametri delle effemeridi, la deviazione degli orologi dei satelliti, il loro stato di salute e la differenza relativa tra la frequenza portante del satellite e il suo valore nominale.

Come si può vedere in Figura 2.11, i dati non immediati sono trasmessi nelle stringhe da 5 a 15 di ciascun frame (almanacco per 24 satelliti). I frame da I a IV contengono l'almanacco per 20 satelliti (5 per frame) mentre il quinto frame contiene l'almanacco per 4 satelliti. Le ultime due stringhe del quinto frame sono bit riservati (l'almanacco di ciascun satellite utilizza due stringhe).

I valori delle effemeridi sono calcolati dal System Control Center per un periodo di 24 ore e il satellite trasmette un nuovo set di effemeridi ogni 30 minuti. Questi dati differiscono dai dati GPS, poiché invece di essere forniti come elementi orbitali di tipo Kepleriano, sono forniti come coordinate cartesiane Earth-Centered, Earth-Fixed (ECEF) in posizione e velocità, con parametri di perturbazione di accelerazione lunisolare. Per la loro risoluzione si utilizzano equazioni integrali basate sul metodo Runge-Kutta del quarto ordine.

L'almanacco, in termini di parametri Kepleriani modificati, è abbastanza simile a quello del sistema GPS e viene aggiornato approssimativamente una volta al giorno.

FRAME NUMBER	STRING NUMBER	2 s			
		1.7 s			0.3 s
I	1	0	Immediate data	Kx	MB
	2	0	for	Kx	MB
	3	0	transmitting	Kx	MB
	4	0	satellite	Kx	MB
	5	0	Non immediate data	0	MB
	..	..	(almanac) for	..	MB
	15	0	five satellites	Kx	MB
II	1	0	Immediate data	Kx	MB
	2	0	for	Kx	MB
	3	0	transmitting	Kx	MB
	4	0	satellite	Kx	MB
	5	0	Non immediate data	0	MB
	..	..	(almanac) for	..	MB
	15	0	five satellites	Kx	MB
III	1	0	Immediate data	Kx	MB
	2	0	for	Kx	MB
	3	0	transmitting	Kx	MB
	4	0	satellite	Kx	MB
	5	0	Non immediate data	0	MB
	..	..	(almanac) for	..	MB
	15	0	five satellites	Kx	MB
IV	1	0	Immediate data	Kx	MB
	2	0	for	Kx	MB
	3	0	transmitting	Kx	MB
	4	0	satellite	Kx	MB
	5	0	Non immediate data	0	MB
	..	..	(almanac) for	..	MB
	15	0	five satellites	Kx	MB
V	1	0	Immediate data	Kx	MB
	2	0	for	Kx	MB
	3	0	transmitting	Kx	MB
	4	0	satellite	Kx	MB
	5	0	Non immediate data	0	MB
	..	..	(almanac) for four sat.	..	..
	14	0	Reserved data	Kx	MB
	15	0	Reserved data	Kx	MB

Figura 2.11 Struttura del messaggio navigazionale GLONASS

Il messaggio navigazionale del segnale ad alta precisione (P) è stato decodificato da diversi gruppi di ricerca poiché non è pubblicato ufficialmente. Secondo queste analisi, ciascun satellite trasmette un superframe composto da 72 frame, ciascuno contenente cinque stringhe da 100 bits. I primi tre frames contengono le effemeridi per il satellite trasmittente. Un frame viene trasmesso in 10 secondi, quindi la durata totale del messaggio è di 12 minuti [26].

2.3.3. Performance del sistema GLONASS

Stando a quanto riportato nel documento Global Navigation Satellite System GLONASS Open Service Performance Standard (GLONASS OS PS) [27] del 2020, i valori di accuratezza in termini di posizionamento e di sincronizzazione temporale per il sistema satellitare GLONASS in modalità Standard Positioning Service (SPS), ovvero Channel of Standard Accuracy (CSA), sono quelli riportati in Tabella 2.7:

Position/Time Accuracy Standard	Conditions and Constrains
Global Average Positioning Error: <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 5 m 95% Horizontal Error • ≤ 9 m 95% Vertical Error 	<ul style="list-style-type: none"> • Defined for a position/time solution meeting the representative user conditions • Standard based on a measurement interval of 24 hours averaged over all points in the service volume (RMS)
Worst Site Positioning Error: <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 12 m 95% Horizontal Error • ≤ 25 m 95% Vertical Error 	<ul style="list-style-type: none"> • Standard based on a measurement interval of 24 hours for any point in the service volume • Defined for a position/time solution meeting the representative user conditions
Global Average Time Transfer Error: <ul style="list-style-type: none"> • ≤ 40 nsec time transfer error 95% of time (SIS only) 	<ul style="list-style-type: none"> • Defined for a time transfer solution meeting the representative user conditions • Standard based on a measurement interval of 24 hours averaged over all points in the service volume • UTC(SU) to GLONASS Offset Error is accounted for

Tabella 2.7 Accuratezza in termini di posizione/tempo per il sistema GLONASS in modalità Open Service secondo [27]

Non è stato possibile includere in Tabella 2.7 informazioni riguardanti il servizio PPS a causa di mancanza di dati.

2.4. Il sistema BeiDou (Compass)

Il sistema satellitare BeiDou (in cinese 北斗 (*běidǒu*), cioè “mestolo del nord”, l'asterismo della costellazione dell'Orsa Maggiore conosciuto in Occidente come Grande Carro), è un sistema di posizionamento satellitare sviluppato dalla Repubblica Popolare Cinese, nato inizialmente come sistema a copertura regionale, per poi essere successivamente implementato per una copertura globale. Nato per uso militare ne è stato concesso l'uso commerciale.

Secondo l'Amministrazione spaziale nazionale cinese, lo sviluppo del sistema si è svolto in tre fasi:

- Phase I (1994-2000): realizzazione del sistema di navigazione sperimentale BeiDou costituito da tre satelliti;
- Phase II (2004-2012): sistema di navigazione regionale BeiDou che copre la Cina e le regioni limitrofe;
- Phase III (2009-2020): raggiungimento della copertura globale.

Il primo sistema BeiDou, ufficialmente chiamato BeiDou Satellite Navigation Experimental System noto anche come BeiDou-1, consisteva di tre satelliti in orbita geostazionaria e offriva una copertura e applicazioni limitate. Questo primo sistema è stato dismesso verso la fine del 2012 [28].

La seconda generazione del sistema, ufficialmente chiamato BeiDou Navigation Satellite System (BDS) noto anche come COMPASS o BeiDou-2, è un sistema di navigazione satellitare globale costituito da 35 satelliti su diverse tipologie di orbite come sarà illustrato successivamente.

Il sistema è diventato operativo in Cina nel dicembre 2011, con 10 satelliti operativi, e offre servizi nella regione Asia-Pacifico dal dicembre 2012. Il suo completamento è stato raggiunto nel 2020, con il lancio della terza generazione di satelliti BeiDou-3, avvenuta a partire da marzo 2015, rendendo il sistema capace di servire l'utenza globale.

2.4.1. BeiDou: il segmento di controllo

Al momento della stesura di questa Tesi non è stato possibile reperire una quantità d'informazioni analoga a quella degli altri sistemi GNSS riguardo al segmento di controllo. Secondo quanto è stato possibile consultare il segmento di controllo BeiDou è composto da [29]:

- Una Master Control Station (MCS): responsabile per il controllo della costellazione di satelliti i cui compiti comprendono:
 - Raccogliere i dati di osservazione dei segnali NAV da ciascuna Time Synchronization/Upload Station (TS/US) e Monitoring Station (MS), elaborare i dati e generare e caricare i messaggi navigazionali;
 - Eseguire la pianificazione e la programmazione delle missioni, condurre la gestione e il controllo delle operazioni del sistema;
 - Osservare e calcolare le distorsioni dell'orologio satellitare;
 - Monitorare i carichi utili dei satelliti e analizzare anomalie, ecc.
- Delle Time Synchronization/Upload station (TS/US): responsabili della misura delle distorsioni dell'orologio satellitare ed effettuare l'upload dei messaggi navigazionali;
- Delle Monitoring Stations: hanno il compito di raccogliere e fornire dati in tempo reale alla MCS e monitorare i messaggi navigazionali.

2.4.2. BeiDou: il segmento spaziale

2.4.2.1. BeiDou: la costellazione

Il primo passo compiuto dalla Cina nella costruzione di un sistema di navigazione satellitare sotto il proprio controllo è stato il sistema regionale BeiDou-1, che è diventato operativo nel maggio 2003. Tale sistema utilizzava tre satelliti geostazionari (GEO), ed è stato dismesso alla fine del 2012.

La successiva Phase II non era un'estensione di BeiDou-1, ma era un nuovo GNSS come GPS, GLONASS o Galileo e la retrocompatibilità con BeiDou-1 era assicurata dall'inclusione di satelliti di tipo GEO. La costellazione consisteva in quattro satelliti MEO, cinque GEO e cinque IGSO per fornire copertura regionale della Cina e delle aree circostanti. Il servizio operativo della Phase II è iniziato il 27 dicembre 2011.

La costellazione BeiDou (Compass) (Phase III) che garantisce un servizio globale, è composta da 35 satelliti nominali, ma in realtà conta al 30/09/2022, 49 satelliti, di cui 44 operativi.

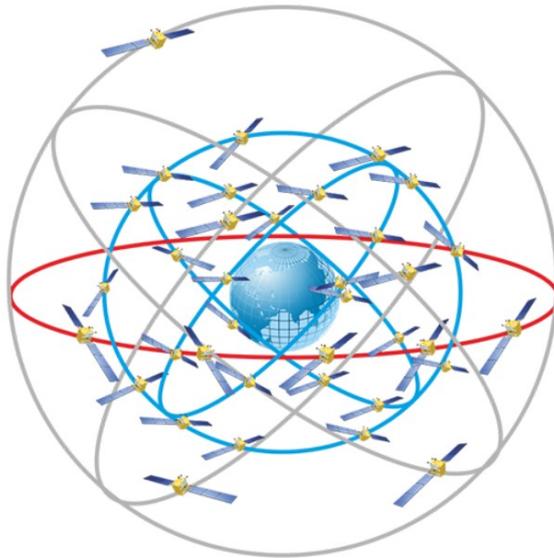


Figura 2.12 Costellazione del sistema BeiDou (Compass) [30]

2.4.2.2. I satelliti

BeiDou-1: era un sistema di navigazione regionale sperimentale, costituito da tre satelliti operativi e un satellite di riserva.

A differenza dei sistemi GPS americano, GLONASS russo ed europeo Galileo, che utilizzano satelliti in orbite MEO, BeiDou-1 faceva esclusivamente uso di satelliti in orbita geostazionaria (GEO). Ciò limitava le zone di copertura del servizio ma d'altro canto, richiedeva un basso numero di satelliti. L'area che poteva essere servita andava dalla longitudine 70°E a 140°E e dalla latitudine 5°N a 55°N. La frequenza del sistema era 2491,75 MHz [31]. Questo sistema è stato dismesso alla fine del 2012.

Il sistema BeiDou-2/3: Il primo satellite BeiDou Phase II è stato il satellite sperimentale BeiDou-M, (o Compass-M1), lanciato in orbita il 14 aprile 2007 per testare il carico utile a bordo ed ha rappresentato il primo passo verso il nuovo GNSS cinese.

Il sistema BeiDou-2/3 come anticipato precedentemente è composto da tre tipologie di satelliti diverse:

- I satelliti di tipo geostazionario BeiDou-G a un'altitudine di circa 35786 km, sono posti rispettivamente a 58.75°E, 80°E, 110.5°E, 140°E e 160°E;
- I satelliti di tipo geosincrono BeiDou-IGSO con un'inclinazione di circa 55°;
- I satelliti di tipo MEO BeiDou-M a un'altitudine di 21 528 km su tre piani orbitali con un'inclinazione di circa 55° e con un periodo orbitale di circa 12 ore e 53 minuti, che ripetono la loro geometria ogni sette giorni siderali.

Questi satelliti hanno una vita operativa di otto anni, si basano sulla piattaforma DFH-3 (DongFangHong) stabilizzata su tre assi e sono costruiti dalla CASC (China Aerospace Science and Technology Corporation).

Il 27 dicembre 2011, con 10 satelliti in orbita, il sistema BeiDou ha iniziato formalmente a fornire un primo servizio operativo di tipo “Phase II” alla Cina e alle aree circostanti (servizio regionale). Alla fine del 2012, erano presenti in orbita cinque satelliti GEO, quattro satelliti MEO e cinque IGSO [6].

Nel 2015, il sistema ha iniziato la transizione verso la copertura globale con il lancio del primo satellite (il 17°) della terza generazione di satelliti Beidou-3.

Il 23 giugno 2020 si è raggiunto il completamento della costellazione di 35-satelliti nominali, ma la costellazione è in realtà composta da 44 satelliti (7 GEO, 10 IGSO, 27 MEO) [32].

Inoltre un satellite in orbita geostazionaria è attualmente in fase di test, mentre due satelliti in orbita IGSO e due in orbita MEO sono stati lanciati nel 2015 come satelliti sperimentali [28].

2.4.2.3. Beidou: i segnali

I satelliti BeiDou delle Phase II/III trasmettono segnali in polarità circolare destrorsa su tre frequenze radio nella banda L, qui indicate come B1, B2 e B3.

Il sistema satellitare BeiDou prevede due tipologie di servizio:

Open Service (SPS o Standard Signal Service): è un servizio aperto, gratuito per tutti gli utenti;

Authorised Service: questo servizio, per soli utenti autorizzati, ha l’obiettivo di fornire servizi di posizionamento, velocità e stima del tempo più affidabili.

Come nel sistema GPS, Galileo o i nuovi segnali GLONASS, i segnali BeiDou si basano sulla tecnica CDMA.

I diversi segnali di navigazione, la struttura e i servizi supportati, per la Phase II sono riassunti nella Tabella 2.8.

Band	Carrier freq. (MHz)	PRN code	Modulation Type	Code rate (Mcps)	Service
B1	1561.098	B1-I	QPSK(2)	2.046	Open
		B1-Q			Authorized
B2	1207.14	B2-I	BPSK(2)	2.046	Open
		B2-Q	BPSK(10)	10.23	Authorized
B3	1268.52	B3	QPSK(10)	10.23	Authorized

Tabella 2.8 Segnali navigazionali del sistema BeiDou Phase II [33]

Per beneficiare dell'interoperabilità del segnale del sistema BeiDou con Galileo e GPS la Cina ha annunciato la migrazione del suo segnale civile B1 da 1561,098 MHz a una frequenza centrata a 1575,42 MHz (lo stesso dei segnali civili GPS L1 e Galileo E1) e la sua

trasformazione da una Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) a una modulazione Carrier Multiplexed Binary Offset (MBOC) simile al futuro GPS L1C e Galileo E1.

I diversi segnali navigazionali, la struttura e i servizi supportati, per la Phase III sono riassunti nella Tabella 2.9.

Band	Carrier freq. (MHz)	PRN code	Modulation type	Service
B1	1575.420	B1-C_D	BOC(1,1)	Open
		B1-C_P	QMBOC(6, 1, 4/33)	
	1561.098	B1I	BPSK	Open
B2	1176.450	B2-a_D	BPSK(10)	Open
		B2-a_P		
	1207.14	B2-b	BPSK(10)	Open
B3	1268.520	B3I	BPSK	Open

Tabella 2.9 Segnali navigazionali del sistema BeiDou Phase III (dati ottenuti da [29])

2.4.2.4. BeiDou: messaggio navigazionale

I messaggi navigazionali utilizzati dai cinque segnali B1C, B2a, B2b, B1I e B3I differiscono tra loro come riportato nella Tabella 2.10:

Signal	NAV message	Satellite Type
B1C	B-CNAV1	BDS-3I BDS-3M
B2a	B-CNAV2	
B2b	B-CNAV3	
B1I,B3I	D1	BDS-2I BDS-2M BDS-3I BDS-3M
	D2	BDS-2G BDS-3G

Tabella 2.10 Corrispondenze tra tipi di satelliti BeiDou in orbita, segnali e messaggi navigazionali [29]

Il messaggio navigazionale B-CNAV1 viene trasmesso sul segnale B1C e i dati del messaggio associato vengono modulati sulla componente dati (B1C_D). La lunghezza di ogni frame è di 1800 caratteri e la trasmissione di un frame dura 18 secondi.

Ogni frame è composto da tre subframes, il primo contiene il valore PRN e i Seconds of Hours (SOH), il secondo frame contiene informazioni come i parametri dell'ora di sistema, l'emissione di dati, i parametri delle effemeridi, i parametri di correzione dell'orologio, i parametri differenziali. Il subframe 3 è suddiviso in più pagine, contenenti informazioni come i parametri del modello di correzione del ritardo ionosferico, i parametri di orientamento della Terra (Earth Orientation Parameters EOP), i parametri di offset del

tempo BDT-UTC, i parametri di offset del tempo Beidou dal tempo GNSS (BGTO), almanacco midi, almanacco ridotto, stato di salute del satellite, stato di integrità del satellite, indice di precisione del segnale nello spazio, indice di precisione del monitoraggio del segnale nello spazio e così via [34].

Il messaggio navigazionale B-CNAV2 viene trasmesso sul segnale B2a e i dati del messaggio associato vengono modulati sulla componente dati (B2a_D). La lunghezza di ogni frame è di 600 caratteri e la trasmissione di un frame dura 3 secondi.

I primi 24 simboli di ogni frame sono un preambolo (Pre) con il valore di 0xE24DE8 in esadecimale. Il Most Significant Bit (MSB) viene trasmesso per primo. Ogni frame prima della codifica della correzione degli errori ha una lunghezza di 288 bit, contenente il PRN (6 bit), Message Type (MesType, 6 bit), Seconds Of Week (SOW, 18 bit), message data (234 bit) e bit di controllo Cyclic Redundancy Check (CRC) (24 bit). I dati PRN, MesType, SOW e message data partecipano al calcolo CRC. Come risultato della codifica Low Density Parity Check (LDPC) la lunghezza del frame diventa di 576 caratteri [35].

Il messaggio navigazionale B-CNAV3 viene trasmesso sul segnale B2b. La lunghezza di ogni frame è di 1000 caratteri e la trasmissione di un frame dura un secondo.

I primi 16 simboli di ogni frame sono un preambolo (Pre) con il valore di 0xEB90 in esadecimale. Il MSB viene trasmesso per primo e il PRN è di 6 bit di tipo integer senza segno. Ogni frame prima della codifica della correzione degli errori ha una lunghezza di 486 bit, contenente il Message Type (Mestype, 6 bit), i Seconds Of Week (SOW, 20 bit), message data (436 bit) e i bit di controllo CRC (24 bit). I dati MesType, SOW e message data partecipano al calcolo CRC. Come risultato della codifica Low Density Parity Check (LDPC) la lunghezza del frame diventa di 972 caratteri [36].

I messaggi navigazionali D1 e D2 sono trasmessi sui segnali B1I e B3I. Il messaggio di navigazione D1 viene trasmesso dai segnali B1I dei satelliti MEO/IGSO mentre il messaggio di navigazione D2 viene trasmesso dai segnali B1I dei satelliti GEO. La velocità con cui viene trasmesso il messaggio navigazionale D1 è di 50 bps. Il messaggio navigazionale D1 contiene le informazioni navigazionali di base (informazioni navigazionali dei satelliti, informazioni sull'almanacco per tutti i satelliti nonché gli sfasamenti temporali con altri sistemi GNSS). Il messaggio navigazionale D2 contiene la navigazione di base e le informazioni differenziali ad area vasta (l'integrità del sistema satellitare BeiDou, le informazioni sui parametri del modello di correzione del ritardo ionosferico) e la sua velocità è di 500 bps [37] [38].

2.4.3. Performance del sistema BeiDou

L'accuratezza in termini di posizionamento e di sincronizzazione temporale per il servizio Open Service del sistema satellitare BeiDou è riportata in Tabella 2.11, Tabella 2.12 e in Tabella 2.13 [29]:

Service Scheme	Positioning Accuracy Standard (95%)		Constraints
Single-frequency or dual-frequency	Average globally, horizontal	≤9m	The elevation mask is 5 degree; Usage constraints are met, and healthy SISs are used for calculation;
	Average globally, vertical	≤10m	The statistical value of any 7-day positioning errors of all points in the global region; Excludes transmission errors and user segment errors.
Single-frequency or dual-frequency	Horizontal error at the worst point	≤15m	The elevation mask is 5 degree; Usage constraints are met, and healthy satellite signals are used for calculation; The statistical value of any 7-day positioning errors of the world's worst position;
	Vertical error at the worst point	≤22m	Excludes transmission errors and user segment errors.

Tabella 2.11 Accuratezza in termini di posizione per il sistema BeiDou in modalità Open Service secondo [29]

Service Scheme	Timing Accuracy Standard (95%)		Constraints
Single-frequency or dual-frequency	Average globally	≤20ns	The elevation mask is 5 degree. Usage constraints are met, and healthy SISs are used for calculation; The statistical value of any 7-day timing errors of all points in the global region; Excludes transmission errors and user segment errors.

Tabella 2.12 Accuratezza in termini di tempo per il sistema BeiDou in modalità Open Service secondo [29]

Service Scheme	Velocity Measurement Accuracy Standard (95%)		Constraints
Single-frequency or dual-frequency	Average globally	≤0.2m/s	The elevation mask is 5 degree; Usage constraints are met, and healthy SISs are used for calculation; The statistical value of any 7-day velocity measurement errors of all points in the global region; Excludes transmission errors and user segment errors.

Tabella 2.13 Accuratezza in termini di velocità per il sistema BeiDou in modalità Open Service secondo [29]

2.5. Il sistema Galileo

Il programma Galileo è un'iniziativa europea finalizzata alla creazione di un sistema di navigazione satellitare globale tecnologicamente avanzato in grado di fornire un servizio di posizionamento globale altamente accurato e garantito sotto controllo civile. Pur fornendo servizi di navigazione e posizionamento autonomi, il sistema satellitare Galileo è interoperabile con altri sistemi GNSS come GPS e GLONASS e BeiDou. Il sistema una volta ultimato consisterà in 30 satelliti e nel relativo segmento di controllo.

Il sistema satellitare Galileo una volta completato sarà in grado di fornire una precisione metrica in tempo reale, offrendo un sistema a doppia frequenza come standard [39]. Il sistema garantirà inoltre la disponibilità del servizio nelle circostanze più impegnative e informerà gli utenti della presenza di eventuali guasti su qualsiasi satellite.

I sistemi sotto il controllo militare come il GPS (USA), GLONASS (Russia), BeiDou (Cina) e il sistema regionale sviluppato dal Giappone (QZSS) forniscono un servizio civile ma tale servizio può essere spento o reso meno preciso quando lo si desidera (ad es. in caso di conflitto). L'interruzione dei servizi di geolocalizzazione porterebbe a notevoli conseguenze, nell'aviazione, nei trasporti, nelle telecomunicazioni, ecc.

Per questi motivi, fin dagli anni '90, l'Unione Europea ha visto la necessità di munirsi di un proprio sistema satellitare globale di navigazione [40]. La decisione di intraprendere la realizzazione di un sistema GNSS europeo fu presa in modo analogo alle decisioni degli anni '70 riguardo altri progetti europei di successo, come il lanciatore Ariane e l'Airbus. La Commissione Europea e l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) hanno quindi unito le forze per realizzare Galileo, un sistema GNSS europeo indipendente e sotto il controllo civile.

La fase di definizione, lo sviluppo e la fase di validazione in orbita (In-Orbit Validation, IOV) del programma Galileo sono state realizzate dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) che le ha cofinanziate assieme all'Unione Europea.

La fase di completa capacità operativa (Full Operational Capability, FOC) del programma Galileo è invece interamente finanziata dall'Unione Europea e gestita dalla Commissione Europea.

L'ESA agisce in qualità di ente di progettazione e di supporto per conto della Commissione Europea a seguito di un accordo di delega fra le parti.

Il programma Galileo è stato strutturato in tre fasi principali:

- Fase di validazione in-orbita (In-Orbit Validation, IOV);
- Capacità operativa iniziale (Initial Operational Capability, IOC);
- Piena capacità operativa (Full Operability Capability, FOC).

Tali fasi saranno spiegate esaurientemente nel paragrafo 2.5.2.2.

L'interoperabilità fra i segnali Galileo e GPS nei ricevitori permetterà di raggiungere un livello di precisione superiore a quello attualmente disponibile con il solo GPS. Dalla maggior parte delle località saranno visibili da sei a otto satelliti Galileo, che in combinazione con quelli GPS, permetteranno di migliorare la disponibilità dei segnali in particolare in ambito urbano dove le costruzioni possono ostruire i segnali provenienti dai satelliti bassi sull'orizzonte (canyon urbani) [39].

Con Galileo, l'Europa sarà quindi in grado di sfruttare appieno le opportunità offerte dalla navigazione satellitare.

2.5.1. Galileo: il segmento di controllo

Il segmento di terra del sistema satellitare Galileo è costituito da due Galileo Control Center (GCC) situati a Oberpfaffenhofen (Germania) e Fucino (Italia). Ciascun GCC gestisce le funzioni di "controllo" supportate da un segmento di controllo a terra (Ground Control Station GCS) e le funzioni di "missione", supportate da un segmento di missione a terra (Ground Mission Station GMS) dedicato.

Il GMS e il GCS interfacciano i satelliti con una rete mondiale di stazioni aventi diverse funzioni qui di seguito elencate [41]:

- Una rete globale di Galileo Sensor Stations (GSS): raccolgono e trasmettono in tempo reale le misurazioni e i dati satellitari Galileo ai GCC;
- Una rete di Mission Uplink Stations (ULS): distribuiscono e collegano i dati del segmento di controllo alla costellazione di Galileo;
- Telemetry, Tracking and Control (TT&C) Stations: raccolgono e inoltrano i dati telemetrici generati dai satelliti, distribuiscono ed eseguono l'uplink dei comandi di controllo necessari per la manutenzione della costellazione Galileo.

Uno schema del funzionamento del segmento di controllo del sistema Galileo è riportato nella Figura 2.13.

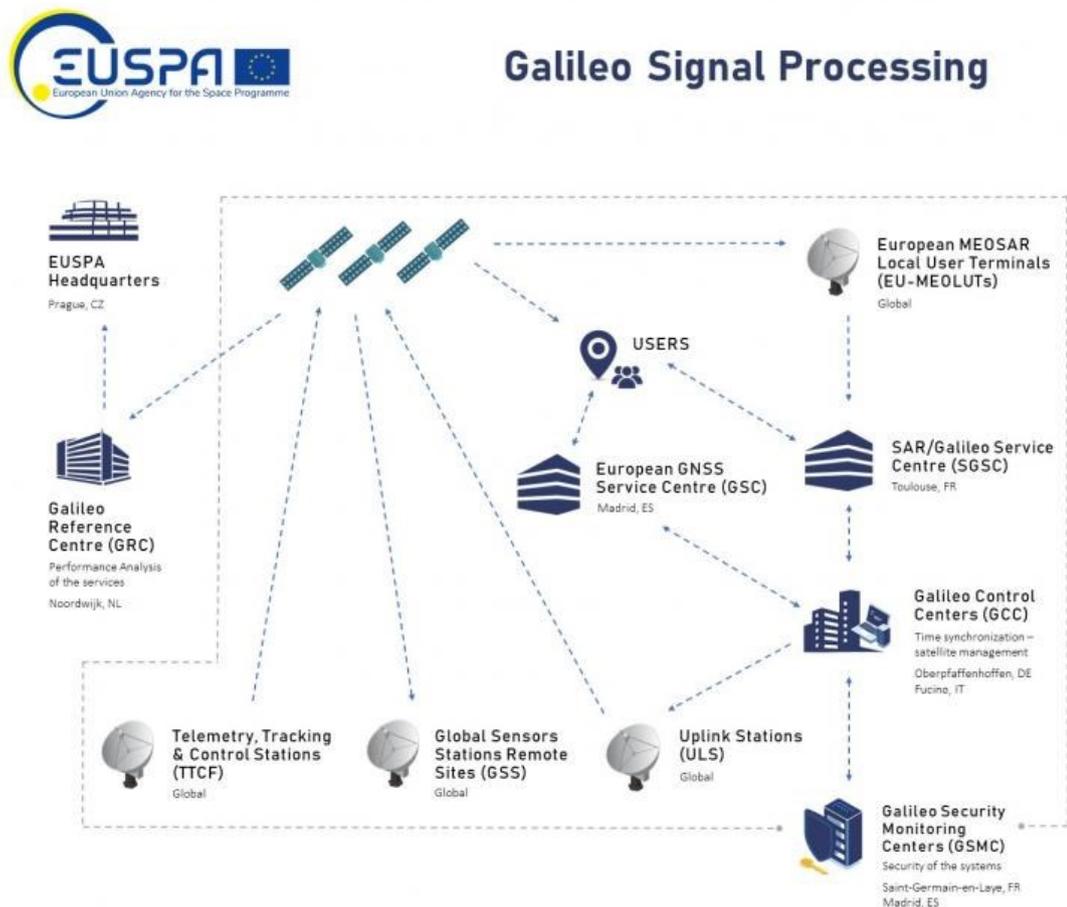


Figura 2.13 Segmento di controllo del sistema Galileo [41]

Ci sono inoltre diverse strutture di servizi che completano l'infrastruttura principale [42]:

- L'European GNSS Service Centre (GSC): situato a Torrejón (Spagna), il centro rappresenta il collegamento tra le comunità di utenti Galileo Initial OS (e il futuro High Accuracy Service HAS) e il sistema Galileo;
- Il Geodetic Reference Service Provider (GRSP): responsabile dell'elaborazione dei dati che supportano i Galileo Control Center al fine di realizzare il Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF) coerentemente con l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF);
- Il Time Service Provider (TSP): supporta il GCC allineando il Galileo System Time (GST) al Coordinated Universal Time (UTC);
- Il Galileo Security Monitoring Center (GSMC): con sede a St. Germain-en-Laye (Francia) e Swanwick (Regno Unito) queste strutture sono responsabili del monitoraggio della sicurezza del sistema;

- Il SAR/Galileo Data Service Provider (SGDSP): con sede a Tolosa (Francia), questa entità è responsabile del coordinamento delle operazioni del servizio SAR/Galileo;
- Il Galileo Reference Center (GRC): situato a Noordwijk (Paesi Bassi), questa struttura è responsabile del monitoraggio e della valutazione delle prestazioni dei servizi Galileo. Questa struttura è indipendente dall'infrastruttura centrale di Galileo e dalle sue operazioni.

Il Ground Control Segment (GCS) è responsabile per il controllo e la gestione della costellazione dei satelliti Galileo. Fornisce la funzione TT & C per l'intera costellazione di satelliti. Il GCS fornisce le funzioni di telemetria, telecomando e controllo per l'intera costellazione di satelliti Galileo. I suoi elementi funzionali sono distribuiti all'interno dei GCC e delle stazioni TT & C distribuite globalmente. Le stazioni TT & C utilizzano antenne di frequenza in banda S con diametro di 13 m per fornire uno scambio sicuro di dati tra i centri di controllo dei satelliti.

Sono presenti due Ground Control Center (GCC) ridondanti che costituiscono il nucleo del Ground Segment: uno è ubicato a Fucino (Italia) e l'altro a Oberpfaffenhofen (Germania). Una rete di comunicazione ibrida interconnette le stazioni remote (stazioni ULS, GSS e TT & C) con i GCC attraverso diversi mezzi di collegamento radio standard e speciale, dati cablati e collegamenti di comunicazione vocale, assicurando la comunicazione tra tutti i siti [42].

Le principali strutture del Ground Control System (GCS) sono [42]:

- SCCF, Spacecraft & Constellation Control Facility: esegue il monitoraggio e il controllo dei satelliti, sia per operazioni di routine che per operazioni critiche;
- SCPF, Spacecraft & Constellation Planning Facility: gestisce la pianificazione di un contatto regolare (una volta per ogni orbita) con tutti i satelliti nella costellazione per supportare operazioni di routine ma anche contatti di supporto ad operazioni critiche;
- FDF, Flight Dynamics Facility: è responsabile della determinazione dell'orbita non nominale (il Ground Mission Segment, GMS fornisce una pianificazione nominale) e della pianificazione delle manovre;
- OPF, Operations Preparation Facility: è responsabile per la preparazione e il controllo della configurazione di tutti i database e le procedure operative, comprese quelle che sono destinate all'esecuzione automatica;
- CMCF, Central Monitoring & Control Facility: supporta il monitoraggio e il controllo di tutte le risorse terrestri del Ground Control Segment, comprese le stazioni TT & C, le strutture e le reti del Ground Control Center;
- GCS KMF, Ground Control System Key Management Facility: supporta gli aspetti di sicurezza e protezione dei dati (generazione di chiavi di crittografia, processi di crittografia/decriptografia, etc.);

- CSIM, Constellation Simulator: è utilizzato per la convalida dei processi operativi, l'addestramento e l'analisi delle anomalie.

Il Ground Mission Segment (GMS) è responsabile della determinazione e dell'uplink dei messaggi navigazionali necessari per fornire i dati di navigazione e di temporizzazione. A tal fine utilizza la rete globale di Galileo Sensor Stations (GSS) per monitorare continuamente i segnali navigazionali di tutti i satelliti. Utilizza inoltre una rete di comunicazione globale tramite satelliti commerciali e connessioni via cavo in cui ogni collegamento è duplicato per ridondanza.

Il GMS comunica con i satelliti Galileo attraverso la rete globale di stazioni Mission Uplink Stations (ULS), installate in cinque diversi siti, ognuno dei quali ospita un certo numero di antenne paraboliche da 3 metri operanti nella banda utilizzata dai satelliti di radionavigazione a 5 GHz (Terra-spazio).

Il GMS utilizza la rete di Galileo Sensors Stations per la funzione Orbitography Determination and Time Synchronization (OD & TS), che ha lo scopo di fornire l'elaborazione ogni dieci minuti di tutte le osservazioni di tutti i satelliti, calcolare l'orbita precisa e lo sfasamento dell'orologio di ciascun satellite, inclusa una previsione delle variazioni valide per le ore successive (SISA, Signal-in-Space Accuracy).

I risultati di questi calcoli, che vengono eseguiti per ogni satellite, sono caricati nei satelliti ogni 100 minuti utilizzando un contatto programmato tramite le Mission Uplink Stations (ULS).

L'operazione OD & TS monitora quindi i parametri nel lungo termine a causa del loro continuo degrado dovuto a motivi gravitazionali, cause termiche, l'invecchiamento ecc.

Le principali strutture del GMS sono le seguenti [42]:

- OSPF, Orbit determination and Synchronization Processing Facility: è responsabile della determinazione dei parametri navigazionali, cioè calcolo delle effemeridi, previsione dello sfasamento degli orologi satellitari e determinazione della Signal-in-Space Accuracy (SISA), una stima dell'accuratezza raggiunta dagli strumenti in orbita;
- MGF, Message Generation Facility: è la struttura necessaria per combinare tutti i messaggi generati all'interno del Galileo Control Center o ricevuti da entità esterne, in un singolo flusso di dati da inviare a ciascuna ULS per essere caricati sui satelliti;
- PTF, Precision Timing Facility: è responsabile della realizzazione fisica del Galileo System Time (GST) che viene fornito a tutti gli elementi per scopi di sincronizzazione temporale;
- GACF, Ground Assets Control Facility: monitora e controlla tutti gli elementi del Galileo Mission Segment in tempo reale;
- MUCF, Mission Uplink Control Facility: è responsabile del monitoraggio e del controllo delle missioni on-line e off-line, compresa la pianificazione generale delle

missioni Galileo a lungo, a medio e breve termine e la pianificazione delle trasmissioni con i satelliti;

- MSF, Mission Support Facility: utilizzato per le funzioni di supporto off-line inclusi il calcolo dei dati di configurazione e di calibrazione per gli elementi in tempo reale;
- MTPF, Maintenance and Training Platform: contiene le istanze di tutti gli elementi e le attrezzature di supporto per scopi di manutenzione e formazione.
- GMS KMF, Ground Mission Segment Key Management Facility: supporta aspetti di sicurezza e protezione dei dati (generazione di chiavi di crittografia, processo di crittografia / decrittografia, ...);
- SPF, Service Product Facility: servizio dedicato alla comunicazione con le entità esterne che scambiano traffico con il Galileo Control Center.

2.5.2. Galileo: il segmento spaziale

2.5.2.1. Galileo: la costellazione

La costellazione del sistema Galileo pianificata per la fase Full Operational Capability (FOC) prevede 30 satelliti operativi in Medium Earth Orbit (MEO) (con ulteriori 6 satelliti MEO di riserva) ad un'altitudine di 23222 km.

In ciascuno dei tre piani orbitali inclinati con un angolo di 56° rispetto all'equatore, saranno distribuiti 10 satelliti che impiegheranno circa 14 ore per compiere un'orbita attorno alla Terra, ripetendo la geometria ogni 17 rivoluzioni (10 giorni siderali). Questa costellazione garantisce la visibilità di un minimo di sei satelliti con un'elevazione sopra l'orizzonte di oltre 10° da qualsiasi punto della superficie terrestre in qualsiasi momento [43].

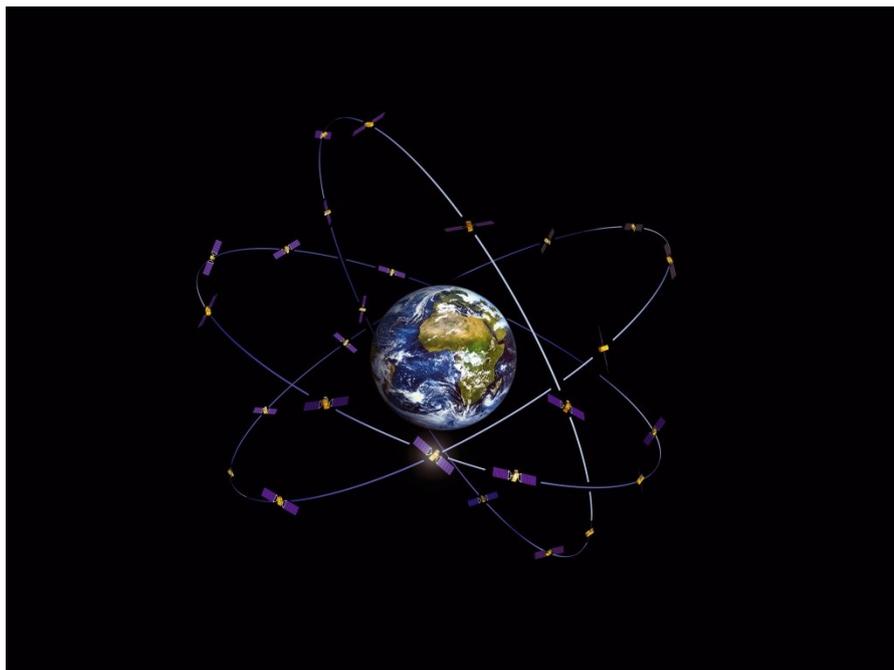


Figura 2.14 Segmento spaziale Galileo [43]

L'altitudine dei satelliti è stata scelta per evitare risonanze gravitazionali in modo che, dopo l'ottimizzazione iniziale dell'orbita, non siano necessarie ulteriori manovre di mantenimento. L'altitudine scelta garantisce inoltre un'elevata visibilità dei satelliti.

I vincoli di posizione per i singoli satelliti sono stabiliti dalla necessità di mantenere una costellazione uniforme, per questo motivo ciascun satellite deve trovarsi entro $\pm 2^\circ$ dalla sua posizione nominale rispetto ai satelliti adiacenti nello stesso piano orbitale ed entro 2° dal piano dell'orbita.

Con 30 satelliti a tale altitudine, c'è una probabilità molto alta (più del 90%) che in qualsiasi parte del mondo possano essere sempre in vista almeno quattro satelliti e quindi sia possibile determinare la propria posizione. L'inclinazione delle orbite è stata scelta per garantire una buona copertura delle latitudini polari, scarsamente servite dal sistema GPS statunitense [43].

2.5.2.2. Galileo: i satelliti

Nel corso degli anni sono stati inviati in orbita diversi satelliti, secondo le fasi descritte in precedenza:

Fase IOV: La fase IOV (In orbit Validation) consisteva dapprima nella definizione del sistema satellitare tramite test del funzionamento di due satelliti sperimentali, per passare poi alla realizzazione di una costellazione ridotta di quattro satelliti operativi e la relativa infrastruttura di terra.

I due satelliti sperimentali, denominati GIOVE-A e GIOVE-B, dove GIOVE significa Galileo In Orbit Validation, sono stati lanciati rispettivamente nel dicembre 2005 e nell'aprile 2008. Il loro obiettivo era finalizzato alla caratterizzazione dell'ambiente dell'orbita MEO (radiazioni, campo magnetico ecc.) e all'esecuzione di test delle prestazioni della strumentazione a bordo (orologi atomici e tecnologia digitale a prova di radiazioni cosmiche) nelle condizioni reali. Questi satelliti hanno permesso la trasmissione di un segnale sperimentale nello spazio in modo da fissare lo spettro di frequenza richiesto per Galileo in conformità con le allocazioni RNSS - WRC (Radionavigation Satellite Service - World Radiocommunication Conference) [44].

GIOVE-A, è stato costruito dalla Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL), aveva una massa di circa 600 kg, due orologi atomici ridondanti al rubidio con una stabilità di 10 ns al giorno. La sua vita operativa di 27 mesi fu estesa per mantenere la continuità della fase IOV prima del lancio del satellite GIOVE-B e dei satelliti successivi [6].

GIOVE-B è stato costruito da Astrium and Thales Alenia Space, aveva una vita operativa analoga a quella di GIOVE-A, un carico utile superiore e oltre ai due orologi atomici al rubidio, due orologi maser a idrogeno passivi con stabilità di 1ns al giorno [6].

I satelliti In-Orbit Validation (IOV) sono i primi 4 veicoli spaziali della Galileo Navigation Constellation, progettati e prodotti da Astrium sotto la guida principale del sito di Ottobrunn. I primi due satelliti operativi Galileo sono stati lanciati dall'ESA con il volo Soyuz

VS01 il 21 ottobre 2011 e sono stati dichiarati pienamente operativi sul primo piano orbitale nell'aprile 2012. I successivi due satelliti Galileo, che hanno completato il quartetto di satelliti della fase IOV, sono stati lanciati il 12 ottobre 2012 sul secondo piano orbitale dal lanciatore Soyuz ST-B dal Guyana Space Center e stanno trasmettendo segnali su E1, E5 e la banda E6 dal dicembre 2012 (sebbene il secondo di questi satelliti, il satellite E20, abbia cessato di funzionare nel 2014) [45].

I satelliti di questa generazione sono rappresentativi degli altri satelliti che sono stati messi in orbita successivamente. Ogni satellite ha una massa di circa 700 kg e combina due orologi atomici al rubidio e due orologi maser a idrogeno passivi con una potente trasmittente per trasmettere dati navigazionali precisi.

Il primo fix di posizione ottenuto con il quartetto satellitare IOV è stato segnalato il 12 marzo 2013 dal laboratorio di navigazione dell'ESA nei Paesi Bassi. In seguito, l'ESA ha avviato un'ampia varietà di test in tutta Europa per valutare le prestazioni del sottogruppo di sistemi già implementato.

A partire da febbraio 2014 il sistema Galileo ha raggiunto la In-Orbit Validation (IOV) dopo che i risultati dei test hanno dimostrato che il sistema satellitare Galileo era funzionante.

Fase IOC: La fase IOC (Initial Operational Capability) aveva come obiettivo la parziale messa in servizio del segmento spaziale e del segmento di controllo a partire dal 2014-2015 e l'avvio dell'Open Service, del servizio Search And Rescue (SAR) e il Galileo Public Regulated Service PRS.

La fase IOC prevedeva il lancio del primo lotto di satelliti (14 satelliti in aggiunta ai 4 satelliti IOV), l'implementazione della necessaria infrastruttura di controllo di terra, dei servizi di lancio, dei servizi di supporto del sistema e delle corrispondenti operazioni.

Il diciottesimo satellite è stato lanciato il 17 novembre 2016 e il 15 dicembre 2016 alle ore 13:00 UTC è stato dichiarato l'avvio dell'Open Service.

Ad Aprile 2017 è stato ufficialmente lanciato il servizio Search And Rescue (SAR). Questo nuovo servizio ridurrà il ritardo di rilevamento di un segnale di soccorso da un massimo di alcune ore a 10 minuti [46].

Fase FOC: La fase Full Operational Capability (FOC) consiste nello sviluppo dell'intero sistema che consisterà di 30 satelliti, di centri di controllo situati in Europa e una rete di stazioni di sensori e Uplink Stations (ULS) installate in tutto il mondo. La piena capacità operativa (FOC) di Galileo, inizialmente prevista per il 2020 dovrebbe essere raggiunta nel 2023 [1].

Nel gennaio 2017, le agenzie di stampa hanno riferito che sei degli orologi maser all'idrogeno passivi e tre degli orologi atomici al rubidio della costellazione erano fuori uso. Quattro dei satelliti operativi hanno perso almeno un orologio; ma nessun satellite ne ha persi più di due. L'operatività della costellazione non è stata influenzata poiché ogni satellite è munito di quattro orologi [47].

Nella Tabella 2.14 sono riportate le caratteristiche salienti dei satelliti Galileo:

Key Features	
Body Dimensions	2.5 x 1.2 x 1.1 m
Span solar generator	14.67 m
Solar generator power	1.9 kW
Navigation signals	3 bands (E5, E6, E1)
SAR Transponder	UHF Receiver 406 MHz L Band transceiver 1.544 MHz
Lifetime	> 12 years on-orbit < 5 years ground storage
Reliability	> 0.88 / 12 years
Launch mass	732.8 Kg

Tabella 2.14 Caratteristiche dei satelliti Galileo [43]

Seconda generazione di satelliti (G2G): A partire dal 2014, l'ESA e i suoi partner industriali hanno avviato studi sui satelliti Galileo di seconda generazione. È stata proposta l'idea di impiegare la propulsione elettrica, che eliminerebbe la necessità di uno stadio superiore durante il lancio [48]. Ciò renderebbe possibile l'inserimento di satelliti di un singolo lancio in più di un piano orbitale.

I satelliti di nuova generazione dovrebbero essere disponibili entro il 2025 [49] e serviranno ad implementare la rete esistente. Nel maggio 2021 l'ESA ha riferito di aver firmato i contratti per la progettazione e la costruzione del primo lotto di satelliti Galileo di seconda generazione (G2G) con Thales Alenia Space e Airbus Defence and Space. È prevista la produzione di 12 satelliti G2G, (6 costruiti da Thales Alenia Space e 6 da Airbus Defence and Space) che saranno caratterizzati da propulsione elettrica, segnali e capacità di navigazione potenziati, collegamenti inter-satellitari e riconfigurabilità nello spazio [50].

A Ottobre 2022 risultano utilizzabili 23 satelliti [51].

2.5.2.3. Galileo: i segnali

Ogni satellite Galileo trasmette 10 segnali navigazionali in polarità circolare destrorsa sulle bande E1, E6, E5a ed E5b. Vi sono alcuni servizi forniti autonomamente da Galileo e altri servizi risultanti dall'uso combinato di Galileo e di altri sistemi come EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). Il sistema EGNOS è un servizio SBAS (Satellite Based Augmentation System) sistemi concepiti per aumentare la disponibilità e la continuità dei GNSS esistenti per renderli adatti ad applicazioni critiche come il volo aereo o la navigazione marittima attraverso canali di modesta larghezza [6].

Questa possibilità di combinazione del sistema satellitare Galileo con altri servizi e in modo indipendente porta alla classificazione dei servizi Galileo in quattro categorie [52]:

1. Servizi Galileo esclusivamente satellitari: questi servizi sono forniti in tutto il mondo e indipendentemente da altri sistemi combinando i segnali trasmessi dai satelliti Galileo. Esiste un'ampia gamma di possibili applicazioni con diversi requisiti operativi che sono state raggruppate nei seguenti servizi di riferimento:

- **Open Service (OS):** Il Galileo Open Service è un servizio gratuito disponibile da dicembre 2016, quando sono stati dichiarati i Galileo Initial Services. I servizi evolveranno con l'implementazione dell'infrastruttura fino al raggiungimento della Full Operational Capability (FOC). In generale, le applicazioni del servizio OS utilizzeranno una combinazione di segnali Galileo e GPS, che miglioreranno le prestazioni in ambienti severi come le aree urbane. L'Open Service non offre informazioni sull'"integrity" e la determinazione della qualità dei segnali sarà lasciata interamente agli utenti. Non ci sarà alcuna garanzia di servizio o responsabilità da parte della Galileo Operating Company sull'Open Service [53]. L'"integrity" è definito dall'ICAO come la misura dell'affidabilità che può essere riposta nella correttezza delle informazioni fornite da un sistema di navigazione. L'"integrity" include la capacità del sistema di fornire avvisi tempestivi agli utenti quando il sistema non deve essere utilizzato per la navigazione. Tuttavia, l'Open Service includerà a breve termine un meccanismo di autenticazione denominato Galileo Open Service - Navigation Message Autentication (OS-NMA). Galileo è la prima costellazione che includerà un meccanismo NMA in un segnale di tipo Open Service. Questo meccanismo di autenticazione consente a un ricevitore GNSS di verificare l'autenticità delle informazioni GNSS e dell'entità che le trasmette, per garantire che provengano da una fonte attendibile. Il servizio Galileo OS-NMA sarà gratuito, nel novembre 2020 i satelliti Galileo hanno avviato la trasmissione dei dati di autenticazione a scopo di test. Dal 2021 è stata avviata una fase di test e validazione prima dell'inclusione ufficiale nel servizio Open Service di Galileo pianificata per il 2023 [54].
- **Galileo High Accuracy Service (HAS):** Il Galileo High Accuracy Service è l'evoluzione del precedente Galileo Commercial Service (CS) ed è destinato ad applicazioni che richiedono prestazioni più elevate di quelle offerte dall'Open Service. L'elevata precisione è generalmente intesa come una precisione di posizionamento dell'ordine di pochi centimetri. Negli ultimi anni sono stati utilizzati due approcci principali per fornire un'elevata precisione: Real Time Kinematic (RTK) e Precise Point Positioning (PPP). Il vantaggio principale dell'utilizzo del PPP nei confronti del RTK è che fornisce un servizio di posizionamento e temporizzazione globale e assoluto senza la necessità di stazioni di riferimento vicine. Il PPP si basa sull'uso

delle orbite dei satelliti GNSS e dei dati di timing accurati per stimare la posizione di un utente in base alle misurazioni della fase della portante, in cui il ritardo ionosferico viene generalmente rimosso eseguendo la combinazione iono free (si veda il paragrafo 4.1.4.3.1). La tecnica più comune e ottimizzata in termini di larghezza di banda per il PPP in tempo reale è inviare orbite e correzioni di timing al messaggio navigazionale, consentendo la ricostruzione dei valori accurati nel ricevitore [55]. Il Galileo High Accuracy Service fornirà gratuitamente correzioni ad alta precisione composte da orbite, clocks, correzioni di codice e di fase per ciascun satellite. Il servizio completo HAS includerà anche le correzioni atmosferiche di tipo Precise Point Positioning (PPP), nella componente dati del segnale Galileo E6-B, ma anche tramite trasmissioni di tipo terrestre, per i sistemi satellitari Galileo e GPS (Galileo E1/E5a/E5b/E6; E5 AltBOC e GPS L1/L5; L2) per ottenere migliori prestazioni in real time con un errore di posizionamento inferiore a due decimetri in condizioni nominali. Le correzioni ad alta precisione seguono un formato simile al Compact-State Space Representation (CSSR). Sono definiti due livelli di servizio per la fornitura di correzioni PPP ad alta precisione:

- Livello di servizio 1 (SL1): finalizzato a una copertura globale, fornisce correzioni ad alta precisione (orbite, clock) e bias (codice e fase) per i segnali Galileo E1/E5b/E5a/E6 ed E5AltBOC e GPS L1/L5/L2C.
- Livello di servizio 2 (SL2): finalizzato a una copertura regionale europea, European Coverage Area (ECA), fornisce oltre alle correzioni del servizio SL1, le correzioni atmosferiche (almeno ionosferiche).

Il servizio Galileo High Precision sarà implementato secondo un approccio in tre fasi:

- Fase 0 (test e sperimentazione High Accuracy): incentrata sulle attività volte a convalidare le capacità di trasmissione dei dati attraverso il canale E6B e l'esecuzione di test iniziali ad alta precisione. I test interni sono in corso dal 2019.
- Fase 1 (servizio iniziale High Accuracy): Fornitura di un primo servizio Galileo High Accuracy risultante dall'implementazione di un sistema di generazione di dati ad alta precisione che elabora solo i dati del sistema Galileo. Il servizio iniziale HA fornirà il livello di servizio 1 solo con prestazioni ridotte (al di sotto degli obiettivi del servizio completo). Questa fase è prevista dal 2022 in poi.
- Fase 2 (servizio completo High Accuracy): Erogazione completa del servizio Galileo High Accuracy a partire dal 2024, compreso il livello di servizio 1 e il livello di servizio 2, rispettando le prestazioni target (es. prestazioni di posizionamento di 20 cm) [56].

- **Public Regulated Service (PRS):** è destinato alle forze di sicurezza (polizia, militari, ecc.) che richiedono un'elevata continuità di servizio con accesso controllato. È un servizio sotto controllo governativo. Il PRS è simile ai servizi GNSS OS e HAS di Galileo, ma con alcune importanti differenze:
 - Il servizio PRS è in grado di garantire una migliore continuità del servizio agli utenti autorizzati quando l'accesso ad altri servizi di navigazione potrebbero risultare degradati (resilienza).
 - In caso di interferenze dannose, il servizio PRS aumenta la continuità di disponibilità del Signal-in-Space (robustezza).

Grazie al design del sistema e del suo segnale, il servizio PRS rende più costoso e difficile attaccare i suoi segnali. Nello specifico, il servizio è più resistente a:

- Spoofing: la trasmissione di segnali GNSS contraffatti che possono costringere un ricevitore a calcolare una posizione errata e indurre l'utente a credere di trovarsi in una posizione diversa da quella in cui si trova effettivamente. Il servizio PRS è in grado di garantire che in tali casi gli utenti autorizzati come le forze di emergenza, la polizia e altre autorità pertinenti mantengano la loro capacità operativa utilizzando le informazioni di posizionamento GNSS fornite dal PRS.
- Jamming: la trasmissione intenzionale di segnali che possono interferire con i segnali GNSS portando a un degrado o al blocco dei servizi di navigazione e temporizzazione GNSS. Il servizio PRS riduce questo rischio e facilita l'identificazione di potenziali jammer.

Il Servizio PRS è accessibile attraverso due segnali, uno nella banda E1 e l'altro nella banda E6 [57] [58].

- **Search And Rescue (SAR):** questo servizio contribuisce al servizio internazionale Cospas-Sarsat (Cosmicheskaya Sistyema Poiska Avarynykh Sudov, sistema spaziale per la ricerca di navi in difficoltà - Search And Rescue Satellite-Aided Tracking). Il sistema Cospas-Sarsat rileva il segnale UHF sulla frequenza 406-406.1 MHz lanciato utilizzando un apposito radiofaro (beacon) da un utente (ma anche da un aereo o una nave) in pericolo. Una volta rilevati dai satelliti del Sistema Cospas-Sarsat di cui il sistema satellitare Galileo fa parte, i segnali sono trasmessi a una ground station per poi essere analizzati per stimare la posizione del beacon. La stima della posizione, (insieme a tutte le informazioni sulla posizione che potrebbero essere state trasmesse nel messaggio di soccorso), calcolata dalla ground station denominata Local User Terminal LUT o MEOLUT per il servizio MEOSAR, sono inviate a una Mission Control Center (MCC), che svolge il compito di inviare il messaggio di

soccorso e le stime di posizione alle autorità competenti. Il Mission Control Center (MCC) invia il messaggio di emergenza e la posizione stimata all'autorità governativa responsabile per la ricerca e il salvataggio nell'area in cui si ritiene che si trovi l'utente. Tutte le informazioni contenute nel messaggio di soccorso dei beacon, insieme alle stime di località, vengono fornite al Rescue Coordination Centre (RCC). Il sistema Galileo permette di utilizzare i suoi satelliti per rilevare i messaggi di emergenza e dal 21 gennaio 2020 ha introdotto una nuova funzione SAR, grazie al servizio SAR/Galileo Return Link Service (RLS) che fornisce un messaggio di conferma automatica di ricezione della richiesta d'aiuto all'utente. L'RLS si basa sul segnale di navigazione E1 di Galileo ed è disponibile in tutto il mondo per i beacon abilitati. A partire da novembre 2014, le stazioni SAR a Spitsbergen nell'Artico norvegese, Maspalomas sulla più grande isola delle Isole Canarie spagnole e Larnaca sull'isola di Cipro, sono state rese capaci di raccogliere chiamate di soccorso via satellite da tutta Europa e le sue acque circostanti. Queste tre stazioni supervisionate da un centro di controllo a Tolosa, in Francia, sono strategicamente situate agli angoli più remoti del nostro continente formando un triangolo che racchiude l'Europa. Ogni sito è dotato di quattro antenne per rilevare chiamate di soccorso inoltrate via satellite e le tre stazioni sono interconnesse per funzionare congiuntamente, in modo che tutte e 12 le antenne possano tenere traccia dei satelliti [59].

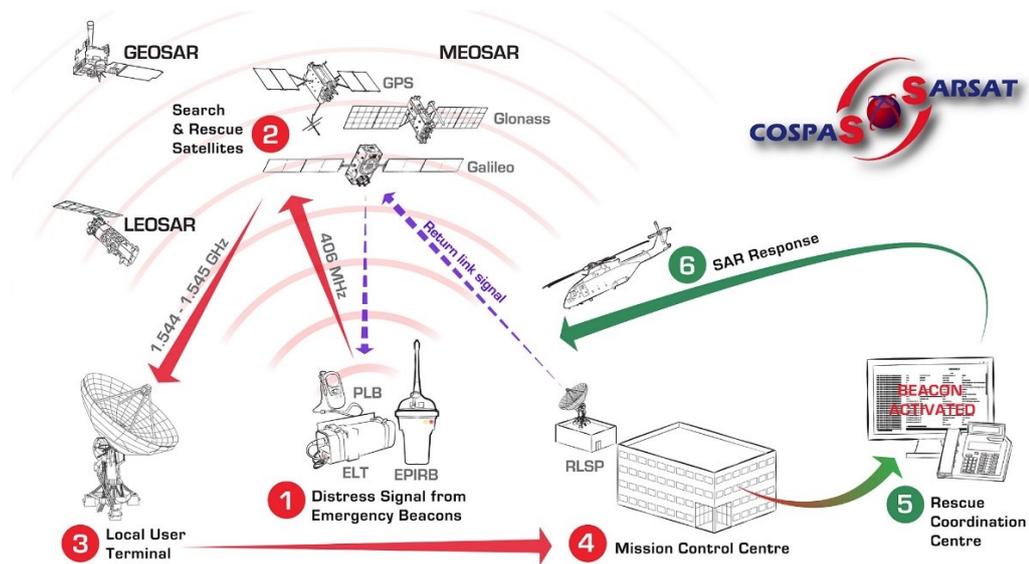


Figura 2.15 Funzionamento del sistema COSPAS-SARSAT [59]

2. **Servizi assistiti localmente:** i servizi Galileo forniti esclusivamente via satellite possono essere migliorati (“augmentation”) su base locale attraverso l’utilizzo di informazioni esterne, è il caso del GNSS interferenziale (in tutte le sue diverse tipologie), ma anche di tutti i sistemi che assicurano il miglioramento delle performance del sistema intese come integrità, continuità, disponibilità.

- 3. Servizi EGNOS:** EGNOS, il sistema regionale europeo di “augmentation” basato sui satelliti (SBAS), fornirà, nelle evoluzioni future, informazioni alle costellazioni GPS e Galileo, per migliorare le prestazioni di tali sistemi di navigazione globali. L’evoluzione del sistema EGNOS, EGNOS v3, sarà in grado di supportare un secondo segnale GPS (L5) e i segnali Galileo E1-E5 [52].
- 4. Servizi combinati Galileo:** tutti i suddetti servizi possono essere combinati con servizi forniti da altri sistemi di navigazione o di comunicazione. Questa possibilità migliorerà la disponibilità dei servizi GNSS per l’utenza e aprirà le porte a un’ampia gamma di applicazioni.

Come nel GPS, tutti i satelliti condividono le stesse frequenze attraverso l’utilizzo della tecnica CDMA.

Come accennato in precedenza, i segnali trasmessi sono segnali contenenti dati (che contengono codice e messaggi navigazionali) e segnali “pilota” (o toni pilota, che contengono solo codice).

I segnali trasmessi dal sistema Galileo sono:

Segnale E1: supporta i servizi OS, SAR e PRS. Contiene tre componenti del segnale di navigazione nella banda L1. Il primo, E1-A, è crittografato e accessibile solo agli utenti PRS autorizzati (contiene infatti dati PRS). Gli altri due componenti, E1-B ed E1-C, sono segnali Open Service (OS) accessibili quindi da tutti gli utenti.

E1-B è un canale dati ed E1-C un canale pilota (senza dati). Il flusso di dati E1-B, contiene anche messaggi d’”integrity” non criptati e dati commerciali crittografati a 250 sps (sample per second, un segnale analogico tempo continuo viene convertito in una serie di campioni tempo-discreti di periodicità 'Ts', ogni campione prende il nome di sample, il numero di campioni per unità di tempo (secondo) prende il nome di frequenza di campionamento). La modulazione di tipo MBOC viene utilizzata per i segnali E1-B ed E1-C, ed è implementata nella forma Composite Binary Offset Carrier (CBOC), (si veda la tabella 2.15 e fig. 2.17). Si noti che la banda E1 è condivisa con le bande GPS L1 e BeiDou B1. Il Return Link Message RLM (RLM) del servizio Search and Rescue (SAR) viene trasmesso solo nella componente E1-B. Il meccanismo di autenticazione Galileo Open Service - Navigation Message Authentication (OS-NMA) sarà aggiunto nel messaggio I/NAV E1.

Segnale E6: è un segnale dedicato per supportare i servizi HAS e PRS. Fornisce tre componenti del segnale navigazionale trasmessi nella banda E6.

Come nel segnale E1, il primo, E6-A, è crittografato e accessibile solo agli utenti PRS autorizzati. Gli altri due, E6-B ed E6-C, sono segnali di tipo High Accuracy Service (HAS) e includono un canale dati E6-B e un canale pilota (senza dati) E6-C. I dati del segnale E6-B sono trasmessi a una frequenza di 1000 sps. Si noti che la banda E6 è condivisa con la banda BeiDou B3.

Segnale E5a: supporta l'Open Service OS. È un segnale ad accesso libero trasmesso sulla banda E5a ed è composto da un canale dati E5a-I e un canale pilota, E5a-Q.

Il segnale E5a non è crittografato, ed è accessibile a tutti gli utenti. Trasmette i dati necessari per le funzioni di navigazione e temporizzazione a 50 sps che consente una migliore demodulazione dei dati.

La banda E5a è condivisa con le bande GPS L5, BeiDou B2a e futuri segnali GLONASS L5.

Segnale E5b: supporta i servizi OS, HAS e SAR. Si tratta di un segnale ad accesso libero trasmesso nella banda E5b ed è composto dal canale dati E5b-I e il canale pilota E5b-Q. Il segnale E5b non è crittografato ed è accessibile a tutti gli utenti. Il flusso di dati E5b contiene anche messaggi d' "integrity" non criptati e dati commerciali crittografati. La frequenza di trasmissione dati è di 250 sps. La banda E5b è condivisa con le bande BeiDou B2b e GLONASS G3 (leggermente traslata).

I componenti del segnale E5a ed E5b sono modulati su una singola frequenza portante E5 a 1191,795 MHz utilizzando una tecnica nota come Alternate Binary Offset Carrier (AltBOC). Il segnale composito dei segnali E5a ed E5b è indicato come segnale E5 e può essere elaborato, con un'implementazione appropriata del ricevitore utente, come un singolo segnale a banda larga. Ciò permette di ottenere meno problemi di multipath e di rumorosità del segnale.

Un riassunto dei segnali, frequenze e modulazioni utilizzate del sistema Galileo sono illustrate nella Tabella 2.15 e in Figura 2.16:

Band	Carrier freq. (MHz)	Channel or sig. comp.	Modulation type	Code rate (Mcps)	Data rate (sps)	Services
E1	1575.420	E1-A data	$BOC_{cos}(15,2.5)$	2.5575	N/A	PRS
		E1-B data	CBOC(6,1,1/11)	1.023	250	OS, SAR
		E1-C pilot			-	
E6	1278.750	E6-A data	$BOC_{cos}(10,5)$	5.115	N/A	PRS
		E6-B data	BPSK(5)		1000	HAS
		E6-C pilot			-	
E5a	1176.450	E5a-I data	AltBOC(15,10)	10.23	50	OS
		E5a-Q pilot			-	
E5b	1207.140	E5b-I data	AltBOC(15,10)	10.23	250	OS, HAS, SAR
		E5b-Q pilot			-	

Tabella 2.15 Segnali navigazionali del sistema Galileo [60] [61]

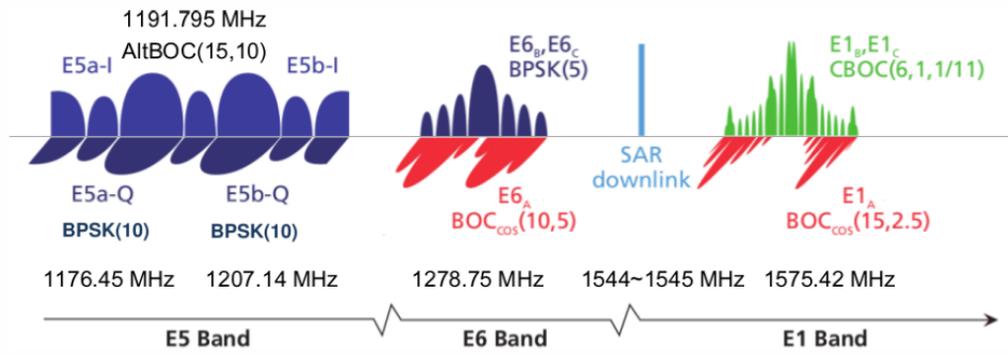


Figura 2.16 Spettro dei segnali Galileo [6]

2.5.2.4. Galileo: messaggio navigazionale

I satelliti Galileo trasmettono quattro messaggi navigazionali:

- Il messaggio navigazionale Freely accessible Navigation Message (F / NAV);
- Il messaggio Integrity Navigation Message (I / NAV);
- Il messaggio Commercial Navigation Message (C / NAV);
- Il messaggio Governmental Navigation Message (G / NAV).

I dati navigazionali contengono tutti i parametri necessari all'utente per calcolare una soluzione completa di posizione, velocità e tempo (PVT). Sono memorizzati a bordo di ogni satellite con una validità di determinata durata temporale e trasmessi in tutto il mondo da tutti i satelliti della costellazione Galileo.

I 4 tipi di dati necessari per eseguire il posizionamento sono [62]:

- Parametri delle effemeridi, necessari per indicare la posizione del satellite al ricevitore dell'utente;
- Parametri di correzione dell'ora e dell'orologio necessari per calcolare lo pseudo-range;
- Parametri di servizio necessari per identificare l'insieme dei dati di navigazione, dei satelliti e degli indicatori dello stato del segnale;
- Parametri dell'almanacco, necessari per indicare la posizione di tutti i satelliti della costellazione con una precisione ridotta.

I parametri delle effemeridi Galileo sono trasmessi come parametri orbitali di tipo kepleriano (come nel sistema GPS). Il periodo nominale di aggiornamento è di 3 ore ed è valido per un intervallo temporale di 4 ore. Il periodo di sovrapposizione di un'ora è concepito nel caso di brevi interruzioni o ritardi nelle trasmissioni [6].

I canali dati dei segnali Galileo trasmettono messaggi di diverso tipo a seconda dei contenuti generali individuati nella tabella seguente. I tipi di messaggi F/NAV corrispondono al servizio Open Service (OS) mentre i tipi di messaggi I/NAV corrispondono sia al servizio OS che all'High Accuracy Service (HAS). La tabella seguente indica la componente di segnale associata a ciascun tipo di messaggio navigazionale. Si noti inoltre che il Return Link Message (RLM) del servizio SAR Galileo è fornito nell'ambito dei dati I/NAV.

Message Type	Services	Component
F/NAV	OS	E5a-I
I/NAV	OS/HAS	E5b-I and E1-B
C/NAV	HAS	E6-B

Tabella 2.16 Allocazione dei messaggi e contenuto generale dei dati [62]

I messaggi navigazionali F / NAV e I / NAV sono chiamati super-frame e trasmessi come una sequenza di frame che sono composti da diversi subframe che a loro volta sono composti da diverse pagine come illustrato in Figura 2.17.

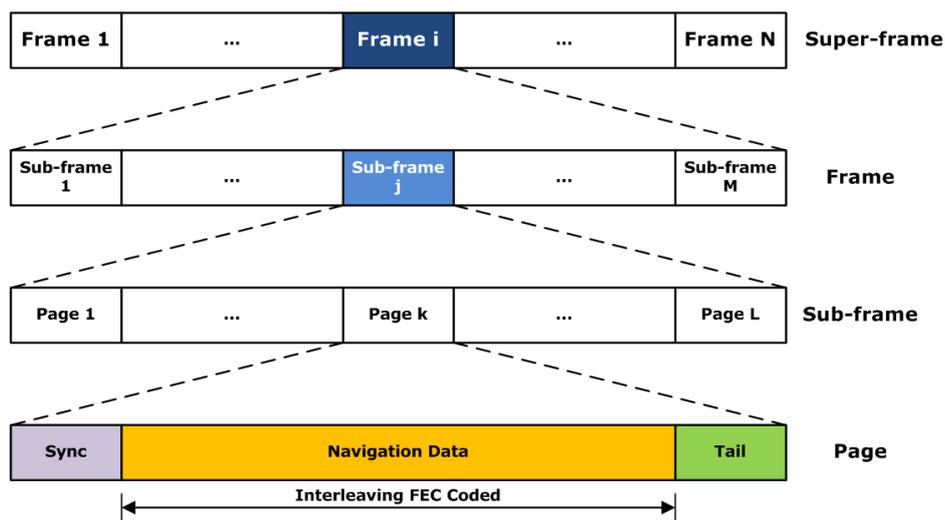


Figura 2.17 Struttura del messaggio navigazionale Galileo [61]

La struttura generale dei messaggi navigazionali è comune, ma il numero di subframe, numero di pagine e la durata di ciascuna pagina non sono gli stessi, come rappresentato nella Tabella 2.17:

Message	Channel	Data rate (bps)	Page duration (s)	Pages in a subframe	Subframes in a frame
F/NAV	E5a-I	25	10	5	12
I/NAV	E1B, E5b-I	125	2	15	24

Tabella 2.17 Struttura dei frame [61]

Questa disposizione consente di trasmettere le tre diverse categorie principali di dati a tre velocità differenti:

- Pagine: sono ripetute con un alto tasso di aggiornamento;
- Subframe: sono ripetuti con un tasso di aggiornamento medio;
- Frame: sono ripetuti con un basso tasso di aggiornamento.

La pagina inizia con una Synchronization Word (SW) seguita dai dati di navigazione codificati Forward Error Correction (FEC) e finisce con dei bit di coda per la loro decodifica. Inoltre, entrambi i messaggi navigazionali I/NAV e F/NAV trasmettono un campo dati Cyclic Redundancy Check (CRC) per individuare i dati danneggiati. La dimensione di questo campo è diversa in ciascun messaggio navigazionale.

Al flusso di dati dei messaggi navigazionali del sistema Galileo (Galileo Message Data Stream) sono applicati tre livelli di codifica degli errori:

- Cyclic Redundancy Check (CRC) con capacità di rilevamento degli errori dopo il recupero dei dati ricevuti;
- Una Forward Error Correction (FEC) con bit di coda (sequenza di zeri);
- Block Interleaving sui frame risultanti: fornisce robustezza all'algoritmo di decodifica FEC poiché in presenza di una grande quantità di bit errati vengono convertiti in piccoli errori in diverse pagine. Questa metodologia consente di ridurre il rapporto di errori per bit nel caso di maggiori velocità di trasmissione dati.

Come anticipato precedentemente, i simboli codificati FEC sono interposti all'interno della pagina e a causa di ciò, i dati di navigazione possono essere decodificati ad avvenuta ricezione della parte di codice FEC completa.

Come si può vedere nella Tabella 2.18, i parametri trasmessi nei messaggi navigazionali F/NAV e I/NAV hanno le stesse dimensioni ad eccezione dei parametri specifici del segnale e del messaggio, come "Issue of Data (IOD)" e "Navigation Data Validity and Signal Health Status". Nel caso del set "Satellite Almanac", anche la dimensione è diversa perché il set include il "Satellite signal health status" (stato di salute del segnale satellitare).

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

Tabella 2.18 Parametri del messaggio navigazionale del sistema Galileo [61]

2.5.3. Performance del sistema Galileo

Le performance del sistema Galileo sono differenti per ogni servizio fornito.

2.5.3.1. Performance del servizio Open Service (OS)

Il documento [63] (Galileo Initial Service - Open Service - Service Definition Document (OS SDD V1.0)), è un documento che definisce i livelli minimi di prestazione (Minimum Performance Levels, MPL) del Galileo Open Service (OS).

In questo documento si definisce la disponibilità del posizionamento, fissando l'errore di localizzazione per la componente orizzontale, Horizontal Positioning Error (HPE) a un valore inferiore ai 7.5 m, e non maggiore di 15 m per quella verticale, Vertical Positioning Error (VPE), valutata con un livello di confidenza del 95%.

Vengono assegnati inoltre diversi obiettivi: un Minimum Performance Level (MPL) riferito alla disponibilità del servizio, dell'87% nella posizione peggiore per l'utente, Worst User Location (WUL) e al 90% nella posizione media per l'utente, Average User Location (AUL).

Tali valori sono stati raggiunti con ampi margini come illustrato nei grafici tratti da [64] (Galileo-OS-Quarterly-Performance_Report-Q2-2022 April - June 2022), qui di seguito riportati nella Figura 2.18 e in Figura 2.19, in cui i risultati ottenuti sono mostrati separatamente per il caso peggiore a singola frequenza (E1, E5a, E5b) e della peggiore combinazione a doppia frequenza (E1-E5a, E1-E5b).

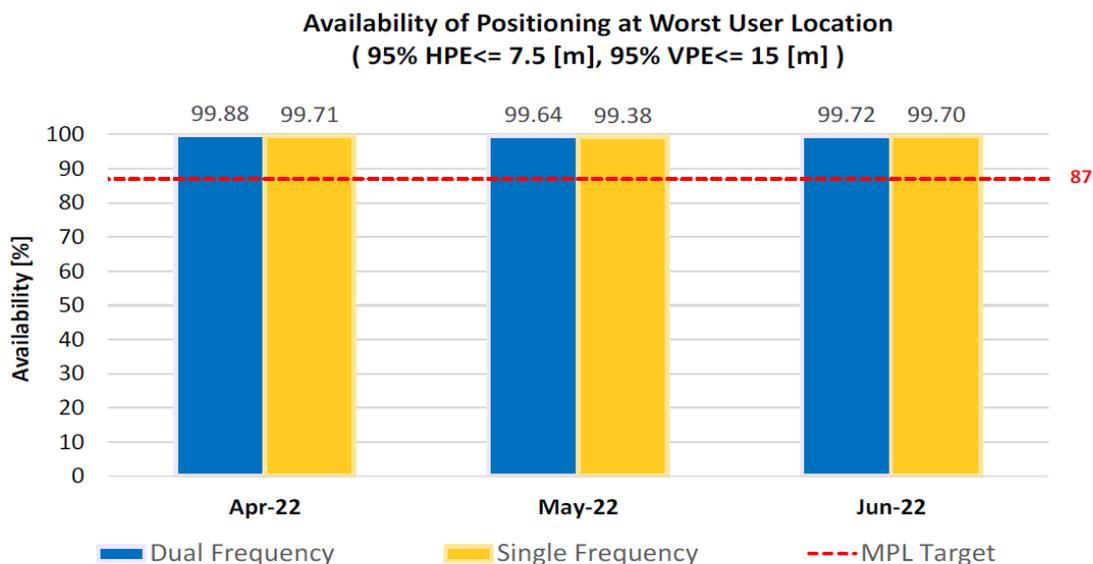


Figura 2.18 Disponibilità del servizio nella peggiore posizione per l'utente [64]

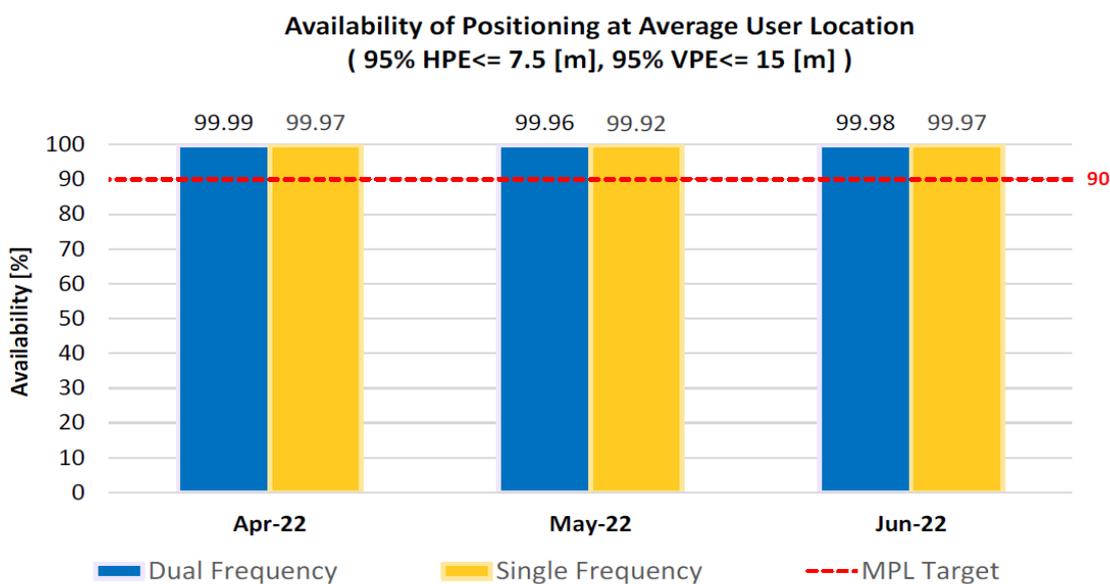


Figura 2.19 Disponibilità del servizio in una posizione di tipo medio per l'utente [64]

Come si può notare, i valori target sono raggiunti con ampi margini.

Nell'allegato D.4.2 del Galileo Initial Service - Open Service - Service Definition Document (OS SDD V1.0) [63] è riportata l'evoluzione dell'accuratezza della posizione orizzontale e verticale prevista per il servizio Open Service Galileo in singola e doppia frequenza e la sua evoluzione prevista rispetto al numero di satelliti operativi. I valori forniti sono valori medi globali (vale a dire calcolati come media su tutte le località servite), tenendo conto del vincolo di Position Dilution of Precision (PDOP) ≤ 6 .

	SERVICE		NUMBER OF SATELLITES	
	Horizontal Accuracy (95%)	Vertical Accuracy (95%)	22	24
DF	≤ 4m	≤ 8m	95%	99.5%
SF	≤ 15m	≤ 35m	94%	99.5%

Tabella 2.19 Performance previste dal servizio Open Service Galileo (media globale, in metri, accuratezza del 95%) [63]

Tali previsioni trovano riscontro nel [64] (Galileo-OS-Quarterly-Performance_Report-Q2-2022 April - June 2022) dove sono stati raggiunti i seguenti risultati (a titolo esemplificativo si riportano in Figura 2.20 e Figura 2.21 i risultati ottenuti a giugno 2022):

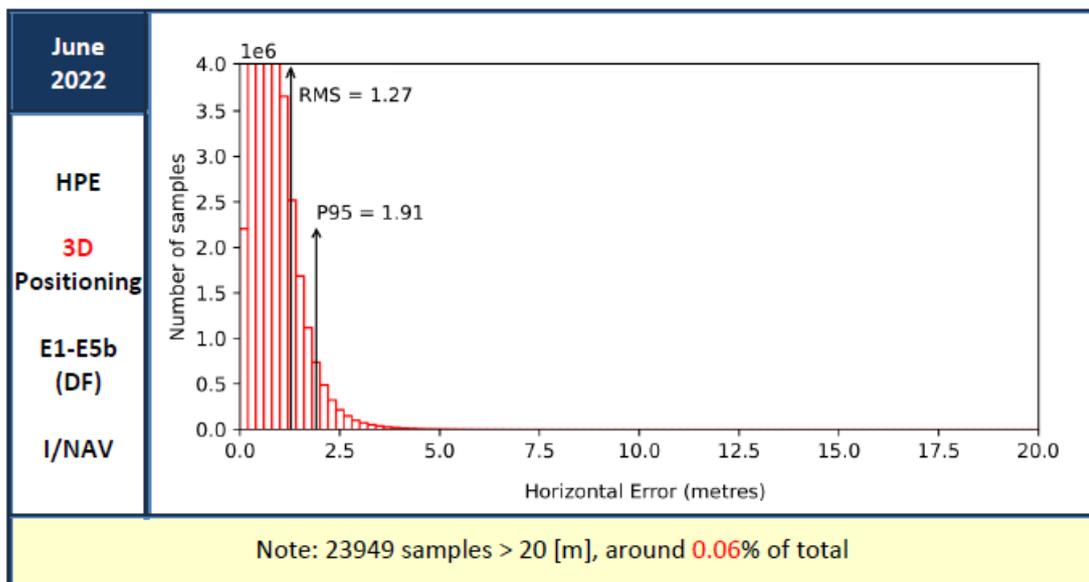
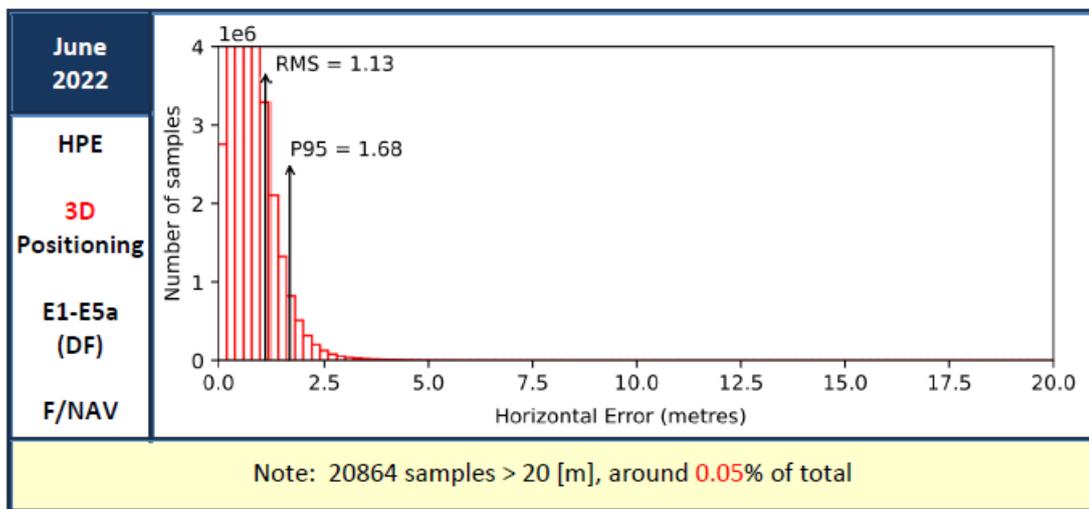


Figura 2.20 Horizontal Positioning Error (HPE) del servizio Open Service Galileo a giugno 2022 [64]

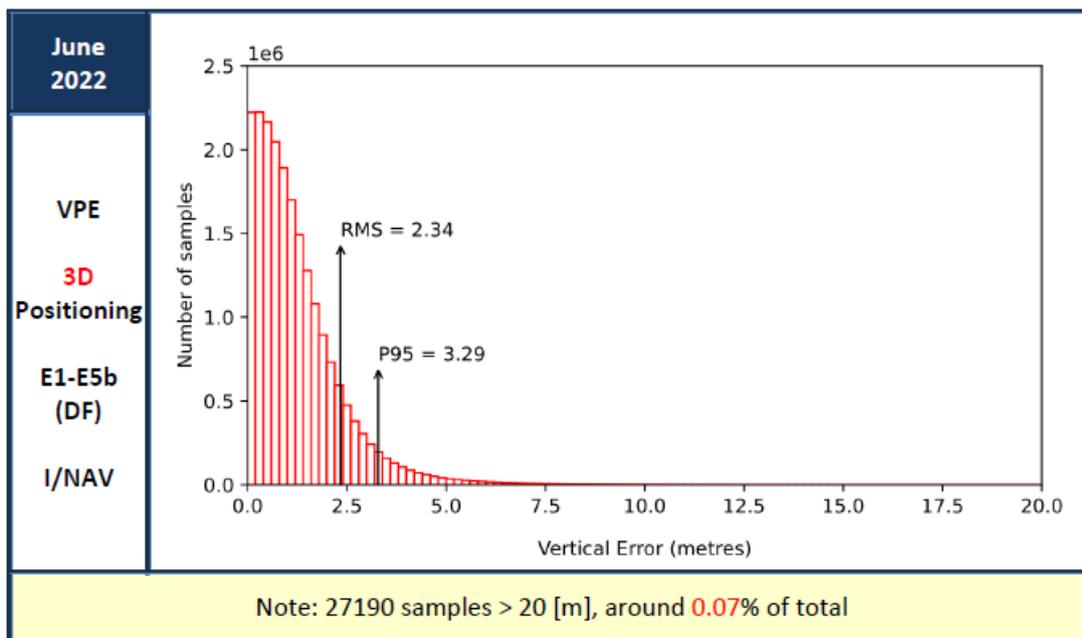
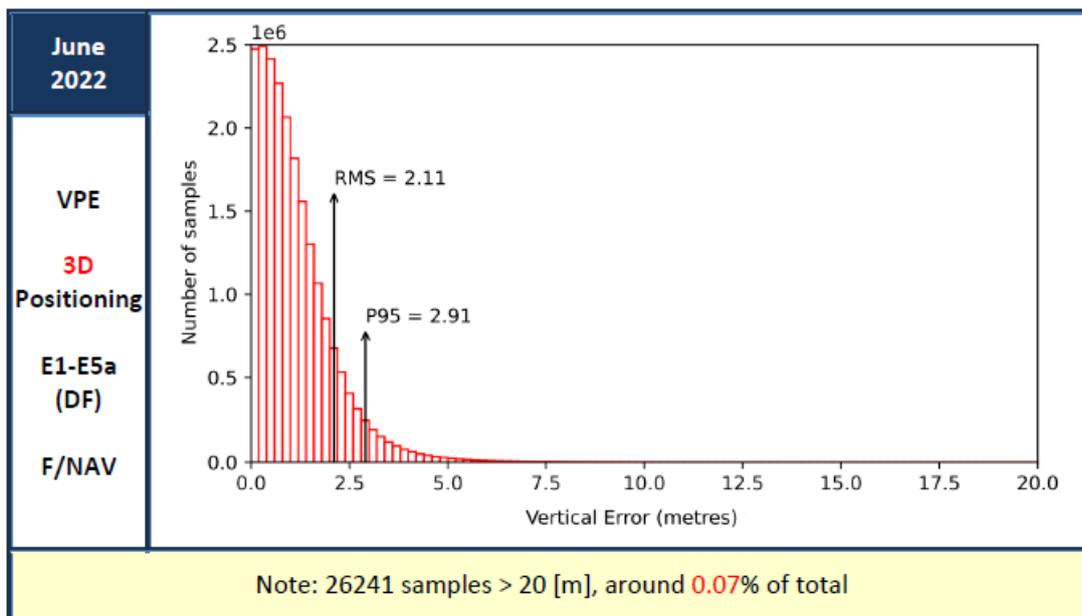


Figura 2.21 Vertical Positioning Error (VPE) del servizio Open Service Galileo a giugno 2022 [64]

Come si può vedere dalle figure sopra riportate si ha con una disponibilità del 95% una precisione orizzontale non inferiore a 1.91 m e verticale non inferiore a 3.29 m, inferiore a quanto previsto da [63].

Per quanto riguarda il timing accuracy in fase FOC si attesterà sui 30 ns [63].

2.5.3.2. Performance del servizio High Accuracy Service (HAS)

Il Galileo High Accuracy Service integra il servizio Open Service fornendo un segnale navigazionale aggiuntivo e servizi a valore aggiunto. Il segnale HAS può essere crittografato per controllare l'accesso ai suoi servizi e la precisione di posizionamento del ricevitore è prevista a livello decimetrico.

Come visto in presenza, il Galileo HAS comprende due livelli di servizi: il Service Level 1 (SL1) con copertura globale e il Service Level 2 (SL2) a copertura regionale.

La Tabella 2.20, ottenuta dai dati riportati nel Galileo High Accuracy Service, Info Note [65], riassume le performance dei due livelli:

PARAMETER	Service Level 1	Service Level 2
Coverage	Global	European Coverage Area (ECA)
Horizontal Accuracy 95%	< 20cm	< 20 cm
Vertical Accuracy 95%	< 40cm	< 40 cm
Convergence Time	< 300 s	< 400 s
Availability	99%	99%

Tabella 2.20 Prestazioni dei servizi HAS [65] [66]

2.5.3.3. Performance del Public Regulated Service (PRS)

Stando a quanto riportato da [66], il Galileo Public Regulated Service dovrà avere le performances riportate in Tabella 2.21:

	Galileo Public Regulated Service (PRS)
	Dual Frequency (DF)
Accuracy (95%)	Horizontal: 6.5 m
	Vertical: 12 m
Availability	99.5%
Timing Accuracy wrt UTC/TAI	30 ns
Ionospheric Correction	Based on DF Measurements

Tabella 2.21 Performances per il servizio Public Regulated Service Galileo [66]

2.5.3.4. Performance del Search And Rescue service (SAR)

Nel documento [67] (Galileo - Search And Rescue - Service Definition Document (SAR SDD v2.0)), sono definiti i livelli minimi di prestazione (Minimum Performance Levels, MPL) del servizio SAR Galileo, qui di seguito riassunti nelle tabelle 2.22, 2.23 e 2.24:

	Parameter	Expected value
Service Availability	Forward Link Service Availability	> 99%
	European MEOLUT Facility availability in Nominal mode	> 95%
	European MEOLUT Facility availability in Degraded mode	> 97.5%
Detection performance	Detection probability after 1 transmitted burst	> 99%
Location performance	Location Probability after 1 transmitted burst	> 90%
	Location Probability after 12 transmitted bursts	> 98%
	Location Probability after 1 transmitted burst within 5 km	> 90%
	Location Probability after 12 transmitted bursts within 5 km	> 95%
	Location Probability after 12 transmitted bursts within 2 km	> 90%

Tabella 2.22 Minimum Performance Levels per il servizio SAR Galileo Forward Link [67] [66]

Parameter	Expected value
Return Link Service Availability	> 95%
End-to-end Return Link Service Availability	> 90%
Galileo System Message Delivery Latency within 15 minutes	> 99%
Return Link Message Reception Probability	> 99%
End-to-end Message Delivery Loop Latency within 30 minutes	> 95%

Tabella 2.23 Minimum Performance Levels per il servizio SAR Galileo Return Link [67] [66]

Parameter	Expected value
SAR Repeater Availability	> 95%

Tabella 2.24 Minimum Performance Levels per il servizio SAR Galileo Space Segment [67] [66]

Tutti questi parametri risultano essere soddisfatti secondo il [68] SAR Service Quarterly Performance Report - April - June 2022.

2.6. I sistemi di navigazione satellitare regionali

Nei paragrafi seguenti saranno descritti brevemente i sistemi satellitari regionali attualmente esistenti come l'Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS), rinominato nell'aprile 2016 come Navigation Indian Constellation (NAVIC) e il Quasi-Zenith Satellite System (QZSS).

2.6.1. Il sistema IRNSS/NAVIC

Il sistema di navigazione satellitare regionale indiano (IRNSS) è un sistema di navigazione satellitare regionale di proprietà del governo indiano. Nell'aprile 2016, con l'ultimo lancio del satellite della costellazione, l'IRNSS è stato rinominato Navigation Indian Constellation (NAVIC), NAVIC in Hindi, Sanscrito e altre lingue indiane significa navigatore o marinaio.

L'IRNSS/NAVIC è concepito come un sistema di navigazione regionale indipendente e autonomo che mira a coprire un'area di circa 1500 chilometri intorno all'India.

Il progetto IRNSS/NAVIC prevede l'utilizzo di una combinazione di tre satelliti di tipo GEO e quattro di tipo GSO. IRNSS/NAVIC offre servizio di posizionamento standard (Standard Positioning Service (SPS)) e servizio limitato (Restricted Service (RS)) agli utenti su doppia frequenza in banda L5 e S [69].

2.6.1.1. IRNSS/NAVIC: il segmento di controllo

Il segmento di controllo (Ground Segment) è responsabile della manutenzione e del funzionamento della costellazione IRNSS/NAVIC.

Il segmento di controllo è composto da [69]:

- ISRO Navigation Centre;
- IRNSS Spacecraft Control Facility;
- IRNSS Range and Integrity Monitoring Stations;
- IRNSS Network Timing Centre;
- IRNSS CDMA Ranging Stations;
- Laser Ranging Stations;
- Data Communication Network.

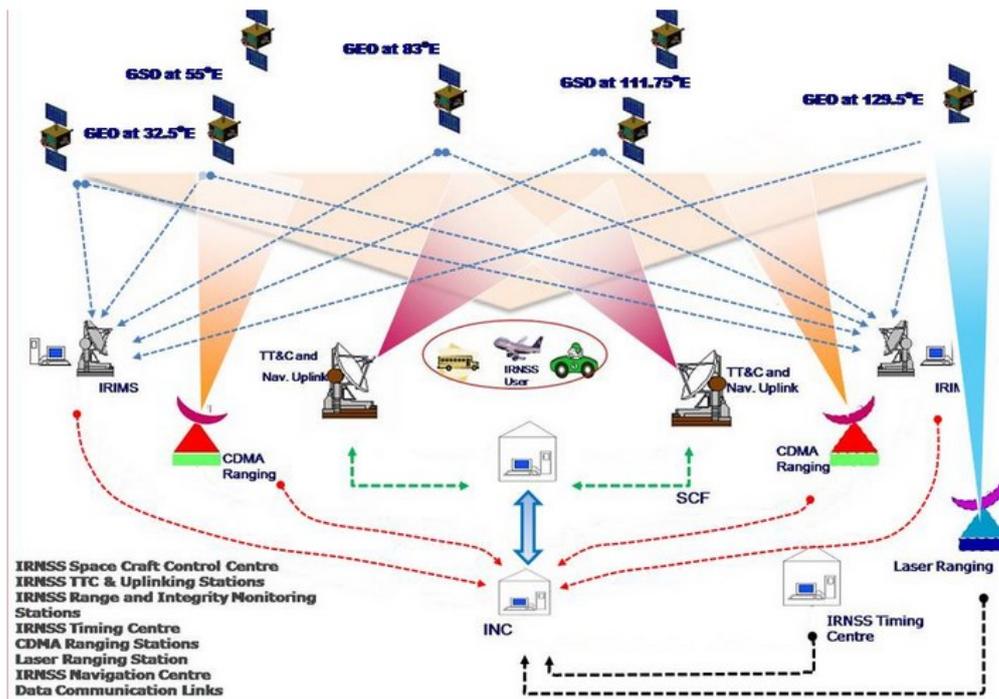


Figura 2.22 Architettura del sistema IRNSS/NAVIC [70]

2.6.1.2. IRNSS/NAVIC: il segmento spaziale

2.6.1.2.1. *IRNSS/NAVIC La costellazione*

Il segmento spaziale IRNSS/NAVIC è composto da 7 satelliti: 3 in orbita GEO (a 32°.5 , 83° e 131°.5 di longitudine Est) e 4 in orbite GSO (in orbite di 24000 km di apogeo e 250 km di perigeo con un'inclinazione di 29 gradi, due satelliti attraversano l'equatore a 55° Est e gli altri due a 111°.75 Est, quindi due satelliti per piano).

La vita utile stimata dei satelliti in orbita GEO è di 9.5 anni e di 11 anni nel caso dei satelliti in orbita GSO. Le considerazioni sulla progettazione della costellazione sono state principalmente:

- Ridurre il valore massimo dei parametri DOP;
- Utilizzare un numero minimo di satelliti;
- Slot orbitali concepiti per avere una visibilità continua con le stazioni di controllo.

2.6.1.2.2. *IRNSS/NAVIC I segnali*

Stando a quanto riportato da [70], il sistema IRNSS/NAVIC fornisce due tipologie di servizi sulla banda L5 sulla frequenza 1176,45 MHz e sulla banda S sulla frequenza 2492,08 MHz:

- Standard Positioning Service (SPS);
- Restricted Service (RS).

2.6.1.2.3. Il messaggio navigazionale

I segnali navigazionali saranno trasmessi nella frequenza della banda S e attraverso un'antenna phased array per mantenere la copertura richiesta e la potenza del segnale. L'orologio, le effemeridi, i dati dell'almanacco dei 7 satelliti IRNSS/NAVIC saranno trasmessi con la stessa accuratezza dei sistemi GPS, GLONASS e Galileo [69].

2.6.1.3. IRNSS/NAVIC: performance del sistema

Stando a quanto riportato da [69] è attesa una precisione intorno a 20 m sulla regione dell'Oceano Indiano (1500 km intorno all'India) e una precisione inferiore a 10 m sull'India e sui paesi adiacenti.

Nel 2020 l'IRNSS è stato riconosciuto come componente dei World Wide Radio Navigation Systems dell'IMO, che consente alle navi mercantili di utilizzare l'IRNSS per ottenere informazioni sulla loro posizione [71].

2.6.2. Il sistema QZSS

Il sistema satellitare Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) è un sistema di navigazione satellitare regionale commissionato dal governo giapponese come programma di sviluppo spaziale nazionale.

Il sistema QZSS è concepito per operare sinergicamente con i dati provenienti da altre costellazioni GNSS. Lo scopo principale del sistema QZSS è aumentare la disponibilità dei segnali satellitari nei numerosi canyon urbani del Giappone.

Per questo motivo il sistema QZSS è un sistema di posizionamento satellitare composto principalmente da satelliti in orbite quasi zenitali (Quasi Zenith Orbit, QZO). Il termine "Quasi-Zenith Satellite (QZS)" può riferirsi sia ai satelliti in QZO che alle orbite geostazionarie (GEO). Per questo motivo, il nome "QZO satellite" viene utilizzato quando è necessario fare specifico riferimento ai satelliti in QZO.

2.6.2.1. QZSS: il segmento di controllo

Il segmento di terra è composto da una stazione di controllo principale (Master Control Station, MCS), stazioni di controllo di rilevamento (TT & C), stazioni di misurazione laser e stazioni di monitoraggio. La rete di stazioni di monitoraggio copre la regione dell'Asia orientale e Oceania, con stazioni in Giappone (Okinawa, Sarobetsu, Koganei, Ogasawara) e all'estero: Bangalore (India), Guam, Canberra (Australia), Bangkok (Tailandia) e Hawaii (USA). La MSC è responsabile della generazione dei messaggi di navigazione che vengono inviati al satellite quasi-zenith tramite una postazione TT & C a Okinawa [72].

2.6.2.2. QZSS: il segmento spaziale

2.6.2.2.1. *QZSS: la costellazione*

Il segmento spaziale è costituito da tre satelliti posizionati in orbita altamente ellittica periodica (Highly Elliptical Orbit, HEO) e un quarto in un'orbita geostazionaria (GEO).

Il primo satellite è stato lanciato nel 2010 ora dismesso e l'ultimo nel 2021 [73].

Per i satelliti in orbita HEO, l'altitudine del perigeo è di circa 32000 km e l'altitudine dell'apogeo a circa 40000 km. Il sistema QZSS è progettato in modo che almeno un satellite su tre abbia un'elevazione vicina allo zenit sul Giappone.

Il sistema funziona nel seguente modo:

I satelliti geostazionari si muovono a una velocità tale da risultare per un osservatore a terra "fermi" nel cielo sopra l'equatore a una longitudine fissa in modo che possano essere visti in qualsiasi momento dalla superficie terrestre. Quando questi oscillano da nord a sud, sono su una "orbita geostazionaria inclinata (GEO)" - un'orbita simmetrica rispetto l'asse nord-sud a forma di otto. Tra i satelliti su orbita geostazionaria inclinata, i satelliti su orbita quasi-zenith (Quasi-Zenith Orbit, QZO) hanno una velocità più bassa nell'emisfero settentrionale quando si allontanano dalla Terra e una velocità più elevata nell'emisfero australe quando si avvicinano alla Terra.

Per questo motivo, l'orbita Quasi-Zenith (QZO) del sistema QZSS è un'orbita a forma di otto con asimmetria nord-sud. I satelliti trascorrono circa 13 ore nell'emisfero settentrionale e circa 11 ore nell'emisfero meridionale, consentendo loro di rimanere vicino al Giappone per un lungo periodo di tempo.

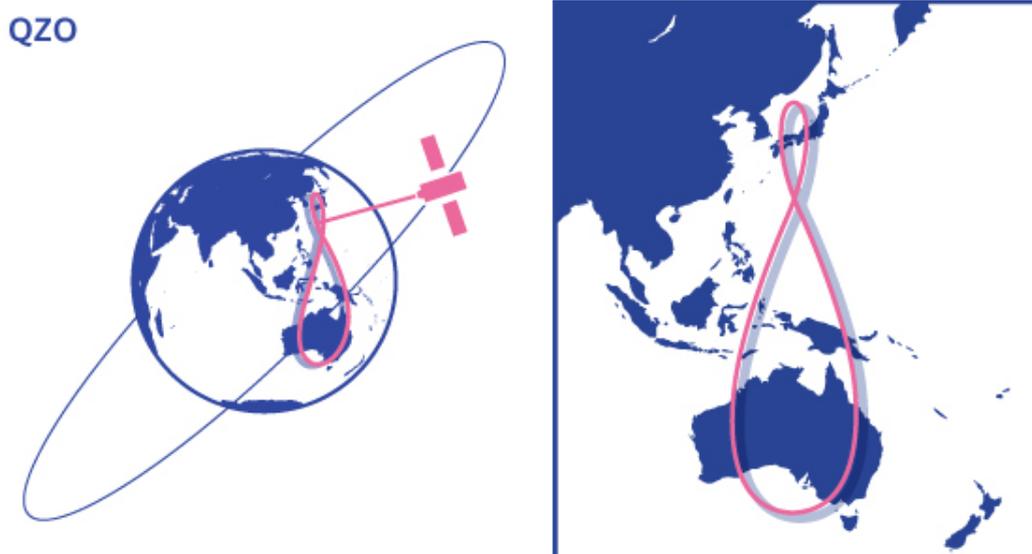


Figura 2.23 Orbita dei satelliti QZSS [74]

2.6.2.2.2. QZSS: i segnali

Tutti i servizi QZSS sono disponibili gratuitamente per qualsiasi utente. I servizi forniti dal sistema QZSS sono:

- **Satellite Positioning, Navigation and Timing Service (PNT):** Questo servizio può essere utilizzato in modo integrato con il GPS che si traduce in un numero maggiore di satelliti visibili in modo da consentire un miglioramento del DOP. Inoltre, gli angoli di elevazione dei satelliti QZSS consentono minori errori da multipath.
- **Sub-meter Level Augmentation Service (SLAS):** I dati di miglioramento del servizio satellitare a livello sub-metrico vengono trasmessi nei segnali L1S che sono dello stesso tipo dell'L1C/A utilizzato nel GPS. Questo servizio è destinato ad applicazioni che non sono fortemente influenzate da ritardi temporali (pedoni, biciclette, navi, ecc.) poiché le informazioni di miglioramento devono essere create prima di essere inviate e la visibilità dei satelliti QZSS possono influire sulle prestazioni del servizio.
- **Centimeter Level Augmentation Service (CLAS):** Utilizzando i dati delle stazioni di controllo basate sul GNSS dell'Autorità per l'Informazione Geospaziale del Giappone, è possibile ottenere un posizionamento satellitare estremamente preciso. Queste informazioni vengono trasmesse da segnali su banda L6 che richiedono ricevitori dedicati.
- **Positioning Technology Verification Service:** I satelliti QZSS possono essere utilizzati dalle istituzioni per testare le loro tecnologie di posizionamento di nuova concezione utilizzando i segnali L5S. Questo servizio usa gli stessi segnali L1S utilizzati dal servizio SLAS e consente la trasmissione di informazioni relative al disaster management a intervalli di quattro secondi. Gli arredi urbani e i dispositivi mobili possono essere dotati di ricevitori per trasmettere e visualizzare informazioni relative ai disastri anche in regioni remote. Questo servizio è attualmente distribuito in Giappone ma dovrebbe essere disponibile per la regione Asia-Oceania nel 2024-2025.
- **QZSS Safety Confirmation Service (Q-ANPI):** È stato proposto di utilizzare questo servizio come trasmissione dati dei rifugi di emergenza in modo che le informazioni sulla loro ubicazione e apertura, sul numero di sfollati possano essere inviate anche con un'infrastruttura di terra danneggiata. Il sistema utilizza i satelliti QZS e GEO ed è disponibile su dispositivi in banda S che supportano il servizio Q-ANPI.

- **Public Regulated Service:** Questo servizio consente il miglioramento del posizionamento tramite il solo sistema QZSS, anche quando il segnale GPS è disturbato o contraffatto. È riservato agli utenti autorizzati.
- **SBAS Transmission Service:** Utilizzando i satelliti QZSS posti su un'orbita GEO, questo servizio trasmette i dati SBAS.

2.6.2.3. Performance del sistema QZSS

Secondo quanto riportato dal documento [75], il normale servizio Satellite Positioning Service avrà le medesime performance della costellazione GPS ma con il vantaggio di poterle offrire anche in aree urbane o dall'orografia sfavorevole.

Per il Sub-meter Level Augmentation Service (SLAS) le accuratze fornite con la limitazione di 10° di elevazione sull'orizzonte dei satelliti per le due aree riportate in Figura 2.24, sono quelle riportate nella Tabella 2.25:

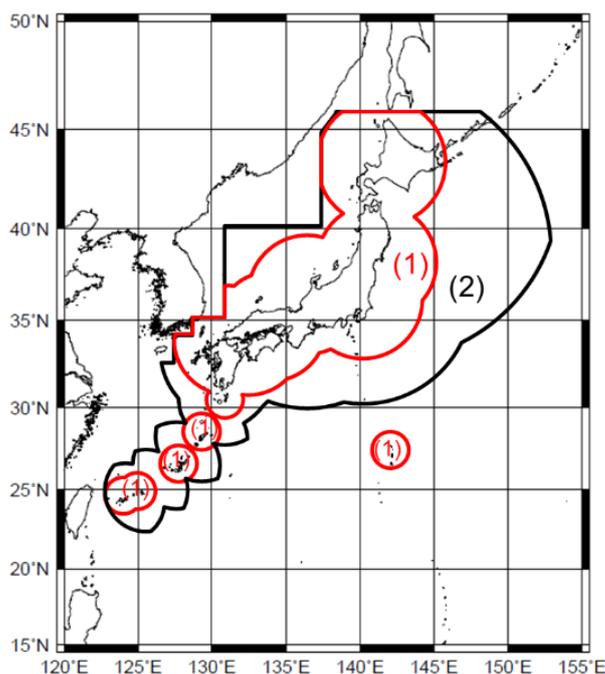


Figura 2.24 Aree servite dal servizio SLAS [75]

Zone	Positioning Error	
	Horizontal	Vertical
Zone (1)	≤ 1.0 m (95%) (0.58 m (RMS))	≤ 2.0 m (95%) (1.02 m (RMS))
Zone (2)	≤ 2.0 m (95%) (1.16 m (RMS))	≤ 3.0 m (95%) (1.53 m (RMS))

Tabella 2.25 Accuratezza del servizio SLAS [75]

Per il servizio Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) le accuratèzze fornite sono quelle riportate nella Tabella 2.26:

Positioning Type	Positioning Error	
	Horizontal	Vertical
Static	≤ 6 cm (95%) (3.47 cm (RMS))	≤ 12 cm (95%) (6.13 cm (RMS))
Kinematic	≤ 12 cm (95%) (6.94 cm (RMS))	≤ 24 cm (95%) (12.25 cm (RMS))

Tabella 2.26 Accuratezza del servizio CLAS [75]

2.7. Compatibilità e interoperabilità tra i diversi sistemi GNSS

Per **compatibilità** dei sistemi GNSS si intende la loro capacità di poter essere utilizzati in modo separato o congiunto senza interferire con ogni singolo servizio o segnale.

L'**interoperabilità** dei servizi di posizionamento satellitare si riferisce invece alla loro capacità di essere utilizzati insieme per fornire prestazioni migliori rispetto a quelle che si otterrebbero facendo affidamento esclusivamente su un solo servizio o segnale [76].

L'interoperabilità a sua volta può essere considerata come interoperabilità in termini di sistema e interoperabilità in termini di segnale.

2.7.1. Interoperabilità in termini di sistema

L'interoperabilità in termini di sistema, può essere vista come la capacità di tutti i sistemi di fornire, se utilizzati da soli, la stessa soluzione navigazionale, con la rispettiva precisione di sistema. Si può affermare che tutti i sistemi GNSS sono interoperabili a livello di sistema, offrendo al tempo stesso il vantaggio di essere gestiti in modo indipendente fornendo così ridondanza all'utenza dei sistemi GNSS.

2.7.2. Interoperabilità in termini di segnale

L'interoperabilità dei segnali si ottiene quando i segnali forniti dai diversi sistemi sono sufficientemente simili da consentire a un ricevitore GNSS di utilizzarli tenendo conto di alcuni importanti fattori [76] illustrati nei paragrafi seguenti.

Utilizzo della stessa portante

L'utilizzo di diverse frequenze portanti influisce sulla complessità e sul costo del ricevitore (ad esempio impone la necessità di ulteriori filtri passa-banda). Per quanto riguarda il sistema satellitare Galileo, le frequenze portanti OS (in particolare E1 ed E5a) e le loro

caratteristiche di modulazione ne semplificano l'uso combinato con le altre costellazioni (GPS, GLONASS e BeiDou). GPS e Galileo possono essere considerati interoperabili tra di loro a livello di segnale in alcune bande (ad esempio L1 e L5/E5a), ma non con i segnali GLONASS che utilizzano tecniche di modulazione FDMA (cioè frequenze diverse per ogni satellite).

Si noti che GPS e Galileo in bande di frequenza che non hanno corrispondenza, come E5b o L2 possono essere considerati non interoperabili tra loro ma compatibili in quanto non provocano interferenze l'uno sull'altro.

I segnali

Le differenti modulazioni, strutture del segnale ma anche i diversi messaggi navigazionali per i diversi GNSS che richiedono solo modifiche di tipo software al ricevitore, non pregiudicano la loro interoperabilità.

2.7.3. Sistemi di riferimento

Le tematiche relative ai sistemi di riferimento non verranno trattati in dettaglio in questa Tesi e si rimanda alla letteratura specifica sull'argomento per ulteriori approfondimenti [77].

Un **Terrestrial Reference System (TRS)** è un sistema di riferimento spaziale che ruota assieme alla Terra nel suo moto giornaliero nello spazio. In tale sistema, la posizione dei punti sulla superficie fisica terrestre hanno coordinate che subiscono solamente piccole variazioni nel tempo, a causa degli effetti geofisici (i.e. deformazioni tettoniche o di marea). Nel modello geofisico adottato in astro-geodesia, un TRS è modellato come un triedro solidale con la Terra e co-rotante assieme ad essa. Nel sistema Newtoniano, lo spazio fisico è considerato come uno spazio affine euclideo di dimensione 3. In tale caso, un tale triedro è un sistema affine euclideo (O, E). O rappresenta il punto dello spazio denominato origine ed E una base dello spazio vettore/vettoriale associato. E' una terna ortogonale destrorsa con la stessa lunghezza dei vettori base [77].

Si considerano TRSs geocentrici per i quali l'origine coincide con il centro di massa della Terra (geo-centro), l'orientamento è equatoriale (la direzione dell'asse Z coincide con quella del polo convenzionale terrestre (**CTP Conventional Terrestrial Pole**) e l'asse X rappresenta il meridiano passante per Greenwich). In aggiunta alle coordinate cartesiane (naturalmente associate a tale TRS), possono essere usati altri sistemi di coordinate, i.e. coordinate geografiche. Per una trattazione generale dei sistemi di coordinate si veda Boucher 2001 [78].

Un **Terrestrial Reference Frame (TRF)** viene definito come la realizzazione di un TRS, attraverso la definizione della sua origine, orientamento e scala e la loro evoluzione nel tempo. La realizzazione viene ottenuta mediante un set di punti fisici con coordinate determinate con elevata precisione in uno specifico sistema di coordinate, come

realizzazione di un Terrestrial Reference System. Viene anche designato come un crust-based TRF (agganciato alla crosta) quando i punti sono ancorati alla superficie terrestre.

Gli TRFs calcolati da centri di analisi nell'ambito delle attività dell'**IERS (International Earth Rotation Service)** sono determinate principalmente con tecniche di geodesia spaziale e sono fornite come soluzioni.

Una soluzione è definita come un set di coordinate con associati i fattori di covarianza (matrice di varianza-covarianza) o in forma equivalente (equazioni normali).

Sono necessari sette parametri per definire un TRF per una data epoca, alla quale sono aggiunte le derivate rispetto al tempo per definire l'evoluzione nel tempo del TRF. La selezione di 14 parametri definisce l'origine del TRF, la scala, l'orientamento e la sua evoluzione nel tempo.

Le tecniche di geodesia spaziale non sono sensibili a tutti i parametri della definizione del TRF. L'origine è teoricamente ricavabile attraverso tecniche dinamiche (LLR, SLR, GNSS, DORIS), essendo il centro di massa il punto attorno al quale orbitano i satelliti. La scala dipende da alcuni parametri fisici (ad es. La costante geo-gravitazionale GM e la velocità di propagazione della luce c) e dalla modellazione relativistica, ed è anche soggetta ad errori sistematici legati alle tecniche utilizzate. L'orientamento del TRF, non misurabile con alcuna tecnica, è arbitrario o definito convenzionalmente.

Dato che le osservazioni ottenute con tecniche di geodesia non contengono tutte le informazioni necessarie per definire completamente un TRF, sono necessarie delle informazioni aggiuntive per completare la definizione di un TRF. In termini di equazioni normali, usualmente ricavate con osservazioni di geodesia spaziale, questa situazione si riflette nel fatto che la matrice normale N è singolare, dato che ha una deficienza di rango corrispondente al numero di parametri del sistema di riferimento che non vengono ridotti dalle osservazioni [77].

L'**IERS (International Earth Rotation Service)** ha il compito di definire, realizzare e promuovere il sistema ITRS (International Terrestrial Reference System). L'ITRS è stato adottato formalmente dall'IUGG in occasione della sua assemblea generale svoltasi a Perugia nel 2007, attraverso la Risoluzione 2.

Per riassumere, le risoluzioni IAG e IUGG del 1991 e 2007, consistenti con l'ultima Risoluzione IAU, sono:

- Il termine **CTRS (Conventional Terrestrial Reference System)** deve essere usato per designare un TRS generico specificato da una lista di regole convenzionali che fissano la sua origine, scala e orientamento.
- Il termine **GTRS (Geocentric Terrestrial Reference System)** designa un CTRS con origine il centro di massa della Terra, calcolato includendo gli oceani e l'atmosfera.
- La scala temporale associata con il GTRS è il **Geocentric Coordinate Time (TCG)**, e la scala delle coordinate spaziali è consistente con il TCG.
- L'evoluzione nel tempo dell'orientamento del GTRS segue la condizione "*no-net-rotation*" (NNR) rispetto alla superficie della Terra.

La definizione spaziale dell'ITRS è consistente con quanto definito dallo IUGG 2007, e tutte le applicazioni pratiche (cartografia, navigazione) adottano l'ITRS come sistema di riferimento tridimensionale. La procedura pratica adottata originariamente dall'IERS assicura

che l'orientamento dell'ITRS coincida con il precedente sistema **BIH (Bureau International de l'Heure)** all'epoca 1984.0.

La definizione dell'ITRS rispetta le seguenti condizioni:

1. E' geocentrico, l'origine coincide con il centro di massa della Terra, calcolato includendo oceani e atmosfera;
2. L'unità di lunghezza è il metro (SI – Sistema Internazionale). La scala è consistente con le coordinate temporali TCG per un sistema locale geocentrico, in accordo con le risoluzioni IAU e IUGG (1991) Ciò è ottenuto utilizzando opportuni modelli relativistici;
3. Il suo orientamento è stato inizialmente fornito dal Bureau International de l'Heure (BIH) orientato all'epoca 1984.0;
4. L'evoluzione nel tempo dell'orientamento è garantita utilizzando la condizione di “*no-net-rotation*” con riferimento ai movimenti tettonici orizzontali sull'intera superficie della Terra [77].

Lo standard civile internazionale utilizzato per definire le coordinate è quindi l'**International Terrestrial Reference Frame (ITRF)**, tuttavia ogni sistema GNSS utilizza il proprio frame di riferimento, che dipende dalle coordinate delle stazioni di controllo, ciò è voluto anche per garantire l'indipendenza tra i diversi sistemi consentendo l'utilizzo di un secondo sistema di navigazione satellitare come soluzione di backup [76].

Anche se i gestori dei diversi sistemi GNSS utilizzassero lo stesso frame di riferimento, le diverse modalità di realizzazione di questi sistemi comporterebbero differenti precisioni.

Le differenze fra le coordinate nei diversi frame di riferimento devono essere almeno inferiori alle accuratèze specificate per il posizionamento con un singolo ricevitore.

Nel caso di rilievi di tipo differenziale, le differenze tra i diversi frame di riferimento sono ininfluenti poiché si annullano nei calcoli differenziali [76].

Il frame di riferimento delle coordinate GPS è il WGS84 mentre Galileo utilizza il **Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)** che sono entrambi realizzazioni dell'ITRF.

Il GTRF è una realizzazione altamente accurata dell'ITRS. In qualsiasi momento, l'allineamento tra il **GTRF** e l'ultima realizzazione fisica dell'ITRF è tale che la differenza tra le coordinate **ITRF** e **GTRF** delle stazioni ITRF utilizzate nella realizzazione del **GTRF** sia inferiore a 3 cm (2σ) [63].

Pertanto, per la maggior parte delle applicazioni, viene fornito un elevato livello di interoperabilità tra le posizioni spaziali ottenute con il GPS e quelle ottenute con Galileo, senza che sia necessaria un'ulteriore azione da parte dei ricevitori degli utenti [63].

2.7.4. Sistemi di riferimento temporale

Nella misura del tempo possono essere adottati diversi riferimenti temporali, basati sui diversi processi periodici associati, come la rotazione terrestre, la meccanica celeste o le transizioni tra livelli energetici negli oscillatori atomici. La Tabella 2.27 riassume i diversi sistemi temporali utilizzati e il loro processo periodico associato.

Periodic Process	Time
Earth rotation	Universal Time (UT0, UT1, UT2) Greenwich Sidereal time (Θ)
Earth revolution	Terrestrial Dynamic Time (DT) Barycentric Dynamical Time (BDT)
Atomic Oscillators	Temps Atomique International (TAI) Universal Time Coordinated (UTC) GPS, GLONASS, Galileo Reference Times

Tabella 2.27 Sistemi di riferimento temporali [8]

Ogni sistema GNSS ha il proprio riferimento temporale con cui tutti gli elementi dei diversi segmenti spaziali, di controllo e utente sono sincronizzati. I riferimenti temporali GNSS più rilevanti sono brevemente descritti nei paragrafi di seguito.

2.7.4.1. GPS Time (GPST)

L'ora GPS (GPST) è una scala temporale continua senza secondi intercalari (leap seconds) definita dal segmento di controllo GPS sulla base di una serie di orologi atomici presso le stazioni di monitoraggio e a bordo dei satelliti.

La differenza rispetto all'ora UTC è costituita da due componenti, nello specifico un numero intero di secondi e una parte frazionaria. Il primo è dovuto all'adeguamento dell'UTC per mantenere la scala temporale vicina all'ora solare media, poiché la scala GPST è continua, tale aggiornamento non viene effettuato.

L'epoca iniziale del GPST ha come origine temporale le 0h UTC (mezzanotte) del 5-6 gennaio 1980 (6.d0). A quell'epoca, lo scostamento con il TAI-UTC era di 19 secondi, ora invece è di 17 s quindi $GPS-UTC=n-17$ s. L'ora GPS è sincronizzata con l'UTC (fornito dall'United States Naval Observatory USNO) nell'ordine di 1 microsecondo, ma in realtà è mantenuta entro 25 ns [6]. L'USNO oltre a monitorare lo scostamento dell'ora GPS dall'UTC riporta questi dati al segmento di controllo GPS per l'utilizzo nelle correzioni della scala temporale che verranno poi trasmesse nel messaggio navigazionale.

2.7.4.2. Galileo System Time (GST)

Il Galileo System Time (GST) è una scala temporale continua gestita dal segmento di controllo Galileo e sincronizzata con il TAI con un offset nominale inferiore a 50 ns. L'epoca di inizio del GST, GST(T0), è definita 13 secondi prima delle 0:00:00 UTC della domenica 22 agosto 1999 (mezzanotte tra il 21 e il 22 agosto).

I parametri per valutare la differenza tra le scale temporali GPS e Galileo vengono trasmessi all'interno del messaggio di navigazione Galileo.

Le due scale temporali sono collegate dalla seguente relazione [79]:

$$GGTO = t_{GAL} - t_{GPS} \quad (2.4)$$

Dove:

GGTO: Galileo to GPS Time Offset;

t_{GAL} : tempo espresso nel sistema GST;

t_{GPS} : tempo espresso nel sistema GPST.

Nel messaggio navigazionale Galileo il GGTO è modellato come:

$$GGTO = A_{0G} + A_{1G} \times [TOW - t_{0G} + 604.800((WN - WN_{0G}) \bmod 64)] \quad (2.5)$$

Dove:

A_{0G} : parametro di trasmissione;

A_{1G} : parametro di trasmissione;

t_{0G} : tempo di riferimento per il GGTO;

TOW: Time Of Week (s);

WN: Week Number;

WN_{0G} : Week Number di riferimento per il GGTO

L'offset fra diversi sistemi di riferimento temporale possono essere trattati anche come un'ulteriore incognita nelle equazioni illustrate al paragrafo 4.1.1, ma anche con algoritmi più elaborati come illustrato in [79].

2.7.4.3. GLONASS Time (GLONASST)

A differenza di GPS, Galileo o BeiDou, la scala temporale GLONASS implementa i secondi intercalari, come il tempo UTC. Il GLONASS Time (GLONASST) è generato dal GLONASS Central Synchroniser e la differenza tra UTC (SU, Soviet Union) e GLONASST non deve superare 1 millisecondo per più di tre ore (ovvero, $GLONASST = UTC(SU) + 3h - \tau$, dove $|\tau| < 1 \text{ milisec.}$), ma solitamente è minore di 1 microsecondo [6].

2.7.4.4. BeiDou Time (BDT)

Il BeiDou Time (BDT) è una scala temporale continua che ha come origine temporale le 0h UTC del 1 gennaio 2006 ed è sincronizzata con il tempo UTC entro un intervallo inferiore ai 100 ns (modulo un secondo) [6].

3. Stato dell'arte relativo agli studi e ricerche che riguardano le analisi di dati GNSS/Galileo statici e cinematici e in particolare alle loro applicazioni alla navigazione area, marittima e terrestre

I **primi studi relativi all'analisi di dati Galileo** a diversi campi di applicazione sono stati eseguiti a partire dal 2005 e riguardano principalmente l'utilizzo dei segnali sperimentali dai primi due satelliti GIOVE-A e GIOVE-B e successivamente da una costellazione di 4 satelliti della fase In-Orbit Validation (IOV) [77-80]. In particolare, Simsky A. et al. nel 2006 [80] hanno eseguito un'analisi relativa alle performance dei segnali Galileo trasmessi dai satelliti GSTB-V2, Rooney E. et al. [81] nel 2008 hanno presentato i primi risultati di misure dai segnali sperimentali di GIOVE-A.

In Simsky A. et al. 2008 [82] gli autori hanno presentato i risultati dei **primi esperimenti delle performance relative ai multipath** delle modulazioni BOC(1,1) e MBOC basati sulle analisi di misure dal satellite sperimentale GIOVE-B effettuate con i ricevitori Septentrio AsteRx1 e PolaRx3G. Il confronto fra i dati registrati dal ricevitore PolaRx3G e quelli acquisiti dal ricevitore GETR (Galileo Experimental Test Receiver) - il primo ricevitore commissionato da ESA a Septentrio in grado di tracciare i segnali Galileo - hanno dimostrato che la differenza fra gli errori dei ricevitori sono a livello millimetrico. Il ritardo di gruppo fra i segnali L1 e L5 viene stimato con l'utilizzo di un modello iono-free che utilizza dati a 3 frequenze. Sono state anche confrontate le potenze dei segnali di **GIOVE-A e GIOVE-B**, maggiori di 3dB nella banda L1 e di 5 dB in quella E5. Utilizzando simultaneamente i dati Galileo multi-frequenza si possono stimare le ambiguità intere di fase con misure alle doppie differenze. Gli Autori hanno anche presentato i primi esperimenti di risoluzione delle ambiguità con dati tripla frequenza utilizzando dati contemporanei dai satelliti GIOVE-A e GIOVE-B e ottenendo anche delle stime sperimentali dei valori di rumore che limitano l'efficacia dell'approccio privo dell'effetto geometrico (geometry-free¹).

Steigenberger P. et al [83] hanno testato la qualità dei dati Galileo acquisiti in modalità statica da tre ricevitori GNSS Javad Triumph-VS installati presso l'Università Tecnica di Monaco (TUM, Technische Universität München, Germania in situazioni con un elevato rumore da multipath. Hanno confrontato le soluzioni ottenute da dati GPS utilizzando tutti i satelliti visibili e con una costellazione intenzionalmente limitata a quattro satelliti per ottimizzare il confronto con i dati Galileo in quel momento disponibili e utilizzando l'elaborazione cinematica epoca per epoca.

Nel 2012, Odijk et al. [84] hanno presentato i risultati di **misure singola frequenza RTK GPS + GIOVE**, utilizzando i dati della fase di implementazione GSTB-V2 del **Galileo System Test Bed**. Dopo il lancio dei primi quattro satelliti operativi Galileo, Rabbou e El-Rabbany [85]

¹ La combinazione lineare »geometry-free« elimina la componente geometrica della misura, lasciando tutti gli effetti legati alle frequenze (i.e., la rifrazione ionosferica, i ritardi strumentali, l'effetto »wind-up«) oltre al multipath e al rumore della misura. Può essere utilizzata per stimare il contenuto di elettroni in ionosfera, per rivelare la presenza di cycle-slips nelle misure di fase o anche per stimare le rotazioni di antenna.

hanno analizzato il miglioramento che questi satelliti, disponibili nel 2015, hanno portato al modello GPS PPP per applicazioni statiche e cinematiche in ambito urbano. Gli stessi autori in [86] hanno sviluppato modelli indifferenziati e **modelli PPP BSSD** (Between-Satellite Single-Difference) corretti degli errori ionosferici (ionosphere-free) utilizzando osservazioni multi-GNSS. L'accuratezza del modello BSSD PPP GPS/Galileo risulta migliorata rispetto al modello PPP non differenziato. Le performance del modello PPP Multi-GNSS sono state analizzate anche in altri studi, come in [87] e [88]. Uno studio relativo a misure RTK singola frequenza e multi GNSS è stato presentato da Odolinski, R., Teunissen, P.J. e Odijk, D. in [89], successivamente sono state analizzate le prestazioni dei modelli PPP Galileo utilizzando diverse frequenze, **tripla frequenza, tripla costellazione** [90], soluzioni PPP a **tripla frequenza e costellazione singola** [91], **modelli GPS/Galileo PPP a tripla frequenza** [92], **combinazioni a doppia, multi frequenza e multi-costellazione** [93], e **passaggio dall'approccio PPP a quello PPP-AR** [94], per **applicazioni statiche e cinematiche di alta precisione**.

La dichiarazione dell'**Initial Open Service (OS)** del 15 Dicembre 2016 ha segnato una pietra miliare nel programma Galileo. Come riportato nel Capitolo 1 di questa Tesi, l'Open Service di Galileo è disponibile liberamente per le applicazioni mass-market di sincronizzazione e posizionamento; non richiede alcuna autorizzazione e può essere utilizzato da qualsiasi utente in possesso di un adeguato ricevitore.

Le **applicazioni cinematiche** rappresentano uno dei principali domini di applicazione che possono beneficiare dei vantaggi del servizio OS. In questo ambito riveste particolare rilevanza lo studio dell'analisi delle performance di Galileo sia in singola che in multi-costellazione alle applicazioni cinematiche utilizzando diverse metodologie di posizionamento [6].

Essendo l'OS Galileo una pietra miliare relativamente recente nelle fasi di implementazione del sistema, a partire dal lancio del primo satellite Galileo, sono stati studiati i risultati della missione Galileo a diversi stadi di sviluppo, rivolgendo particolare attenzione anche alle applicazioni delle soluzioni combinate multi-costellazione al posizionamento cinematico e soprattutto alla navigazione terrestre.

Safoora Z. e J. G. Teunissen nel 2017 [95] hanno analizzato i segnali **Galileo IOV + FOC** e le precisioni dei dati cinematici Galileo con il segnale E5 in tempo reale (RTK) e in post-processing, attraverso una serie di esperimenti eseguiti per testare la potenza, il multipath e il rumore di questi segnali utilizzando i dati registrati su quattro basi corte di diversa lunghezza e con diversi ricevitori e antenne a Perth, in Australia e in Olanda. Nei test eseguiti, i segnali Galileo, con eccezione di E5, hanno mostrato diversi livelli di rumore e di multipath per i diversi ricevitori e antenne utilizzati. Il segnale E5 ha presentato un livello significativamente più basso di multipath e rumore rispetto agli altri segnali confermando che i dati Galileo E5, se corretti dall'effetto dei multipath, possono rendere possibile una risoluzione delle ambiguità quasi istantanea con i segnali dei satelliti Galileo presenti.

Steigenberger, P. e Montenbruck in [96] hanno dimostrato come nonostante la prima coppia dei satelliti della fase FOC abbia sofferto di un'anomalia in fase di lancio che ha causato il posizionamento dei satelliti su un'orbita ellittica, questi possano essere utilizzati per le applicazioni scientifiche senza rilevanti limitazioni. Inoltre hanno evidenziato il miglioramento significativo della qualità delle orbite predette rispetto all'inizio delle trasmissioni con un "signal-in-space range error" pari a 30 cm e a 5 cm per le orbite precise, utilizzando modelli appropriati per la pressione dovuta alla radiazione solare. Hanno infine verificato che il posizionamento del singolo punto con misure doppia frequenza e orbite broadcast ottenuto con i 9 satelliti Galileo allora operativi consentiva di raggiungere un'accuratezza di pochi metri, mentre le tecniche PPP con dati solo Galileo permettevano di raggiungere una precisione di 2 cm in modalità statica utilizzando soluzioni giornaliere. Hadas T. et al [97] hanno analizzato le performance di dati di posizionamento assoluto doppia frequenza Galileo anche in confronto agli altri sistemi satellitari considerati singolarmente e ai sistemi multi-costellazione. Dalle analisi eseguite gli autori hanno evidenziato che il posizionamento assoluto di precisione che utilizza le osservazioni pseudorange e di fase Galileo con l'utilizzo dei prodotti **IGS Real-Time Service (RTS)** o quelli del **Multi-GNSS Experiment** non ha la qualità di quello ottenuto con i corrispondenti dati GPS. In modalità statica l'RMSE (Root Mean Squared Error) calcolato fra le coordinate stimate e quelle di riferimento non eccede 0.05 m e 0.06 m rispettivamente per le componenti orizzontali e verticali. In modalità cinematica, le rispettive accuratèzze sono migliori di 0.17 m ed 0.21 m.

In Hafner P. et al. [98] gli Autori dell'Institute of Digital Image Processing del Joanneum Research, Graz, Austria hanno presentato le potenzialità e i limiti del posizionamento basato su misure GNSS in condizioni applicative particolari e restrittive, caratterizzate da elevate dinamiche, mascheramento di satelliti e alte frequenze di acquisizione, come il posizionamento e la guida di pedoni con problemi visivi, le applicazioni di ricerca e soccorso, la determinazione delle traiettorie e dell'assetto di piattaforme aeree, il posizionamento e orientamento di un utente mobile con tecniche di realtà aumentata e la determinazione della traiettoria e della velocità nel salto con gli sci. Per queste analisi gli autori hanno utilizzato il software commerciale Novatel GrafNav e un software sviluppato da loro che ha permesso l'individuazione e la correzione dei cycle slips e delle interruzioni dei dati nelle misure grezze di fase con un'analisi statistica della qualità dei dati, l'eliminazione dei dati con qualità bassa, il lisciamento dei dati di fase e tecniche di interpolazione per gli intervalli senza dati. In funzione di queste applicazioni, e in particolare in presenza di ostacoli e con dinamiche elevate, gli autori hanno individuato le tecniche e integrazioni migliori che consentono di ottenere informazioni di posizione con un livello appropriato di accuratezza (integrazione GNSS/IMS, utilizzo di algoritmi di smoothing e di interpolazione, tecniche di map-matching, utilizzo di dati multi-costellazione con dati Galileo).

Fengyu et al. [99] hanno analizzato le osservazioni registrate da 16 stazioni appartenenti al **Multi-GNSS Experiment (MGEX)** su un arco di 10 giorni per realizzare diverse casistiche PPP

e accertare le ultime performance delle soluzioni PPP solo Galileo e il contributo di Galileo alle soluzioni PPP multi-costellazione. I risultati statistici mostrano che l'accuratezza nel posizionamento tridimensionale di Galileo statico e PPP cinematico può raggiungere livelli decimetrici e centimetrici rispettivamente dopo la convergenza. Il contributo di Galileo può migliorare l'accuratezza del posizionamento PPP cinematico GPS fino al 29% e dell'11% per le soluzioni PPP cinematiche GPS/GLONASS nelle componenti di posizionamento 3D. Inoltre il tempo di convergenza media può essere ridotto del 45% per le soluzioni cinematiche PPP GPS e dell'11% per quelle GPS/GLONASS aggiungendo le osservazioni Galileo. I risultati ottenuti hanno mostrato anche che il livello di rumore dei segnali GPS L1/L2 e l'impatto negativo degli errori da multipath sulle osservazioni GPS pseudo-range risultano maggiori di quelli dei segnali Galileo E1/E5a, con residui delle osservazioni GPS di codice prive degli effetti ionosferici maggiori di quelli delle osservazioni di codice Galileo. I residui sulle osservazioni di fase sono invece dello stesso ordine di grandezza. Infine, l'errore fra sistemi (ISB – Inter System Bias) su un giorno è abbastanza stabile, con una deviazione standard di circa 0.34 ns.

In Ögütcü S. et al. 2020 [100] è stato investigato il **contributo della costellazione Galileo al posizionamento SPP GPS+GLONASS**. A tal fine è stata utilizzata una settimana di registrazioni del 2019 da 25 stazioni IGS-MGEX con dati di posizione **SPP GPS+GLONASS e SPP GPS+GLONASS+Galileo**. I risultati hanno mostrato che gli errori quadratici medi (RMSE) delle componenti nord, est e quota vengono migliorati dell'11%, 16%, e 4%, rispettivamente. È stato anche osservato che gli errori massimi vengono ridotti significativamente nelle soluzioni SPP GPS+GLONASS quando si aggiungono i dati della costellazione Galileo.

In Hernandez-Pajares M. et al., 2010 [101] vengono presentati i risultati principali ottenuti mediante lo sviluppo di un algoritmo avanzato **Enhanced Precise Point Positioning (EPPP) GNSS multi-frequenza**. Le principali innovazioni riguardano l'applicazione di correzioni ionosferiche precise per facilitare il calcolo delle ambiguità di fase, la loro validazione e il monitoraggio dell'integrità².

I lavori sino a qui citati sono stati focalizzati su un'analisi generale relativa alle applicazioni Galileo. Trattando la parte sperimentale di questa Tesi le applicazioni cinematiche Galileo alla navigazione terrestre in confronto ai sistemi di posizionamento satellitare GPS e GLONASS e alle loro combinazioni multi-costellazione, è stata quindi svolta una ricerca in letteratura principalmente relativa agli studi e alle applicazioni cinematiche in diversi contesti anche con integrazione di dati inerziali restringendo poi ulteriormente l'analisi al campo della navigazione terrestre.

Per quanto riguarda le applicazioni cinematiche Galileo alla navigazione aerea, la maggior parte dei lavori reperiti in letteratura riguarda l'utilizzo dei soli dati GPS [102] o soluzioni

² L'*integrity* rappresenta la misura dell'affidabilità che può essere riposta nella correttezza dell'informazione fornita da un sistema di navigazione e include la capacità del sistema di fornire in tempo messaggi di allerta agli utenti quando le caratteristiche del sistema non lo rendono utilizzabile per la navigazione.

ottenute con dati GPS associati ad altri sistemi GNSS (i.e., GLONASS, Galileo e BDS) [103] [104], così come integrazioni INS/GNSS [105].

Gli studi che riguardano le applicazioni Galileo alla navigazione marittima non sono molto numerosi. Fra gli altri, nel 2008, nell'ambito del progetto SEA Gate, si sono iniziate a sviluppare e testare le applicazioni Galileo, inviando un segnale Galileo-like [106] [107] [62]. Marila et al. [108] hanno evidenziato alcuni aspetti del posizionamento GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) per l'Intelligent Shipping Test Laboratory (ISTLAB), che ha proposto l'utilizzo di tecniche RTK con Virtual Reference Station (VRS).

Per quanto riguarda infine le **applicazioni Galileo alla navigazione terrestre riferita ai veicoli che si muovono su strada** l'attenzione è stata rivolta in particolare ai confronti con dati GNSS/INS di elevata precisione che permettano di ricostruire una traiettoria di riferimento per i successivi confronti con dati Galileo singola/multi-frequenza e singola/multi-costellazione: da ricerche eseguite in letteratura non sono stati finora trovati articoli relativi all'analisi sulle performance del sistema Galileo con utilizzo di traiettorie di riferimento ottenute da sistemi integrati GNSS/INS se non in lavori legati a ricercatori dell'Università di Trieste e in collaborazione con questo gruppo di ricerca.

In particolare, in Tarantino E. et al. [109] sono stati presentati i risultati preliminari di sperimentazioni con dati Galileo singola frequenza E1 e confronto con dati GPS e GLONASS con **l'utilizzo di una piattaforma MMS (Mobile Mapping System)** ad elevate prestazioni che consente di generare una traiettoria di riferimento continua e accurata grazie all'integrazione di dati GPS/INS. In questo studio era stato evidenziato che il sistema Galileo consente di raggiungere una migliore accuratezza planimetrica rispetto agli altri sistemi, mentre i dati altimetrici presentavano accuratezze inferiori rispetto ai dati GPS e GLONASS. In Bastos L. et al., 2022 [110] sono stati presentati, i risultati di test cinematici eseguiti fra il 2019 e il 2020 nell'ambito del Progetto GRC-MS (Galileo Reference Centre [111] – Member States) in ambito aereo, marittimo e della navigazione terrestre (quest'ultima in aree urbane ed extra-urbane), ottenuti con **soluzioni cinematiche GPS/GLONASS/Galileo singola e multi-frequenza, singola e multi-costellazione** e con soluzioni PPP GPS/GLONASS, interessanti specialmente nelle applicazioni alla navigazione marittima dove la lontananza rispetto alle stazioni delle reti GNSS permanenti rende particolarmente problematico il calcolo di soluzioni alle doppie differenze di fase.

Per quanto riguarda le analisi svolte nelle **campagne terrestri** in generale è stato evidenziato, come è ovvio, che i rilievi extra-urbani eseguiti con strumentazione GNSS geodetica sono caratterizzati da precisioni significativamente più elevate di quelli svolti in ambito urbano, a causa dell'impatto sul numero di satelliti acquisiti, sulla geometria satellitare (e quindi sui parametri DOP) e sugli errori da multipath, dovuto agli ostacoli presenti lungo le traiettorie percorse (in particolare edifici - urban canyon – ma anche sovrastrutture e veicoli circostanti).

Nei rilievi urbani, i valori di deviazione standard planimetrici dei confronti solo Galileo-GPS/INS sono risultati in generale più elevati rispetto ai corrispondenti valori solo GPS; i

valori di deviazione standard altimetrici dei confronti solo Galileo-GPS/INS sono risultati invece sempre più bassi rispetto ai corrispondenti valori solo GPS.

Per **le campagne extra-urbane**, i confronti con le soluzioni simultanee GPS/INS hanno mostrato performance superiori per i dati Galileo, in particolare in alcune campagne, per quanto riguarda i confronti sulle componenti planimetriche e altimetriche: a partire dalla campagna eseguita nell'estate 2019, i valori delle deviazioni standard sono risultati inferiori a 0.28 m e 0.64 m, rispettivamente per le componenti planimetriche e altimetriche, rispettando quindi per quanto riguarda i confronti sulle componenti planimetriche, i requisiti richiesti per il trasporto terrestre su strada [112].

Le analisi presentate in questi lavori rivestono particolare importanza per le future applicazioni del sistema Galileo alla navigazione area (anche con droni), marittima e terrestre dove i sistemi ITS (Intelligent Transport Systems) richiederanno l'utilizzo di tecnologie avanzate di posizionamento satellitare e telecomunicazione per la geo-localizzazione real-time di utenti e di merci e le interconnessioni fra veicoli.

Questi studi devono essere ulteriormente approfonditi estendendo i confronti fra soluzioni Galileo e GNSS multi-costellazione e multi-frequenza ad un numero maggiore di campagne di rilievo per verificare criticamente le prestazioni del sistema di posizionamento e navigazione satellitare Galileo e metterne in luce le differenze e le potenzialità rispetto ai sistemi satellitari GPS/GLONASS/BeiDou nella fase di transizione verso il completamento del segmento spaziale alla completa operatività programmata.

4. Analisi delle prestazioni del sistema satellitare Galileo

In questo capitolo verranno presentati i rilievi eseguiti in diverse campagne di misura svolte con l'obiettivo di analizzare le prestazioni ottenibili con il sistema satellitare globale Galileo in ambito cinematico.

Lo scopo dell'attività di ricerca è stato quello di testare le prestazioni del sistema satellitare Galileo nelle applicazioni alla navigazione terrestre, rispetto ai sistemi GNSS GPS e GLONASS, analizzando l'accuratezza nel posizionamento cinematico e le precisioni ottenibili in diverse condizioni operative e confrontando i risultati con quelli ottenuti utilizzando strumentazione geodetica multi-costellazione in differenti configurazioni con le diverse costellazioni attualmente in fase FOC.

Tali prestazioni sono state confrontate con quelle ottenute con i sistemi GPS e GLONASS, nonché con la loro combinazione GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo.

Per il calcolo delle soluzioni PVT (Position Velocity Time) si è ricorso al posizionamento geodetico interferenziale differenziale in modalità cinematica con relativa post-elaborazione e confronto con dati provenienti da un sistema GNSS/INS posizionato, come il ricevitore GNSS e la relativa antenna, a bordo di un MMS (Mobile Mapping System).

Nei paragrafi seguenti verranno dapprima trattate in modo speditivo le basi teoriche del rilievo GNSS utilizzato in questo lavoro di Tesi e successivamente si approfondiranno le caratteristiche tecniche della strumentazione adottata per passare infine alla descrizione delle campagne di misura svolte.

4.1. Modalità di misura

In questa Tesi di dottorato si è scelto di valutare le prestazioni del sistema Galileo mediante la modalità di posizionamento relativo di tipo geodetico interferenziale differenziale in modalità cinematica con relativa post-elaborazione. Nei paragrafi successivi verrà illustrato brevemente il funzionamento dei sistemi GNSS.

4.1.1. Introduzione al funzionamento dei sistemi GNSS

Prima di trattare le specifiche tecniche dei sistemi satellitari di navigazione, è opportuno introdurre le basi del posizionamento basato sui GNSS ed in particolare come sia possibile ottenere una posizione sulla superficie della Terra mediante il calcolo della distanza satellite - punto a terra [4]. In particolare verrà trattato il caso del GPS.

I sistemi GNSS consentono di posizionare un punto sulla superficie terrestre rispetto a un sistema di riferimento assoluto, geocentrico ECEF (Earth Centered Earth Fixed).

Il principio su cui si basa il posizionamento con tecnologia GNSS è sostanzialmente fondato sulla misura degli intervalli di tempo che i segnali, semplificati come impulsi con velocità pari a quella delle onde elettromagnetiche, inviati da dei satelliti impiegano per coprire la

distanza Satellite – ricevitore (più precisamente fra il centro di fase dell’antenna del satellite e il centro di fase dell’antenna del ricevitore), ed essere quindi captati dall’antenna del ricevitore posizionata nel punto di cui si vogliono conoscere le coordinate.

Il tempo ricopre un ruolo fondamentale in questa metodologia.

Per poter misurare questo intervallo temporale, sia i satelliti che i ricevitori sono muniti di orologi, che nel caso dei satelliti dei sistemi GNSS sono di tipo atomico ad elevata stabilità, mentre quelli dei ricevitori sono muniti di oscillatori meno stabili nel tempo (solitamente basati su cristalli di quarzo).

In realtà i satelliti non emettono semplici impulsi ma treni di onde quadre (sovraimposte come modulazione di fase alle sinusoidi portanti generata dagli oscillatori dei satelliti) che non sono sequenze di transizioni regolarmente alternate on-off, off-on, bensì esse seguono codici pseudo-casuali [8].

Malgrado questa struttura complessa dei segnali emessi dai satelliti, è possibile assimilare i fronti d’onda ad impulsi che viaggiano dai satelliti alle antenne a Terra.

In particolare il ricevitore determina l’intervallo Δt tramite una correlazione fra il codice ricevuto dal satellite ed una replica dello stesso codice generata all’interno del ricevitore: la replica del segnale viene fatta scorrere rispetto al codice ricevuto fino ad ottenere il massimo di correlazione fra i due segnali (Figura 4.1).

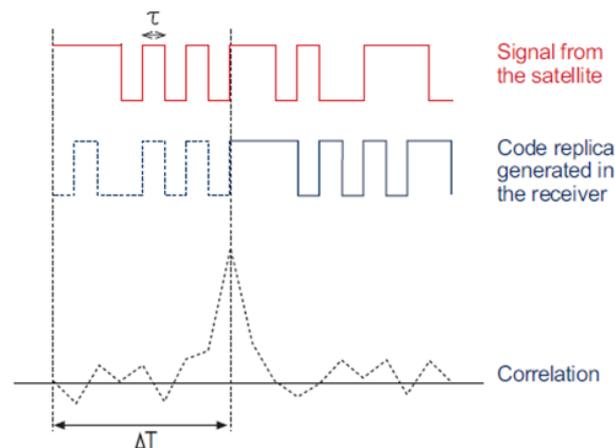


Figura 4.1 Misura dell’intervallo di tempo impiegato dal segnale per percorrere la distanza satellite-punto a terra mediante il confronto fra il segnale di codice generato nel ricevitore e il segnale ricevuto dal generico satellite [6]

La misura $\rho_i^j = c \Delta t$ rappresenta lo pseudorange fra l’antenna del ricevitore localizzato nel punto P_i e il satellite S^j .

Viene chiamato pseudorange in quanto è la “pseudo-distanza” (distanza apparente) fra il satellite e il ricevitore che non coincide con la sua distanza geometrica a causa, fra gli altri fattori, degli errori di sincronizzazione fra l’orologio del ricevitore e quello del satellite.

Tenendo esplicitamente conto dei possibili errori di sincronizzazione fra questi orologi, il tempo di trasmissione Δt (fra l’istante in cui il segnale viene ricevuto dal ricevitore e quello in cui viene generato dal satellite) è ottenuto come differenza nel tempo misurata dai due

diversi orologi in due diverse scale temporali: quella del satellite (t_{sat}) e quella del ricevitore (t_{rcv}).

La misura di pseudorange ρ_i^j tra il satellite e l'antenna del ricevitore, tenendo conto degli errori di orologio, ionosferici, troposferici e di quelli non modellati è definita da [100]:

$$\rho_i^j = \rho + c \cdot (dt_i - dt^j) + d_{TROP} + d_{IONO} + \epsilon_P \quad (4.1)$$

Dove:

- L'apice j: indica il satellite;
- Il pedice i: indica il ricevitore a terra;
- ρ_i^j : misura di pseudorange;
- ρ : distanza geometrica tra antenna del satellite e antenna del ricevitore a Terra (m);
- c: velocità della luce (m/s);
- d_{ti} : errore dell'orologio del ricevitore (s);
- d_{tj} : errore dell'orologio del satellite (s)
- d_{TROP} : errore dovuto al ritardo troposferico;
- d_{IONO} : errore dovuto al ritardo ionosferico;
- ϵ_P : errore complessivo di tutti gli altri errori non modellati.

Gli errori indotti dal ritardo ionosferico saranno trattati al paragrafo 4.1.4.3.1 mentre quelli di tipo troposferico nel paragrafo 4.1.4.3.2 , ed entrambi possono essere mitigati attraverso diverse strategie.

Considerando un solo sistema GNSS i parametri incogniti della formula (3.1) sono le coordinate tridimensionali ECEF dell'antenna del ricevitore e l'errore di orologio del ricevitore dt_r . il che comporta l'utilizzo di 4 equazioni (3.1) e quindi richiede la visibilità di almeno 4 satelliti per il calcolo della posizione del punto a terra.

Se viene utilizzata più di una costellazione bisogna tenere conto anche dell'errore dovuto all'utilizzo di diversi sistemi GNSS (Inter-System Bias ISB). L'ISB può essere espresso come la somma delle differenze dei ritardi dipendenti dall'hardware del ricevitore che si verificano utilizzando diversi sistemi GNSS e le differenze di tempo indipendenti dall'hardware del ricevitore che sono causate dall'utilizzo dei diversi riferimenti temporali dei diversi GNSS illustrati nel paragrafo 2.7.4. Utilizzando la formula (3.1) e considerando come riferimento temporale quello del GPS come tempo di riferimento, le osservazioni GPS GLONASS e Galileo possono essere scritte come:

$$\rho_i^G = \rho_G + c \cdot (dt_i - dt^G) + d_{TROP}^G + d_{IONO}^G + \epsilon_P^G \quad (4.2)$$

$$\rho_i^R = \rho_R + c \cdot (dt_i - dt^R + ISB^R) + d_{TROP}^R + d_{IONO}^R + \epsilon_P^R \quad (4.3)$$

$$\rho_i^E = \rho_E + c \cdot (dt_i - dt^E + ISB^E) + d_{TROP}^E + d_{IONO}^E + \epsilon_P^E \quad (4.4)$$

Dove G, R ed E si riferiscono rispettivamente ai sistemi GPS, GLONASS e Galileo, l'ISB indica l'Inter-System Bias rispetto al tempo GPS. Per la soluzione Single Point Positioning multi costellazione i parametri incogniti possono essere espressi come:

$$\bar{X} = [X_i, Y_i, Z_i, dt_i, ISB^{r,k}] \quad (4.5)$$

Dove X_r, Y_r, Z_r , sono le coordinate del ricevitore e $ISB^{r,k}$ si riferisce al parametro ISB per ciascun sistema GNSS rispetto a quello GPS.

4.1.2. Il rilievo differenziale

La metodologia di rilievo differenziale è una modalità di posizionamento relativo che prevede l'utilizzo contemporaneo di almeno due ricevitori GNSS. Ricevendo contemporaneamente i segnali degli stessi satelliti, è possibile ridurre gli errori sistematici presenti nelle osservazioni registrate da un singolo ricevitore.

Il ricevitore che rimane stazionario su un punto di coordinate note viene denominato ricevitore "base", mentre il secondo ricevitore, posizionato sul punto di coordinate incognite viene denominato "rover". Questa metodologia di misura permette di utilizzare più rover in contemporanea, utilizzando sempre la stessa stazione base.

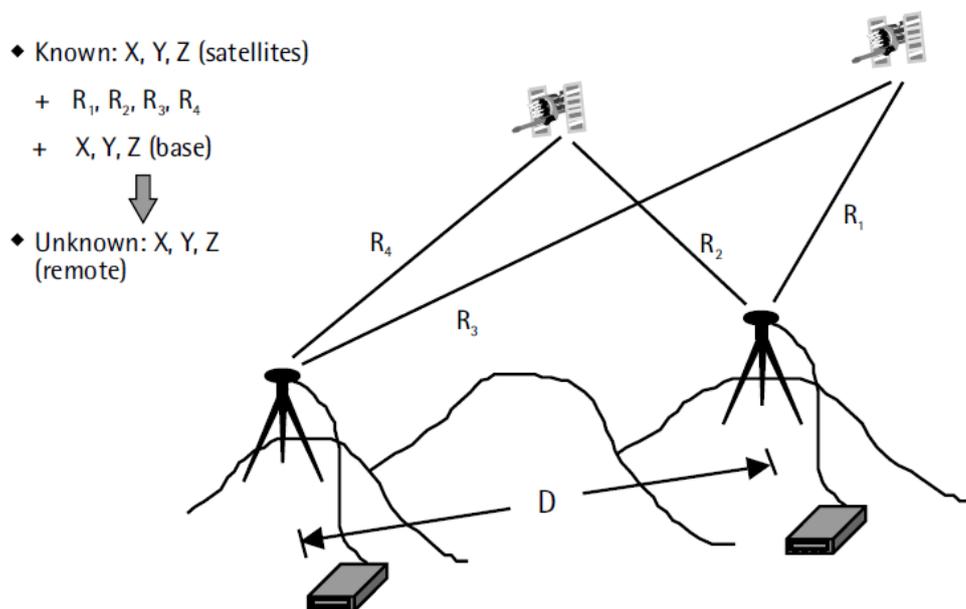


Figura 4.2 Principi del posizionamento di tipo relativo [113]

Analogamente a quanto illustrato nel paragrafo 4.1.1, per poter calcolare la posizione del ricevitore rover è richiesto un numero minimo di quattro satelliti, che in questo caso devono essere visibili contemporaneamente da entrambi i ricevitori. Solitamente, maggiore è il numero di satelliti tracciati da entrambi i ricevitori e maggiore sarà la

precisione della soluzione trovata, anche se particolari condizioni, come una disposizione dei satelliti sfavorevole possono inficiare tale affermazione.

Questa metodologia può utilizzare sia le misure di codice che quelle di fase e può essere applicata sia in tempo reale, “real-time” che successivamente, in “post-processing”. I dati dei ricevitori vengono campionati con un intervallo che solitamente non supera i 30 s nel caso di rilievi di tipo statico, mentre nel caso di rilievi di tipo cinematico si punta ad avere una frequenza di campionamento maggiore, che viene scelta in base alla velocità con cui si muove il rover.

4.1.3. GNSS interferenziale – utilizzo di misure di fase

In questo paragrafo saranno illustrati brevemente i principi su cui si basano i rilievi che fanno uso di misure di fase. Le formulazioni e le spiegazioni qui di seguito riportate sono tratte da [114].

La modalità interferenziale prevede la misura del ritardo di fase delle portanti GNSS (L1, L2, L5 per il GPS; E1, E5a, E5b per Galileo ecc.), accumulato nel percorso satellite - antenna a terra.

Di seguito si prenderanno in considerazione in particolare le portanti del sistema satellitare GPS.

Il ritardo di fase viene calcolato rispetto ad una sinusoide di uguale frequenza generata all'interno del ricevitore.

A tale scopo viene eseguita una correlazione incrociata fra il segnale C/A o quello P generati nel ricevitore e quello ricevuto dai satelliti.

Una volta realizzata la correlazione, il segnale generato localmente dal ricevitore è centrato su quello ricevuto dai satelliti ed è possibile sottrarre dalla portante ricevuta il segnale ripetuto nel ricevitore.

Dopo aver ricavato la portante pura del segnale, è possibile confrontare la sua fase con quella di una sinusoide della stessa frequenza generata localmente (questo confronto può avvenire sia sulla sola L1 che su più portanti). Il sistema di misura della fase risolve un ciclo di fase (2π) in circa 360 parti: la distanza fra l'antenna del ricevitore GNSS e il satellite viene quindi misurata con un'incertezza strumentale dell'ordine del mm.

La differenza di fase che viene misurata nel ricevitore GNSS i -esimo fra la copia del segnale generato localmente e la portante emessa dal satellite è data da:

$$\Delta\varphi = 2\pi f \cdot \frac{\rho_i^j}{v_i} - \varphi_i + \varphi^j \quad (4.6)$$

Dalla quale è possibile ottenere l'espressione della distanza antenna del ricevitore GNSS e il satellite:

$$\rho_i^j = N_i^j \lambda_i^j + k_i^j \lambda_i^j + \frac{\varphi_i}{2\pi} \lambda_i^j - \frac{\varphi^j}{2\pi} \lambda_i^j \quad (4.7)$$

Con:

- N : “ambiguità” è il numero intero di lunghezze d’onda comprese tra il satellite e l’antenna del ricevitore GNSS;
- λ : lunghezza d’onda media della portante;
- k : frazione di lunghezza d’onda, misurata a partire dall’istante iniziale, $0 < k < 1$;
- φ : fase della sinusoide di riferimento;
- φ^j : fase della portante in partenza dal satellite.

La differenza fra due osservazioni eseguite all’epoca t_0 del satellite “j” dai ricevitori GNSS a terra denominati “i” e “i+1” è detta “differenza prima” ed è priva del termine relativo alla fase della portante generata dal satellite:

$$\rho_i^j - \rho_{i+1}^j = \left(\lambda N_i^j + \lambda k_i^j + \frac{\varphi_i}{2\pi} \lambda \right) - \left(\lambda N_{i+1}^j + \lambda k_{i+1}^j + \frac{\varphi_{i+1}}{2\pi} \lambda \right) + \varepsilon_1 \quad (4.8)$$

Con:

- ε_1 : termine di errore

L’equazione alle “differenze seconde” delle osservazioni eseguite in un’epoca generica t da due ricevitori GNSS i ed $i+1$ rispetto a due satelliti S^j, S^{j+1} è data da:

$$\begin{aligned} \rho_i^j - \rho_i^{j+1} - \rho_{i+1}^j + \rho_{i+1}^{j+1} \\ = (N_i^j - N_i^{j+1} - N_{i+1}^j + N_{i+1}^{j+1}) \lambda + (n_i^j - n_i^{j+1} - n_{i+1}^j + n_{i+1}^{j+1}) \lambda \\ + (k_i^j - k_i^{j+1} - k_{i+1}^j + k_{i+1}^{j+1}) \lambda + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Con:

- k^j : variazione di frazione di ciclo, termine noto;
- n^j : variazione di cicli (misurata dal ricevitore) avvenuta a seguito dello spostamento dei satelliti sull’orbita fra l’istante t_0 in cui viene acceso il ricevitore e l’istante generico t ;
- ε_2 : termine d’errore che tiene conto di tutte le componenti di errore non differenziate (errori ionosferici, troposferici, di orologio, d’orbita ecc. di cui si parlerà in seguito).

L’equazione sopra esposta possiede come incognite le componenti cartesiane geocentriche $\Delta x \Delta y \Delta z$ della baseline fra i ricevitori GNSS contenute nella combinazione lineare

$(\rho_i^j - \rho_i^{j+1} - \rho_{i+1}^j + \rho_{i+1}^{j+1})$ dove $\rho_i^j = \sqrt{(x^j - x_{pi})^2 + (y^j - y_{pi})^2 + (z^j - z_{pi})^2}$ e la combinazione delle ambiguità $(N_i^j - N_i^{j+1} - N_{i+1}^j + N_{i+1}^{j+1})$.

La formula sopra riportata evidenzia la problematica della stima dell'ambiguità presente nelle misure di fase. Questa problematica si manifesta poiché il segnale della portante è costituito da un'onda elettromagnetica sinusoidale costituita da infiniti cicli di fase, identici uno all'altro e quindi indistinguibili dai ricevitori GNSS.

Per conoscere quando sia stato trasmesso il segnale è necessario conoscere il numero di cicli interi che separano il ricevitore dal satellite mentre la frazione di ciclo può essere misurata accuratamente.

Il numero iniziale di cicli interi resta quindi incognito, mentre il numero di quelli successivi all'accensione del ricevitore è misurato in modo accurato.

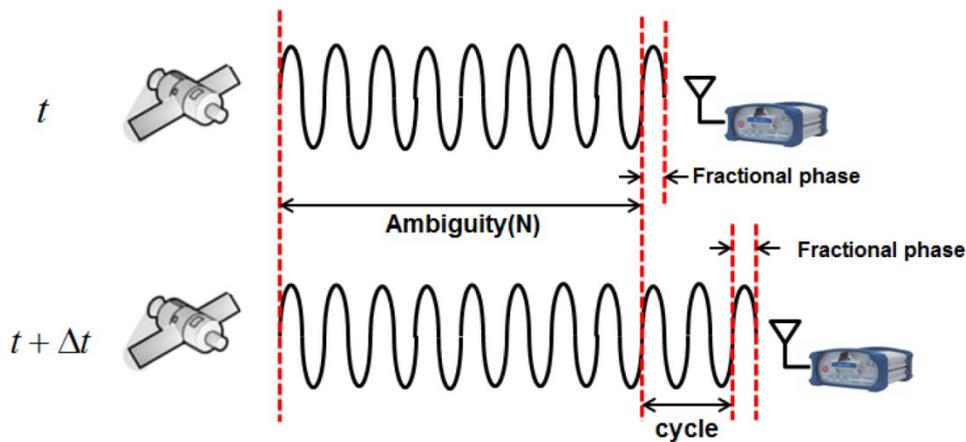


Figura 4.3 Misure di fase di segnali GNSS [115]

Effettuando per due epoche successive t e $t+1$ un'ulteriore differenziazione di due differenze seconde, si ottiene la cosiddetta differenza tripla. Ipotizzando che il contatto con i satelliti non venga perduto (cycle slip), questa differenza è priva del termine relativo alle ambiguità:

$$\begin{aligned}
 & [\rho_i^j - \rho_i^{j+1} - \rho_{i+1}^j + \rho_{i+1}^{j+1}]_{t+1} - [\rho_i^j - \rho_i^{j+1} - \rho_{i+1}^j + \rho_{i+1}^{j+1}]_t \\
 &= [(n_i^j - n_i^{j+1} - n_{i+1}^j + n_{i+1}^{j+1})\lambda + (k_i^j - k_i^{j+1} - k_{i+1}^j + k_{i+1}^{j+1})\lambda]_{t+1} \\
 &- [(n_i^j - n_i^{j+1} - n_{i+1}^j + n_{i+1}^{j+1})\lambda + (k_i^j - k_i^{j+1} - k_{i+1}^j + k_{i+1}^{j+1})\lambda]_t + \varepsilon^*
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Con tre equazioni alle differenze triple è possibile calcolare le coordinate del punto su cui si trova il ricevitore $i+1$ rispetto alle coordinate del punto su cui si trova il ricevitore GNSS i (che è statico), cioè le componenti cartesiane $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ del vettore "baseline" fra i due punti.

Questo calcolo viene utilizzato nell'elaborazione di una baseline fra due o più ricevitori. Con una serie di iterazioni ai minimi quadrati vengono inserite le coordinate approssimate nel set di equazioni alle differenze seconde per il calcolo dei valori delle ambiguità

(calcolate anch'esse con procedura ai minimi quadrati sul set di osservazioni). Questi valori delle ambiguità vengono successivamente approssimati a valori interi e quindi utilizzati per ricalcolare le componenti del vettore fra le due stazioni.

Quando non è possibile risolvere il settaggio ai valori interi delle ambiguità si ottiene una soluzione di tipo "float" e non è possibile quindi ottenere un posizionamento preciso.

Nel caso in cui il calcolo del numero intero delle ambiguità è possibile, la soluzione trovata è di tipo "fixed".

Nel caso dei rilievi di tipo cinematico (ma anche statico), gran parte dei software di post-elaborazione fanno uso di un filtro di Kalman per il calcolo delle coordinate del rover GNSS. Il filtro di Kalman genera stime di variabili incognite basate su misurazioni imprecise e incerte. Per fare ciò, il filtro di Kalman prevede lo stato futuro del sistema in base a stime passate. In questa Tesi viene omessa la trattazione dei filtri di Kalman rimandando a [116] [117] per una trattazione dettagliata.

4.1.4. Errori nelle misure GNSS

È possibile suddividere gli errori insiti nelle misure GNSS nei seguenti gruppi:

Errori legati alla strumentazione a terra

- Antenne:
 - errore legato all'instabilità del centro di fase;
 - errore legato all'eccentricità del centro di fase.

- Ricevitori:
 - errore di orologio del ricevitore;
 - errore dovuto al "rumore" del ricevitore;
 - effetto wind-up.

Errori legati ai satelliti:

- errori di orologio;
- errori di posizione dei satelliti;
- errori legati al centro di fase dell'antenna del satellite;
- errori legati alla geometria dei satelliti utilizzati per il rilievo.

Errori legati alla propagazione del segnale in atmosfera:

- errore ionosferico;
- errore troposferico.

Errori indotti dalle condizioni ambientali:

- multipaths

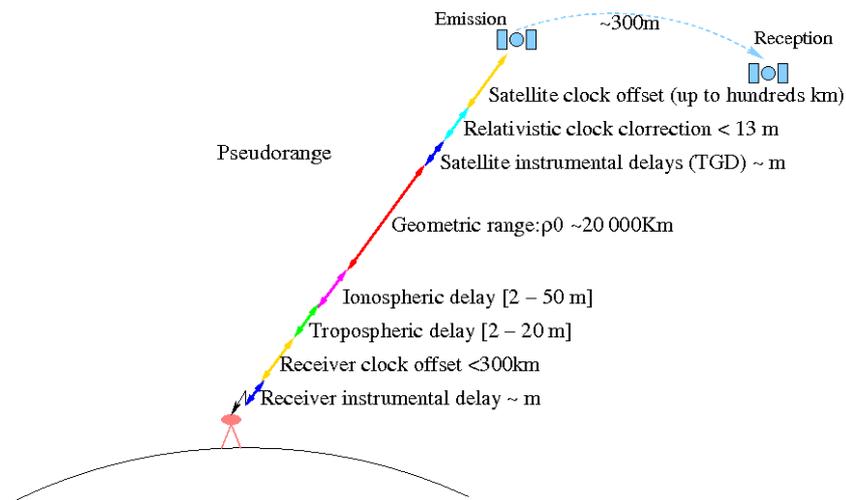


Figura 4.4 Gli errori nelle misure GNSS [118]

4.1.4.1. Errori legati alla strumentazione a terra

4.1.4.1.1. Errori legati alle antenne del ricevitore

Le antenne dei ricevitori, analogamente alle antenne dei satelliti, come si vedrà successivamente, presentano la variazione del centro di fase dell'antenna rispetto al centro geometrico dell'antenna o del punto di riferimento dell'antenna chiamato Antenna Reference Point (ARP).

In base alla frequenza ricevuta, alla geometria dei satelliti, all'intensità e alla direzione del segnale il centro di fase dell'antenna del ricevitore varia, introducendo quindi un errore di misura.

Nella Figura 4.5 sono illustrati il Phase Center Variation (PCV) e il Phase Center Offset (PCO) dell'antenna del ricevitore:

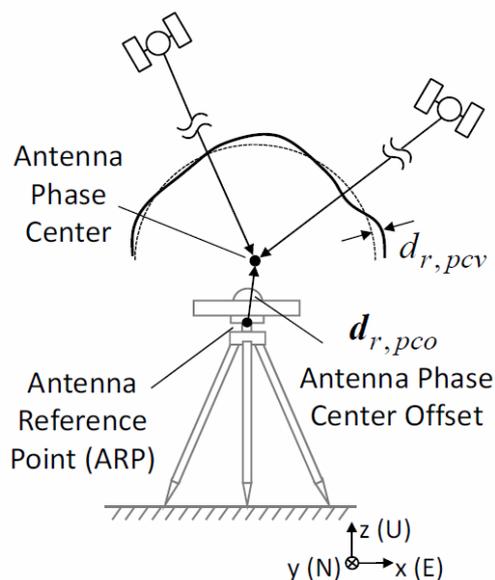


Figura 4.5 Punto di riferimento ARP, PCO e PCV dell'antenna del ricevitore [119]

Il Phase Center Variation (PCV) delle antenne dei ricevitori è definito come il ritardo di fase in eccesso dovuto all'antenna che dipende dall'elevazione e dall'azimut.

Il Phase Center Offset (PCO) è definito come la posizione relativa del centro di fase dell'antenna rispetto all'Antenna Reference Point (ARP).

I valori del PCV e del PCO sono ricavati mediante prove sperimentali per la quasi totalità delle antenne disponibili sul mercato e sono resi disponibili in diversi formati, fra cui il formato ANTEX che risulta essere quello più diffuso.

In un unico file ANTEX sono quindi presenti le correzioni per le antenne dei satelliti e i parametri correttivi per le antenne di ricevitori per ogni frequenza trasmessa dai vari GNSS, poiché il centro di fase varia a seconda della frequenza ricevuta (oltre all'intensità del segnale e alla geometria dei satelliti).

Nella Figura 4.6 è riportato uno stralcio del file ANTEX utilizzato dal software NovAtel GrafNav nell'elaborazione dei dati.

```

.....START OF ANTENNA.....
LEIAR25.R4.....LEIT.....TYPE / SERIAL NO.....
ROBOT.....Geo++ GmbH.....35.....29-JAN-17 METH / BY / # / DATE
.....5.0.....DAZI
.....0.0 90.0 5.0.....ZEN1 / ZEN2 / DZEN
.....4.....# OF FREQUENCIES
IGS14_2113.....SINEX CODE
# Number of Calibrated Antennas GPS:.....035.....COMMENT
# Number of Individual Calibrations GPS:.....089.....COMMENT
# Number of Calibrated Antennas GLO:.....035.....COMMENT
# Number of Individual Calibrations GLO:.....094.....COMMENT
# GLONASS PCV (metric).....COMMENT
# derived from Delta PCV per 25.0 MHz.....COMMENT
# for frequency channel number k=0.....COMMENT
G01.....START OF FREQUENCY
.....+0.82.....+0.67.....+159.13.....NORTH / EAST / UP
.....NOAZI.....+0.00.....+0.19.....+0.73.....+1.53.....+2.43.....+3.21.....+3.67.....+3.66.....+3.13.....+2.18.....+1.00.....-0.16.....-1.14
.....0.0.....+0.00.....+0.23.....+0.81.....+1.65.....+2.56.....+3.34.....+3.77.....+3.69.....+3.10.....+2.10.....+0.92.....-0.21.....-1.12
.....5.0.....+0.00.....+0.23.....+0.81.....+1.64.....+2.55.....+3.33.....+3.75.....+3.67.....+3.07.....+2.06.....+0.87.....-0.27.....-1.18
.....10.0.....+0.00.....+0.23.....+0.80.....+1.63.....+2.54.....+3.31.....+3.73.....+3.65.....+3.04.....+2.03.....+0.83.....-0.32.....-1.24
.....15.0.....+0.00.....+0.22.....+0.80.....+1.63.....+2.53.....+3.30.....+3.72.....+3.63.....+3.02.....+2.00.....+0.79.....-0.36.....-1.29
.....20.0.....+0.00.....+0.22.....+0.79.....+1.62.....+2.52.....+3.28.....+3.70.....+3.62.....+3.01.....+1.98.....+0.77.....-0.40.....-1.34
.....25.0.....+0.00.....+0.22.....+0.79.....+1.60.....+2.50.....+3.27.....+3.68.....+3.60.....+3.00.....+1.97.....+0.75.....-0.43.....-1.37
.....30.0.....+0.00.....+0.22.....+0.78.....+1.59.....+2.49.....+3.25.....+3.67.....+3.60.....+2.99.....+1.97.....+0.74.....-0.45.....-1.41
.....35.0.....+0.00.....+0.21.....+0.77.....+1.58.....+2.47.....+3.23.....+3.66.....+3.59.....+3.00.....+1.98.....+0.75.....-0.46.....-1.43
.....40.0.....+0.00.....+0.21.....+0.77.....+1.57.....+2.45.....+3.22.....+3.64.....+3.58.....+3.00.....+1.99.....+0.76.....-0.45.....-1.44
.....45.0.....+0.00.....+0.21.....+0.76.....+1.56.....+2.44.....+3.20.....+3.63.....+3.58.....+3.01.....+2.01.....+0.78.....-0.44.....-1.44
.....50.0.....+0.00.....+0.20.....+0.75.....+1.54.....+2.42.....+3.18.....+3.62.....+3.58.....+3.02.....+2.03.....+0.80.....-0.42.....-1.44
.....55.0.....+0.00.....+0.20.....+0.74.....+1.53.....+2.40.....+3.16.....+3.61.....+3.58.....+3.03.....+2.05.....+0.83.....-0.40.....-1.43
.....60.0.....+0.00.....+0.20.....+0.73.....+1.52.....+2.39.....+3.15.....+3.59.....+3.57.....+3.04.....+2.07.....+0.86.....-0.37.....-1.41
.....65.0.....+0.00.....+0.19.....+0.73.....+1.50.....+2.37.....+3.13.....+3.58.....+3.57.....+3.05.....+2.09.....+0.89.....-0.33.....-1.38
.....70.0.....+0.00.....+0.19.....+0.72.....+1.49.....+2.36.....+3.12.....+3.57.....+3.57.....+3.05.....+2.11.....+0.92.....-0.30.....-1.35
.....75.0.....+0.00.....+0.18.....+0.71.....+1.48.....+2.35.....+3.11.....+3.56.....+3.56.....+3.06.....+2.13.....+0.95.....-0.26.....-1.31
.....80.0.....+0.00.....+0.18.....+0.70.....+1.47.....+2.33.....+3.09.....+3.55.....+3.56.....+3.06.....+2.15.....+0.98.....-0.22.....-1.26
.....85.0.....+0.00.....+0.18.....+0.70.....+1.46.....+2.32.....+3.09.....+3.55.....+3.56.....+3.07.....+2.16.....+1.01.....-0.18.....-1.22
.....90.0.....+0.00.....+0.18.....+0.69.....+1.45.....+2.32.....+3.08.....+3.54.....+3.55.....+3.07.....+2.17.....+1.03.....-0.14.....-1.17
.....95.0.....+0.00.....+0.17.....+0.69.....+1.45.....+2.31.....+3.07.....+3.54.....+3.55.....+3.08.....+2.18.....+1.05.....-0.11.....-1.12
.....100.0.....+0.00.....+0.17.....+0.68.....+1.44.....+2.30.....+3.07.....+3.54.....+3.56.....+3.08.....+2.20.....+1.07.....-0.07.....-1.08
.....105.0.....+0.00.....+0.17.....+0.68.....+1.44.....+2.30.....+3.07.....+3.54.....+3.56.....+3.09.....+2.21.....+1.09.....-0.04.....-1.03
.....110.0.....+0.00.....+0.17.....+0.67.....+1.43.....+2.30.....+3.07.....+3.54.....+3.57.....+3.10.....+2.22.....+1.11.....-0.01.....-0.99
.....115.0.....+0.00.....+0.16.....+0.67.....+1.43.....+2.30.....+3.07.....+3.54.....+3.58.....+3.11.....+2.24.....+1.14.....+0.02.....-0.95

```

Figura 4.6 Particolare del file ANTEX utilizzato per l'elaborazione dei dati

4.1.4.1.2. Errori legati ai ricevitori

Errori di orologio

Di questi errori si parlerà nel paragrafo relativo agli errori degli orologi dei satelliti.

Errori dovuti al “rumore” del ricevitore

Questo errore riguarda sia le misure di codice che le misure di fase ed è dovuto al “rumore” del ricevitore, un errore simile a quello generato dal “rumore bianco” che può essere ridotto usando un filtro passa-basso.

L'accuratezza delle misurazioni di pseudorange è di circa l'1% della lunghezza d'onda, il che comporta un rumore con un valore massimo di 3 m per il codice civile GPS C1 (il codice C / A) e circa 30 cm per i codici P ma “lisciando” le misure di codice con le misure di fase, il rumore del codice C1 può essere ridotto a circa 50 cm.

Per le misure di fase, il rumore è di pochi millimetri (circa l'1% della lunghezza d'onda della portante) [6].

Effetto wind-up

I satelliti muovendosi lungo le loro orbite devono mantenere fissa la loro direzione verso il centro della Terra e contemporaneamente, per massimizzare l'energia solare, devono ruotare per orientare correttamente i pannelli solari. La rotazione provoca una variazione di fase che il ricevitore a terra interpreta come una variazione della distanza.

Questo fenomeno ha effetto solamente sulle misure di fase, mentre non sortisce nessun effetto sulle misure di codice poiché è dovuto alla natura elettromagnetica delle onde polarizzate circolarmente utilizzate da tutti i segnali dei diversi sistemi GNSS.

Le conseguenze di questo effetto dipendono dalla direzione e dall'orientamento relativo tra le antenne del satellite e il ricevitore.

4.1.4.2. Errori legati ai satelliti

4.1.4.2.1. *Errori di orologio nei satelliti e nei ricevitori*

Un orologio è costituito da un oscillatore avente una frequenza il più possibile costante e da un contatore che conteggia il numero di cicli.

Gli oscillatori che sono impiegati per generare i segnali GNSS e per misurare il tempo nei satelliti ma anche nei ricevitori dovrebbero quindi possedere due fondamentali requisiti:

1. La stabilità nel tempo;
2. Il sincronismo rispetto al tempo dei vari sistemi GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, ecc.).

Queste due condizioni non sono indipendenti, infatti la sincronizzazione fra più oscillatori a una certa epoca può mantenersi solo se è garantita un'adeguata stabilità, cioè se le loro frequenze rimangono sufficientemente costanti nel tempo.

L'impossibilità di realizzare una sincronizzazione perfetta, che comunque non potrebbe essere conservata dato che non esistono oscillatori a frequenza costante, ma solo oscillatori molto stabili, causa gli errori di orologio.

I difetti di sincronizzazione tra satelliti sono piuttosto contenuti essendo essi dotati di oscillatori molto stabili, mentre gli errori di sincronizzazione che si verificano tra i satelliti e un ricevitore oppure tra ricevitori diversi sono più elevati.

Gli orologi dei satelliti sono sempre controllati da terra, viene calcolato lo scarto rispetto al tempo di riferimento GNSS prescelto, quindi il valore di correzione viene trasmesso all'interno del messaggio navigazionale, in modo tale che i ricevitori degli utenti possano applicare le correzioni.

I ricevitori al contrario dei satelliti, usano un orologio al quarzo, molto più economico e molto meno preciso anche se è possibile utilizzare orologi esterni al ricevitore con performance superiori (cesio o rubidio).

Relativamente alla trattazione degli errori di orologio si evidenzia che nella soluzione alle differenze seconde gli asincronismi con e tra gli orologi dei satelliti vengono in gran parte eliminati.

4.1.4.2.2. Errore di posizione dei satelliti

All'interno del messaggio navigazionale sono trasmesse anche le informazioni sulla posizione dei satelliti, le cosiddette effemeridi espresse in forma di parametri kepleriani la cui validità è limitata nel tempo.

Queste effemeridi, vengono calcolate tramite la compensazione ai minimi quadrati dei dati relativi alla settimana precedente e utilizzando i dati relativi alle 12-24 ore precedenti, per questo motivo vengono denominate "effemeridi predette" o "broadcast".

La precisione delle effemeridi di tipo broadcast per la costellazione GPS è di circa 1 m e diminuisce a partire dall'istante del suo ultimo aggiornamento (l'intervallo temporale con cui avvengono gli aggiornamenti variano da sistema a sistema, ad es. tre ore per il sistema Galileo, due ore per il sistema GPS, trenta minuti per il sistema GLONASS).

Questi errori si propagano direttamente sulle coordinate calcolate in modalità Stand-alone, cioè ottenute utilizzando un unico ricevitore mentre si propagano sulla distanza misurata fra due punti secondo la seguente formulazione:

$$\frac{\Delta x}{l} (\mathbf{m}) \approx \frac{\Delta X}{d} (\mathbf{m}) \quad (4.11)$$

Dove:

- Δx : errore nella misura della baseline;
- l : lunghezza della baseline;
- ΔX : errore nella posizione del satellite sull'orbita;
- d : distanza fra il punto a terra e il satellite ≈ 25000 km.

Ipotizzando quindi una distanza fra la base e il punto di coordinate incognite di 20 km (pari alla lunghezza massima approssimata della baseline durante le campagne di misura) e un errore d'orbita di 2.5 m l'errore sulla lunghezza della base risulta essere di 2 mm.

In applicazioni di altissima precisione (nell'ordine di pochi millimetri) o per il calcolo della posizione mediante ulteriori tecniche come la PPP (Precise Point Positioning, la cui trattazione viene qui omessa), le effemeridi fornite dal messaggio navigazionale dei satelliti non risultano essere sufficientemente accurate.

Per questo motivo esistono delle effemeridi cosiddette "precise" calcolate in post processing da alcune istituzioni, come l'International GNSS Service (IGS), l'U.S. National Geodetic Survey (NGS), o il Center for Orbit Determination in Europe (CODE).

In base alla velocità necessaria per il loro calcolo e pubblicazione queste effemeridi sono legate a diversi livelli di precisione, solitamente si suddividono in effemeridi di tipo ultra-

rapid calcolate in post processing sono disponibili dopo circa 3 ore, mentre per quelle final bisogna attendere circa 13 giorni.

Le effemeridi finali sono fornite ad intervalli di 15 o 5 minuti in un formato denominato “.sp3”. All’interno di questo file sono contenute la posizione dei satelliti (in km) e informazioni sugli orologi (in μs).

Nell’ambito di questa Tesi, non sono mai state utilizzate le effemeridi precise per il calcolo del posizionamento del ricevitore GNSS sul veicolo in quanto si volevano testare le prestazioni raggiungibili dai diversi sistemi GNSS con le sole effemeridi di tipo broadcast. Inoltre, viste le baseline corte rispetto alla stazione master utilizzata, i risultati ottenuti impiegando effemeridi precise anziché trasmesse avrebbero presentato in ogni caso differenze millimetriche.

4.1.4.2.3. Errori legati al centro di fase dell’antenna del satellite

Il centro di fase dell’antenna del satellite non coincide con il centro di massa del satellite stesso e molto spesso neanche con il centro geometrico dell’antenna stessa.

Le effemeridi di tipo “precise” calcolate a posteriori e le relative correzioni degli orologi si riferiscono al centro di massa del satellite, per cui si introduce la grandezza Phase Center Offset (PCO), che è la distanza fra il centro di massa del satellite e il centro di fase.

Si introduce inoltre il Phase Center Variation (PCV), definito come il ritardo di fase in eccesso dovuto all’antenna, funzione dell’elevazione e dall’azimut del satellite.

Questi due valori di offset, insieme ai valori del PCO e del PCV delle antenne dei ricevitori di cui si è parlato precedentemente, sono forniti in un file in formato ANTEX (ANTenna EXchange format).

I file ANTEX sono forniti da istituzioni come l’IGS e il CODE per le varie costellazioni di satelliti, solitamente un solo file ANTEX contiene i dati inerenti ai satelliti di tutte le costellazioni GNSS (oltre ai dati inerenti alle antenne dei ricevitori).

Le effemeridi “broadcast” si riferiscono invece al centro di fase dell’antenna, quindi quando vengono utilizzate non sono necessarie correzioni.

4.1.4.2.4. Errori legati alla geometria dei satelliti

La disposizione dei satelliti nello spazio durante la sessione di misura influisce sulla sua precisione. Il termine che esprime la precisione complessiva del posizionamento è il Geometrical Dilution of Position (GDOP), ottenuto dalla traccia della matrice di varianza - covarianza delle coordinate del punto nel sistema cartesiano geocentrico Oxyz:

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2} \quad (4.12)$$

Il contributo della configurazione geometrica all'accuratezza del posizionamento tridimensionale viene espressa tramite il parametro geometrico PDOP (Positioning Dilution of Precision).

$$PDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (4.13)$$

Indicando con σ_0 la precisione delle misure, la precisione nel posizionamento tridimensionale $\sigma_{\text{posizionamento}}$ è definita da:

$$\sigma_{\text{posizionamento}} = \sigma_0 PDOP \quad (4.14)$$

A parità di altre fonti di errore, minore è il valore del PDOP associato alla configurazione satellitare presente migliore è il risultato ottenibile nel posizionamento.

Una buona configurazione satellitare è quella con un numero di satelliti sovrabbondanti (> 4) e ben distribuiti spazialmente all'interno della semisfera cui appartiene il punto di osservazione come illustrato in Figura 4.7.

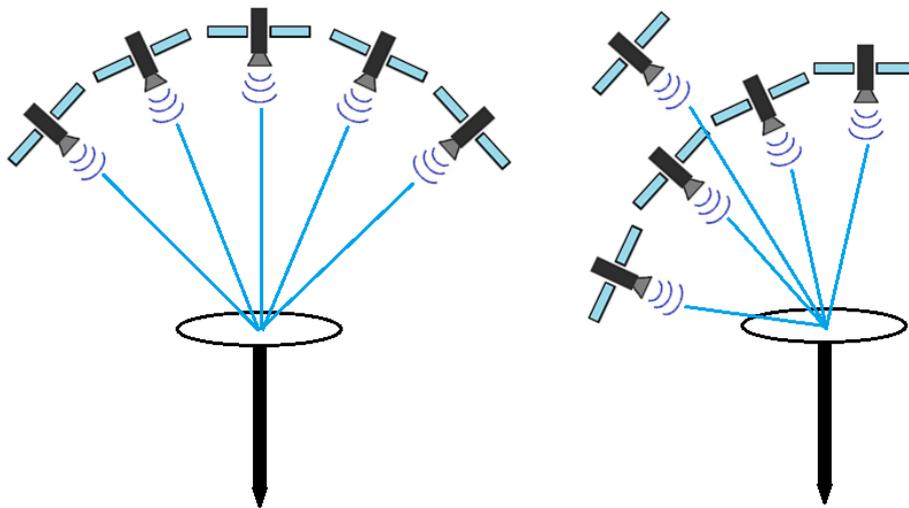


Figura 4.7 Buona geometria satellitare con basso PDOP (a sinistra) e cattiva geometria con alto PDOP (a destra)

Inoltre si possono definire:

L'Horizontal Dilution of Position (HDOP):

$$HDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (4.15)$$

Il Vertical Dilution of Position (VDOP):

$$VDOP = \sigma_z \quad (4.16)$$

Il Time Dilution of Position (TDOP):

$$TDOP = \sigma_t \quad (4.17)$$

Tutti i DOP sopra descritti basandosi su una descrizione statistica della misura degli errori (infatti richiedono solamente l'uso delle coordinate approssimate di satellite e ricevitore e della deviazione standard) sono in grado di fornire l'accuratezza della posizione attesa. In conseguenza di ciò essi possono essere calcolati in ogni istante e in ogni punto sfruttando l'almanacco trasmesso dai satelliti.

Per questo motivo esistono svariati software in grado di fornire i vari DOP che si avranno in un momento futuro in un determinato luogo. Questi software, disponibili anche gratuitamente online, sono fondamentali per la programmazione delle osservazioni, soprattutto in ambito urbano. Infatti mediante questi software è possibile tener conto della presenza di satelliti bassi sull'orizzonte che vengono eclissati più facilmente da ostacoli come edifici o un'orografia sfavorevole, ma anche della mancanza di satelliti momentaneamente non operativi.

4.1.4.3. Errori legati alla propagazione del segnale in atmosfera

A causa degli effetti di rifrazione, che oltre una certa soglia diventano effetti di riflessione, che subiscono i segnali elettromagnetici attraversando l'atmosfera, il segnale non segue il percorso geometrico più diretto verso il ricevitore ma subisce delle distorsioni.

A causa delle differenti posizioni occupate dai ricevitori a terra, nei rilievi di tipo differenziale i segnali seguono cammini diversi con condizioni atmosferiche non omogenee. Per questo motivo a seconda della posizione dei satelliti, delle condizioni atmosferiche locali e dalla lunghezza della base fra i due ricevitori, le misure differenziali sono affette da un errore residuo.

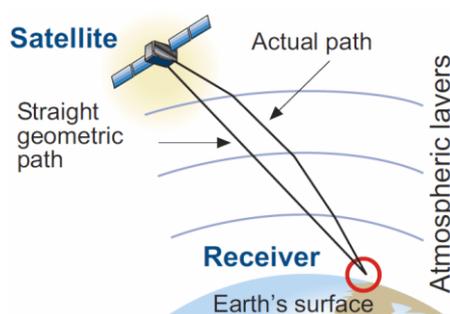


Figura 4.8 Effetti dell'atmosfera sulla propagazione dei segnali [6]

4.1.4.3.1. Errore ionosferico

La ionosfera, strato dell'atmosfera che si estende da circa 60 km a 2000 km di quota, contiene uno strato parzialmente ionizzato dovuto dall'incidenza di raggi X e dai raggi ultravioletti provenienti dalla radiazione solare.

La densità degli elettroni varia durante l'arco della giornata e va a influire sulla velocità di propagazione dei segnali GNSS.

Durante il giorno, la radiazione solare ionizza gli atomi neutri per produrre elettroni e ioni liberi mentre durante la notte gli elettroni liberi vengono ricombinati con ioni per produrre particelle neutre, il che porta a una riduzione della densità degli elettroni.

Il Total Electron Content (TEC), (il numero di elettroni liberi presenti lungo il cammino del segnale GNSS) dipende dalla posizione geografica (minore alle medie latitudini, maggiore ai poli e all'equatore), dal ciclo solare di undici anni (con picco massimo durante la massima attività solare), dal periodo dell'anno (maggiore in estate rispetto all'inverno) e dall'ora del giorno (massimo nella prima mattina e minimo a mezzanotte).

Questi fenomeni deformano il percorso del segnale GNSS cambiandone la velocità con cui attraversa la ionosfera prima di giungere al ricevitore.

Il ritardo di propagazione è inversamente proporzionale al quadrato della frequenza, per questo motivo minore è la frequenza e maggiore sarà il ritardo introdotto, quindi bande diverse avranno ritardi diversi, ad esempio la banda Galileo E5 avrà un ritardo maggiore rispetto alla banda Galileo E1.

È possibile rimuovere il ritardo tramite una combinazione lineare delle misure di fase e delle due portanti denominata "iono-free". Questa combinazione porta però alla perdita della natura intera dei parametri di ambiguità e ad avere una rumorosità piuttosto alta delle misure. Per questo motivo la soluzione Iono-free non è raccomandata per baseline corte.

Nel caso in cui si abbiano a disposizione solamente ricevitori a singola frequenza è possibile correggere gli errori ionosferici tramite modelli.

Un modello molto utilizzato è quello di Klobuchar che modella il ritardo del codice sommando una funzione cosinusoidale per le ore diurne e un valore costante per quanto riguarda le ore notturne.

Come già accennato in precedenza, nei dati navigazionali dei vari GNSS sono trasmessi i parametri per le correzioni di questo modello. Ulteriori parametri che entrano in gioco sono l'elevazione e l'azimut dei satelliti e la posizione dell'utilizzatore.

Tali dati sono disponibili anche nel formato IONEX (IONosphere model EXchange format) da fonti come l'IGS e il CODE che forniscono le caratteristiche della ionosfera su opportune griglie geografiche per l'utilizzo in post-processing.

Queste correzioni possono essere fornite anche in tempo reale dai sistemi SBAS (Satellite-Based Augmented System).

Nei rilievi effettuati è stata utilizzata la soluzione iono-free nelle campagne extraurbane, non è stata invece applicata nelle campagne urbane, per le quali la distanza master – rover era sempre inferiore a 10 km.

4.1.4.3.2. Errore troposferico

La troposfera è quella regione dell’atmosfera che si trova a diretto contatto con la superficie terrestre, avente uno spessore variabile a seconda della latitudine (ai poli è spesso solamente 8 km mentre all’equatore raggiunge i 16-20 km).

L’onda elettromagnetica all’interno di questa zona evidenzia un decremento della sua velocità, il segnale presenta inoltre una curvatura lungo il suo percorso.

La distanza satellite - antenna calcolata dai ricevitori a terra risulta superiore alla distanza reale poiché la troposfera è elettricamente neutra e quindi non dispersiva fino a frequenze di 15 GHz il che implica l’introduzione di un ritardo uguale sia per le misure di codice che per le misure di fase.

Siccome l’errore troposferico è indipendente dalla frequenza e legato alle condizioni di temperatura, pressione e umidità della porzione di troposfera attraversata dal segnale, non è eliminabile utilizzando due diverse portanti.

L’errore è minimo quando i satelliti si trovano allo zenith ed aumenta quando i satelliti si trovano vicini all’orizzonte, varia inoltre significativamente con la quota.

L’errore troposferico può essere suddiviso in una componente secca (dry) che rappresenta il 90% del ritardo troposferico e può essere predetta con un alto grado di precisione ed una componente umida (wet) non facilmente prevedibile che dipende dal vapore acqueo presente.

Un modello di rifrattività che viene usualmente preso in considerazione è quello di Saastamoinen di cui vengono riportate le formulazioni:

$$p = 1013.25 \times (1 - 2.2557 \times 10^{-5} h)^{5.2568} \quad (4.18)$$

$$T = 15.0 - 6.5 \times 10^{-3} h + 273.15 \quad (4.19)$$

$$e = 6.108 \times \exp\left\{\frac{17.15T-4684.0}{T-38.45}\right\} \times \frac{h_{rel}}{100} \quad (4.20)$$

Dove:

- p : è la pressione totale (hPa);
- T : è la temperatura assoluta dell’aria (K);
- h : è l’altezza sul livello medio del mare;
- e : è la pressione parziale del vapore acqueo (hPa);
- h_{rel} : è l’umidità relativa.

Con p , T ed e derivati dal modello standard dell'atmosfera, il ritardo troposferico T_r^s è espresso dal modello di Saastamoinen come:

$$T_r^s = \frac{0.002277}{\cos z} \left\{ p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2 z \right\} \quad (4.21)$$

Con:

- z : angolo zenitale definito come $z = \frac{\pi}{2} - el_r^s$;
- el_r^s : elevazione del satellite rispetto al ricevitore.

4.1.4.4. Errori indotti dalle condizioni ambientali

4.1.4.4.1. Errori da multipaths

Quando il segnale diretto proveniente dal satellite viene riflesso da una o più superfici a terra si hanno gli errori da multipaths, come illustrato in Figura 4.9.

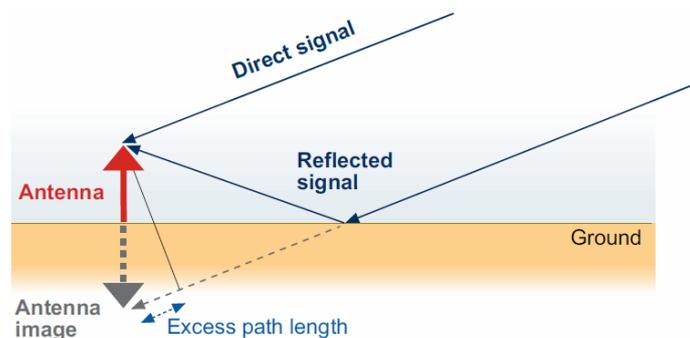


Figura 4.9 Percorso del segnale diretto e quello riflesso da superfici [6]

La causa principale di questo fenomeno è la presenza di strutture riflettenti come edifici ma anche di alberature nei pressi dell'antenna, e assume proporzioni importanti soprattutto quando i satelliti sono bassi sull'orizzonte.

Le misure di codice risultano più sensibili agli effetti da multipath rispetto a quelle di fase, l'errore provocato inoltre varia a seconda delle frequenze GNSS utilizzate.

Il segnale una volta riflesso può andare a sovrapporsi alla sua versione non riflessa, distorcendosi o annullandosi nel caso di una riflessione in controfase.

Teoricamente, l'errore dovuto ai multipaths per le misure di codice, può raggiungere 1.5 volte la lunghezza d'onda, quindi ad esempio per il segnale GPS C1 può raggiungere i 450 m teorici, ma questo valore è difficilmente raggiungibile sperimentalmente e si attesta generalmente attorno ai 2-3 m [6, 6] ma può raggiungere valori più elevati in presenza di particolari superfici riflettenti (acqua, ghiaccio).

Per le misure di fase il valore massimo teorico dell'errore è di un quarto della lunghezza d'onda cioè (circa 5 cm per i segnali GPS L1 ed L2 e per Galileo E1 ed E5), anche se sperimentalmente non supera il centimetro.

Sebbene sia possibile individuarne gli effetti, non esiste un modello di previsione dei multipaths poiché dipendono dalla geometria che si instaura fra i segnali trasmessi dai satelliti, l'antenna del ricevitore e le superfici riflettenti.

Ricorrendo ad alcuni accorgimenti, come utilizzare particolari tipi di antenna noti come "choke ring", antenne munite di diversi anelli metallici concentrici che attutiscono i segnali riflessi è possibile limitare gli effetti dei multipaths. Questo genere d'antenna, dati i maggiori ingombri viene utilizzata soprattutto per le antenne delle basi permanenti.

L'antenna del ricevitore GNSS montata sul veicolo MMS con il quale sono state svolte le campagne di misura era di tipo tradizionale e non choke ring. Tuttavia il fenomeno dei multipaths era particolarmente evidente in ambito urbano, come si vedrà in seguito.

4.1.5. Effetti legati alla deformazione della crosta terrestre

Questi effetti risultano essere trascurabili nel caso di rilievi di tipo cinematico, sono importanti soprattutto nel caso di stazioni di riferimento fisse. Le coordinate di queste stazioni sono affette da moti di maree terrestri di cui bisogna tenere conto quando è richiesta una grande precisione. I moti legati alle maree terrestri, se non considerati, portano a far "oscillare" le coordinate della stazione oggetto di studio attorno ad un valore medio.

Esistono tre diversi tipi di maree:

- Maree oceaniche (Δr_{ocn}): sono provocate dalla risposta elastica della crosta terrestre ai moti di marea, hanno un effetto molto piccolo ed è trascurabile nei rilievi statici di precisione con osservazioni sulle 24 ore;
- Maree polari (Δr_{pol}): è un fenomeno che deve essere tenuto in considerazione se le misurazioni riguardano periodi maggiori di due mesi. È causato dallo spostamento dell'asse di rotazione terrestre, rispetto ad un punto di coordinate fisse, in un quadrato di circa 20 metri di lato. Questo fenomeno comporta una risposta elastica variabile nella crosta terrestre e provoca uno spostamento planimetrico di circa 0.7 cm ed altimetrico di 2.5 cm;
- Maree terrestri o solide (Δr_{sol}): provocano uno spostamento planimetrico e altimetrico dovuto al movimento della crosta terrestre causato dalle forze gravitazionali dei corpi astronomici come la Luna e il Sole.

La posizione r_M di un punto sarà quindi data da:

$$r_M = r_{M0} + \Delta r_{ocn} + \Delta r_{pol} + \Delta r_{sol} \quad (4.22)$$

Con:

r_{M0} : posizione iniziale del punto.

4.2. Campagne di misura

Come già detto, lo scopo dell'attività di ricerca è stato quello di testare le prestazioni del sistema satellitare Galileo nelle applicazioni alla navigazione terrestre, rispetto ai sistemi GNSS GPS e GLONASS.

In questa parte sperimentale della Tesi, sono state riportate una parte delle analisi svolte nell'ambito del **Progetto europeo GRC-MS (Galileo Reference Center – Member States)** finanziato da **EUSPA (EU Agency for the Space Programme) - WP 5.3 Land urban and extra-urban data measurement campaigns**. Per verificare le prestazioni del sistema satellitare Galileo, sono state pianificate molteplici campagne di misura con cadenza trimestrale [110], come illustrato nella Tabella 4.1.

Mese \ Anno	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
2019												
2020												
2021												
2022												

Tabella 4.1 Mensilità ed anno in cui si sono svolte le campagne di misura

A causa dell'emergenza Covid-19, non è stato possibile pianificare le campagne di misura a cadenza regolare, quindi alcune campagne sono state posticipate (ad es. la campagna di Marzo 2020 o la campagna di marzo 2021, posticipata a maggio) mentre per l'anno 2022 erano previste solamente due campagne di misura.

Per ogni campagna di misura sono stati svolti rilievi in due ambiti:

- ambito urbano
- ambito extraurbano

La scelta delle traiettorie seguite nelle diverse campagne di misura è stata dettata da motivazioni legate alle condizioni operative di traffico e viabilità e a necessità tecniche correlate all'autonomia della strumentazione utilizzata.

Questo ha portato ad ottenere traiettorie parzialmente coincidenti fra le diverse campagne di misura. Si rimarca che in ogni caso le condizioni in cui sono state svolte le diverse campagne risultano variabili, a causa di diversi fattori che influiscono sulle misure (la differente disposizione dei satelliti che influisce sulla ricezione del segnale da parte del ricevitore GNSS, il numero e la durata delle soste statiche causate dal traffico, etc).

Nei paragrafi seguenti verrà esposta la procedura e i risultati ottenuti da una campagna di misura tipo, in particolare si illustrerà la metodologia e i risultati ottenuti nella campagna di marzo 2022.

4.2.1. Pianificazione del rilievo

Prima di ogni rilievo si è effettuato il relativo planning utilizzando dapprima il software Trimble® GNSS Planning Online e successivamente il tool Septentrio® RxPlanner.

Tramite questo software è stato possibile identificare le finestre temporali in cui erano visibili un numero sufficiente di satelliti con un PDOP idoneo ai rilievi come si può vedere in Figura 4.10.

Ciò era particolarmente importante per i rilievi che si svolgevano in ambito urbano, a causa della presenza di numerosi ostacoli (particolarmente edifici) che mascherano la ricezione dei segnali dei satelliti con bassi valori di elevazione.

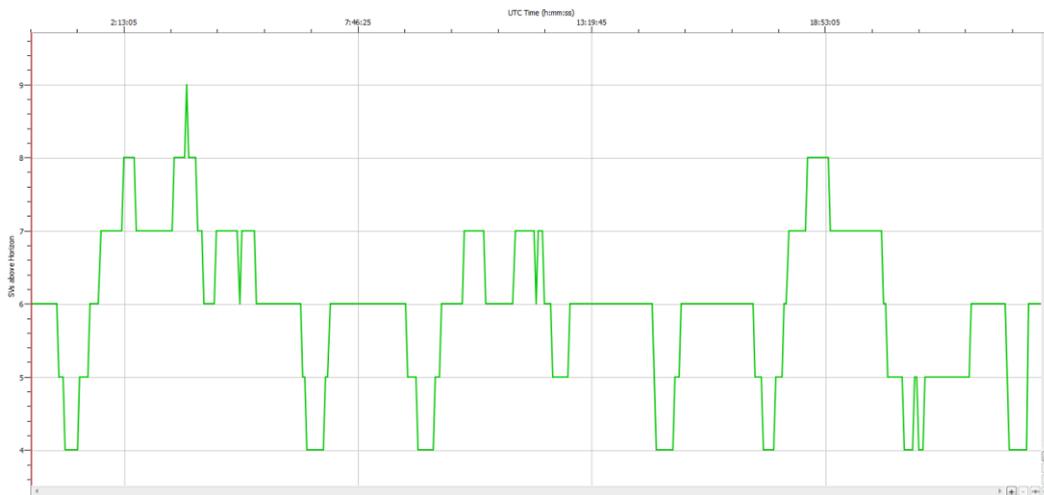


Figura 4.10 Numero di satelliti Galileo visibili durante la giornata scelta per i rilievi (cut-off 15°)

Sempre con il tool Septentrio® RxPlanner è possibile ottenere il grafico relativo all'elevazione dei satelliti (Figura 4.11), lo skyplot (Figura 4.12) e i diversi DOP (Figura 4.13):

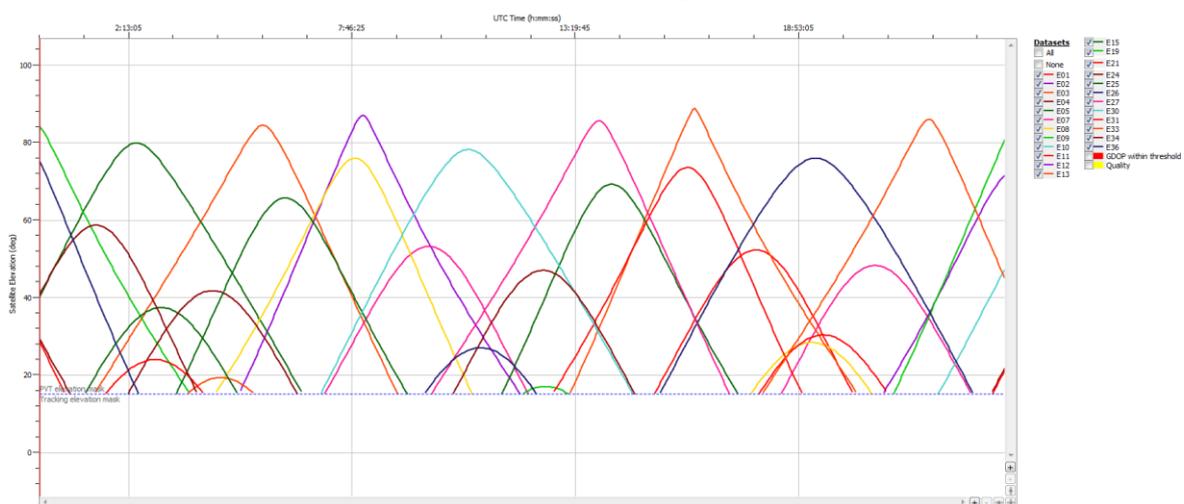


Figura 4.11 Elevazione dei satelliti Galileo durante la giornata scelta per i rilievi (cut-off 15°)



Figura 4.14 Rilievo urbano



Figura 4.15 Rilievo extraurbano

4.2.2.1. Strumentazione utilizzata

4.2.2.1.1. Il sistema MMS

La campagna è stata effettuata utilizzando il veicolo MMS (Mobile Mapping System) del GeoSNaV Lab – Università di Trieste.

Per il posizionamento assoluto, il veicolo è dotato di un sistema Position and Orientation System/Land Vehicle (POS/LV) di Applanix Corporation, un sistema completamente integrato di posizionamento e orientamento, munito di un sistema di posizionamento GPS integrato con tecnologia inerziale in modo tale da generare soluzioni di posizionamento stabili, affidabili e ripetibili per applicazioni su veicoli terrestri (Figura 3.15) [109] [120]. Questa tipologia di sistema integrato GPS/INS (Global Positioning System/Inertial System) è in grado di fornire, istante per istante, la posizione e l'assetto del veicolo.

Il sistema Applanix oltre ai due ricevitori GPS geodetici e al sistema inerziale, utilizza un odometro montato sulla ruota posteriore sinistra del veicolo, per misurare la distanza percorsa e segnalare al sistema quando il veicolo è fermo.

La piattaforma inerziale va a integrare il sistema GPS in caso di assenza di segnale satellitare dovuto ad ostacoli come ponti, alberi, edifici, in modo tale da dare precisioni di posizionamento paragonabili a quelle ottenibili attraverso tecniche differenziali. Un filtro di Kalman, esegue l'integrazione dei dati di ogni sensore consentendo di ottenere la soluzione migliore in qualsiasi momento. I dati GNSS vengono acquisiti ad una frequenza di 1 Hz, mentre l'odometro e il sistema inerziale inviano dati alla CPU del sistema con una frequenza di 200 Hz.

L'Applanix PCS (POS Computer System) è l'elemento centrale del sistema: acquisisce ed elabora i dati provenienti dai diversi sensori e memorizza i parametri di posizionamento e assetto del veicolo, per la successiva post-elaborazione. Il sistema inerziale integrato è un giroscopio Litton LN-200 con tre accelerometri e tre giroscopi laser a fibra ottica. L'odometro Distance Measuring Indicator (DMI) è montato sulla ruota posteriore sinistra del veicolo e contiene un sensore ottico che genera 1024 impulsi per giro; la sua funzione è quella di stimare la distanza di corsa e soprattutto, di determinare quando il veicolo non è in movimento (Zero velocity Update - ZUPD). Due ricevitori GPS geodetici inviano i dati al PCS per la determinazione del posizionamento e della direzione, quest'ultimo utilizza il modulo software GAMS (GPS Azimuth Measurement Subsystem).



Figura 4.16 Il veicolo MMS (a sinistra) e la strumentazione Applanix (a destra)

Un ricevitore GNSS multi-costellazione Septentrio AsteRx-U (Figura 4.17) è stato installato all'interno del veicolo, mentre l'antenna GNSS (una Septentrio PolaNt-x MF), collegata via cavo al ricevitore AsteRx-U, è stata fissata saldamente su una barra metallica sulla parte superiore del veicolo, tra le due antenne GPS del sistema Applanix POS/LV.



Figura 4.17 Ricevitore Septentrio AsteRx-U e la sua antenna PolaNt-x MF

Tutte le coordinate ottenute con il sistema Applanix POS/LV sono riferite all'Antenna Reference Point (ARP) dell'antenna Septentrio PolaNt-x MF. In questo modo è possibile confrontare direttamente, epoca per epoca, le posizioni calcolate utilizzando i diversi GNSS e le loro combinazioni utilizzando i dati del ricevitore Septentrio AsteRx-U con la traiettoria di riferimento ottenuta con il sistema Applanix POS/LV.

La posizione dell'antenna del ricevitore Septentrio è stata calcolata nel sistema di riferimento del veicolo (coincidente con il sistema di riferimento IMU), come tutti i componenti POS/LV, utilizzando una total station come verrà descritto in seguito. In questo modo è stato possibile ottenere i "bracci di leva" del sistema Applanix e le relative coordinate con un'accuratezza centimetrica.

Oltre agli strumenti descritti, in questa campagna di misura è stato installato sul tetto del veicolo MMS anche uno smartphone (Xiaomi Mi 8). Lo smartphone è stato posizionato sul tetto del veicolo tra le due antenne GNSS del sistema POS/LV all'interno di una scatola in materiale plastico per non attenuare i segnali GNSS. In questo caso tutti i dati di posizionamento sono stati riferiti al centro geometrico dello smartphone, non essendo

noto il suo Antenna Reference Point. Inoltre per confrontare direttamente, epoca per epoca, le posizioni calcolate utilizzando i dati dello smartphone è stata ricalcolata la traiettoria di riferimento MMS riferendola al suddetto centro geometrico dello smartphone.

Determinazione dei bracci di leva del veicolo MMS

Per ottenere i suddetti bracci di leva, è stato effettuato un rilievo topografico mediante strumentazione total station, misurando le posizioni di tutte le antenne e dello smartphone e di alcuni supporti per future test da eseguire con il sistema MMS.

Il rilievo è stato effettuato con un Leica TS02 munito di distanziometro laser, all'interno dell'edificio C8 dell'Università degli Studi di Trieste, dove è stato possibile approssimare il pavimento al piano orizzontale. Tutti i punti sono stati collimati da una singola stazione, in modo tale da introdurre il minor numero di errori strumentali e accidentali.



Figura 4.18 Posizionamento della Total Station per il rilievo dei bracci di leva

Si riportano in Tabella 4.2, Tabella 4.3 e Tabella 4.4 i dati tecnici dello strumento.

Precisione angolare	Deviazione standard Hz, V, ISO 17123-3	Risoluzione di visualizzazione			
		["]	[°]	[mgon]	[mil]
7	2	1	0.0001	0.1	0.01

Tabella 4.2 Dati tecnici relativi alle misure angolari della Total Station Leica TS02

Riflettore	Portata A	Portata B	Portata C
	[m]	[m]	[m]
Prisma standard (GPR1)	1800	3000	3500
3 prismi (GPR1)	2300	4500	5400
Prisma 360° (GPZ4, GPZ122)	800	1500	2000
Target adesivo riflettente 60 mm x 60 mm	150	250	250
Mini prisma (GMP101)	800	1200	2000
Mini prisma 360°, (GRZ101)	450	800	1000

Distanza di misura minima 1.5 m

Condizioni atmosferiche

Portata A: Densa foschia, visibilità 5 km o intensa luce solare, grande riverbero
 Portata B: Leggera foschia, visibilità di circa 20 km o moderata luce solare, lieve riverbero
 Portata C: Coperto, assenza di foschia, visibilità di circa 40 km, assenza di riverbero

Tabella 4.3 Dati tecnici relativi alla portata strumentale con diverse tipologie di riflettore della Total Station Leica TS02

Power Pinpoint R400 (senza riflettore)			
Kodak Gray Card	Portata D	Portata E	Portata F
	[m]	[m]	[m]
Lato bianco, riflettente al 90%	200	300	>400
Lato grigio, riflettente al 18%	100	150	>200

Campo di misura: Da 1.5 m a 1200 m

Campo di misura, Flexpoint: da 1.5 a 30 m

Visualizzazione senza ambiguità: Fino a 1200 m

Condizioni atmosferiche

Portata D: Oggetto in forte luce solare, grande riverbero
 Portata E: Oggetto in ombra o cielo coperto
 Portata F: Giorno, notte e crepuscolo

Tabella 4.4 Dati tecnici relativi alla portata strumentale senza riflettori della Total Station Leica TS02

Per facilitare la mira ed impedire lo slittamento del raggio di misura radente sulla superficie della scatola contenente l'IMU, sono stati utilizzati dei target.

Per quanto riguarda l'IMU, sono stati collimati sia il centro di riferimento che le punte delle frecce indicanti l'asse x e l'asse y dello strumento, per verificare il loro allineamento con gli assi del veicolo.

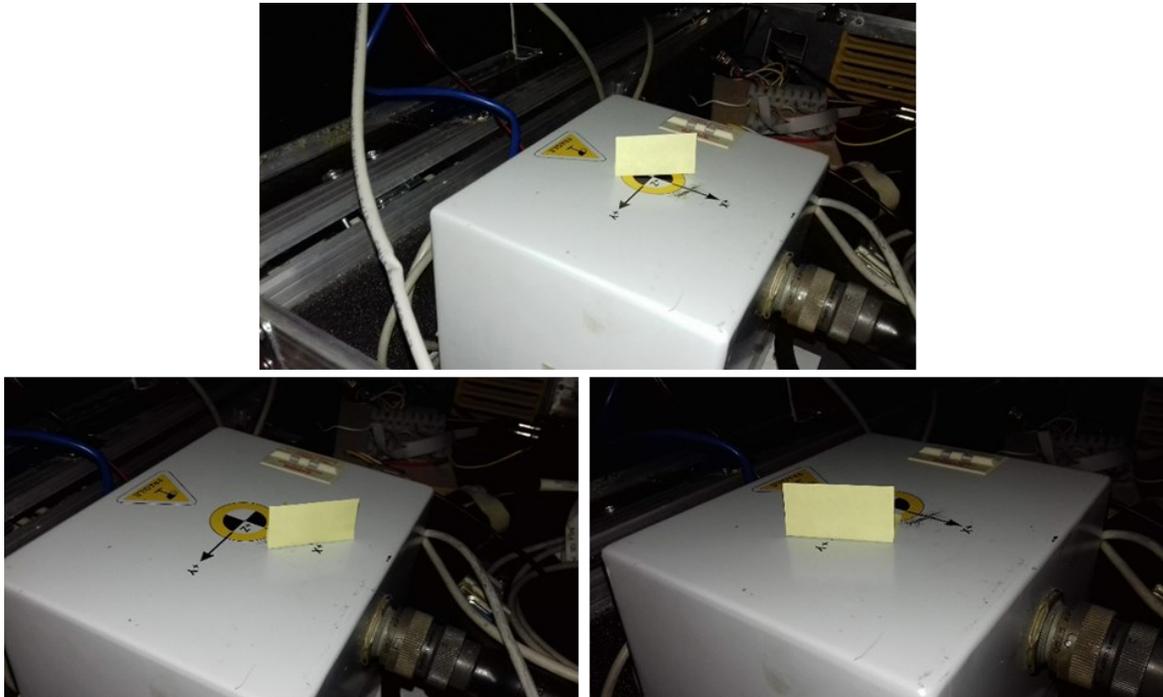


Figura 4.19 Posizionamento dei target sulla superficie dell'involucro dell'IMU

Per determinare la posizione dei centri di fase delle antenne è stata effettuata una doppia misurazione: sia collimando la base della vite di fissaggio, sia collimando un prisma fissato sulla vite stessa, aggiungendo le rispettive costanti e altezze strumentali e correggendo successivamente i risultati.

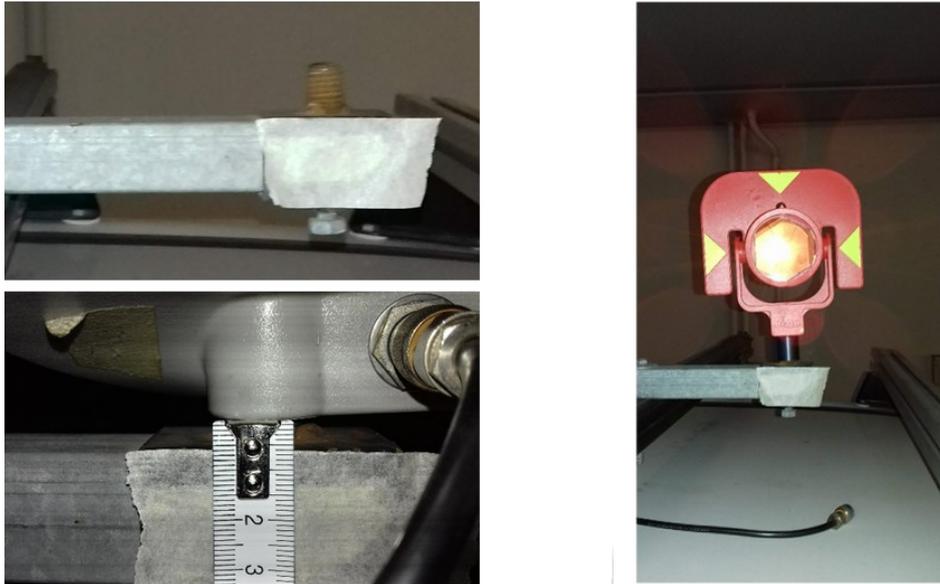


Figura 4.20 Posizionamento del prisma e misure delle altezze strumentali rispetto l'ARP delle antenne

Per determinare la direzione dell'asse di marcia del veicolo, sono stati dapprima individuati sul piano orizzontale, e collimati, i centri delle impronte degli pneumatici posteriori e successivamente individuato il loro asse di simmetria.

In un primo momento tutte le posizioni sono state determinate rispetto al sistema di riferimento della Total Station; successivamente è stata effettuata una rototraslazione in modo da riferire tutte le misure al sistema di riferimento dell'IMU, come disegnato sulla scatola contenente l'IMU stesso, con asse Z verso il basso a completare la terna destrorsa. In Tabella 4.5 si riportano le coordinate determinate nel sistema di riferimento dell'IMU, come sopra descritto.

Punto	X (m)	Y (m)	Z (m)
IMU	0.000	0.000	0.000
Asse X IMU	0.035	0.001	0.001
Asse Y IMU	0.000	0.036	0.000
Antenna Posteriore C.F.	-0.785	-0.100	-1.241
Antenna Septentrio ARP	0.020	-0.106	-1.244
Smartphone Xiaomi mi8	0.633	-0.112	-1.244
Antenna Anteriore C.F.	1.160	-0.117	-1.227
Impr. Ruota Post SX laser DMI	-0.430	-0.887	0.795

Tabella 4.5 Coordinate delle antenne dei dispositivi utilizzati nel sistema di riferimento dell'IMU del sistema Applanix,

Dalle misure effettuate è risultato un angolo pari a 1.688 deg tra la proiezione dell'asse X dell'IMU e l'asse di marcia del veicolo e analogamente tra la proiezione dell'asse Y dell'IMU e l'asse delle ruote, mentre l'asse Z può essere con buona approssimazione considerato coincidente con la verticale.

Le coordinate nel sistema di riferimento del veicolo dei componenti MMS, dell'antenna Septentrio e dello smartphone sono riportate anche nella Figura 4.21.

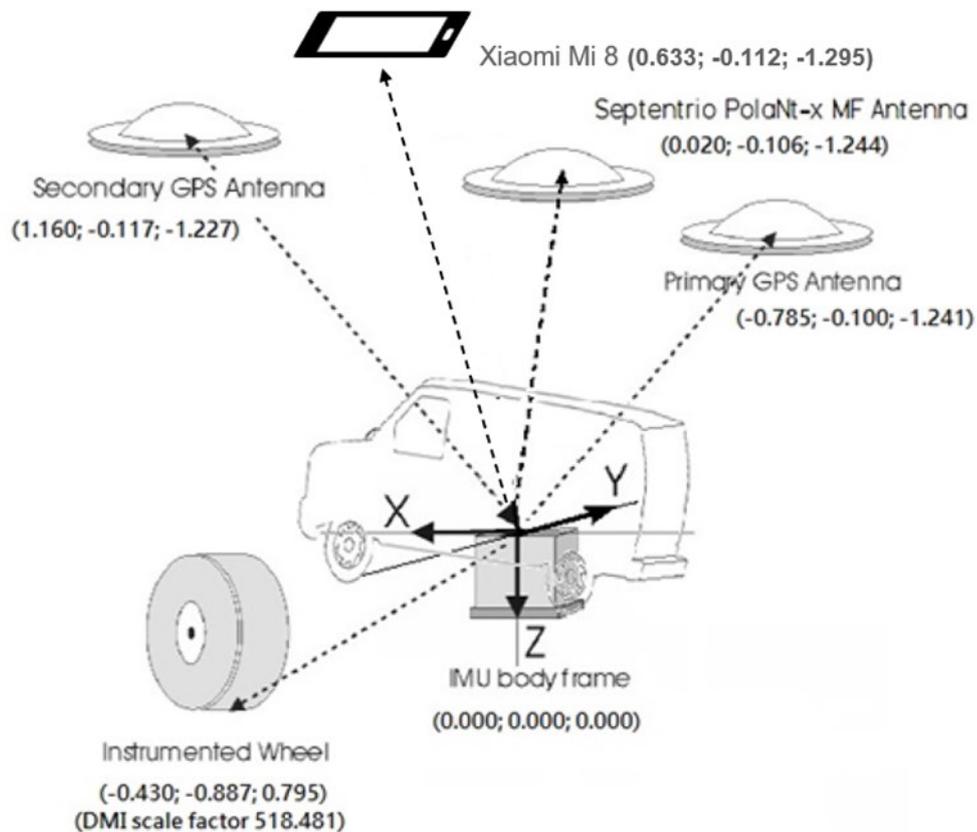


Figura 4.21 Coordinate relative dei componenti MMS e dell'antenna Septentrio

4.2.2.1.2. La traiettoria di riferimento MMS

La traiettoria tridimensionale ottenuta dal sistema MMS tramite post - elaborazione è stata utilizzata come riferimento per i confronti.

Il sistema POS/LV è in grado di fornire come output più di cinquanta campi dati fra cui: i parametri di posizionamento (latitudine, longitudine e altezza ellissoidica), l'assetto del veicolo (angoli di rollio, beccheggio e imbardata), la velocità rispetto agli assi Nord, Est e Z, accelerazioni, velocità angolari, scarti quadratici medi.

Il sistema POS/LV è costruito per integrare i dati acquisiti dai diversi sensori, monitorandone lo stato di salute, isolando i sensori che mostrano prestazioni degradate, e riconfigurando, pesando opportunamente i dati in modo da dare, in ogni caso, i migliori valori di posizionamento e assetto. Gli errori dei sensori vengono stimati su base continua utilizzando un filtro di Kalman.

La traiettoria di riferimento è stata calcolata post-elaborando i dati GPS/INS integrati rilevati dall'MMS. A tal fine, è stata utilizzata la Position and Orientation System Post-Processing Package (POSPac™) Mobile Mapping Suite (MMS™).

Il sistema POSPac™ MMS con tecnologia IN-Fusion™ consente più modalità di elaborazione per gestire diverse combinazioni di dati GNSS di riferimento e rover. La tecnologia IN-Fusion utilizza un filtro centralizzato per combinare i dati dell'IMU con le misure di fase e di pseudo-range registrate dal ricevitore GPS. Di conseguenza, la tecnologia Applanix IN-Fusion ha un accesso continuo a tutta la costellazione GPS, ed è in grado di registrare dati anche nel caso in cui il ricevitore GPS riceva meno di quattro satelliti.

Sulla base delle suddette caratteristiche MMS, è stata assicurata una soluzione cinematica in post-processing più accurata rispetto a quanto ottenibile con il solo ausilio di un ricevitore GNSS, tale da giustificare l'utilizzo come riferimento.

La stazione permanente "TRSE" appartenente alla rete GNSS "Antonio Marussi", gestita dalla Regione Friuli Venezia Giulia è stata utilizzata come stazione principale per tutti i rilievi (si veda la monografia in Figura 4.22).

La distanza dal punto di partenza della campagna di misura dalla stazione permanente "TRSE" era di circa 3.44 km mentre il punto più lontano raggiunto si trovava ad una distanza di 16.011 km, per questo motivo non è stato necessario utilizzare una soluzione di rete.

Per ottenere la traiettoria di riferimento i dati MMS sono stati elaborati utilizzando la modalità "IN-Fusion Single Base Station Processing".

L'accuratezza della posizione per le traiettorie di riferimento MMS del percorso urbano ed extraurbano è riportata nelle figure 3.19 e 3.20.

Come si può vedere dai grafici, per il percorso urbano è possibile individuare brevi tratti statici dovuti principalmente alle fermate ai semafori, caratterizzati da bassi RMS.

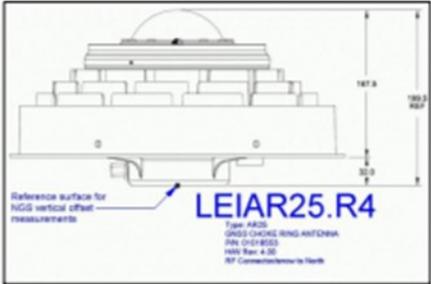
 REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA Presidenza della regione direzione generale Area Programmazione, controllo, sistemi informativi e sicurezza		Rete GNSS FVG "A.Marussi" Stazione permanente di Trieste			
Four char ID: TRSE Nome del Sito: TRIESTE					
Comune: Trieste Provincia: Trieste (TS) Indirizzo: Sede Regionale via Cesare Cantù 10 - 34134 Trieste					
Riferimento CTRN: 110103					
Ricevitore: Leica GR25					
Antenna: Leica AR25 con Dome Sferico (LEIAR25.R4) ARP: MARKER ARP Up Ecc.: 0.0083 m ARP North Ecc.: 0.0000 m ARP East Ecc.: 0.0000 m					
Data installazione: 24-11-2016					
ETRS89 (ETRF89) φ : 45°39'36.9105" λ : 13°47'09.9294"	UTM-ETRS89 (ETRF89) Nord: 5057016.940 Est: 405430.776 Fuso: 33	La conversione delle coordinate tra i Sistemi Geodetici di Riferimento è stata effettuata tramite il software Verto3k e i grigliati GK2			
ETRS89-RDN (ETRF2000) φ : 45°39'36.9116" λ : 13°47'09.9297"	UTM-ETRS89 (ETRF2000) Nord: 5057016.975 Est: 405430.782 Fuso: 33				
Roma 40 φ : 45°39'34.5767" λ : 1°20'02.0594"	GAUSS-BOAGA Nord: 5057039.874 Est: 2425436.747 Fuso: EST				
Quota ellissoidica: 156.3031 Quota ortometrica: 111.371					
RIFERIMENTI: Nome: Sistemi informativi ed e-government Indirizzo: Trieste, Piazza dell'Unità d'Italia, 1 E-mail: lorenzo.tommasoni@regione.fvg.it				Tel.: +39 040 377 3734 Fax: +39 040 377 4348 www: www.regione.fvg.it	
					

Figura 4.22 Monografia della Stazione di riferimento permanente di Trieste "TRSE" appartenente alla rete GNSS "Antonio Marussi"

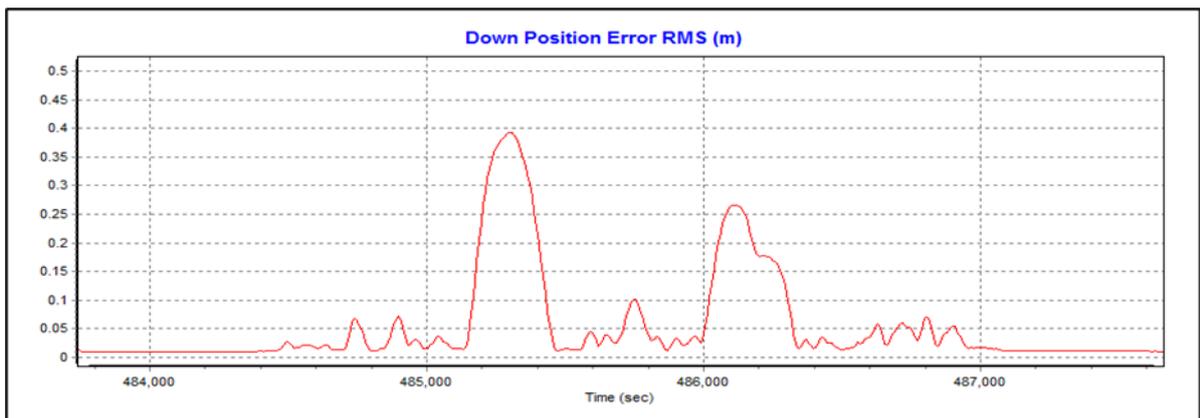
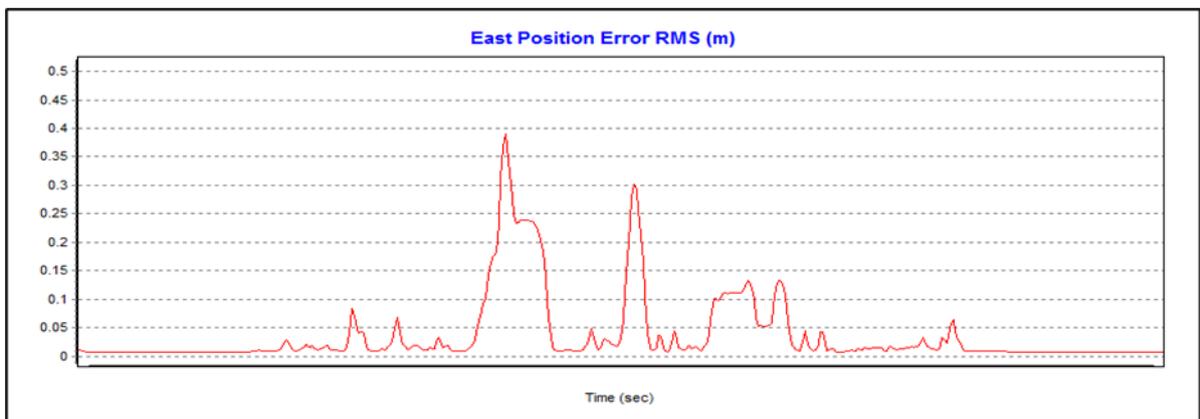
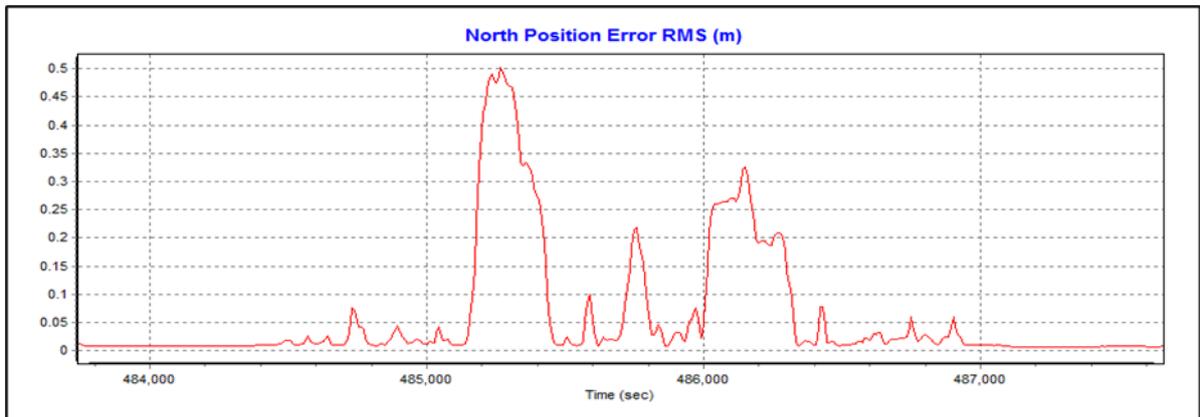


Figura 4.23 Precisione di posizionamento della traiettoria di riferimento MMS (Mobile Mapping System) in ambito urbano

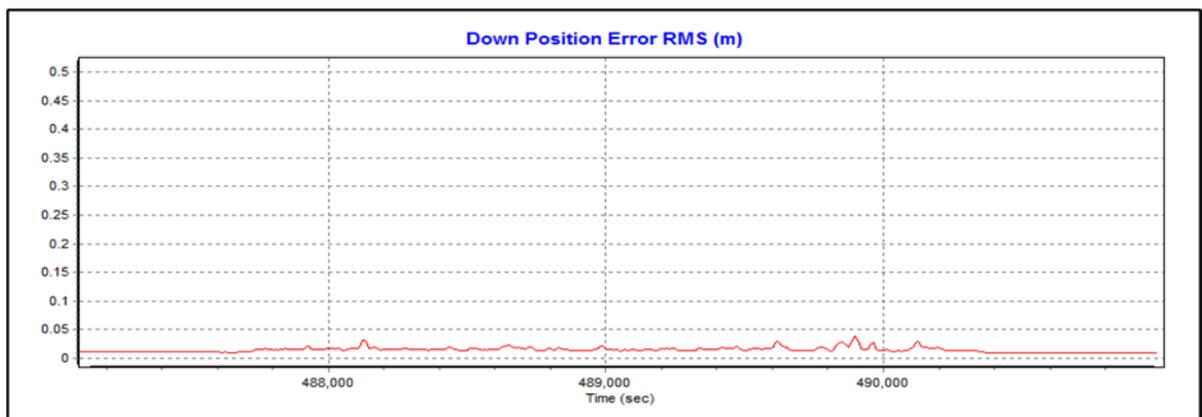
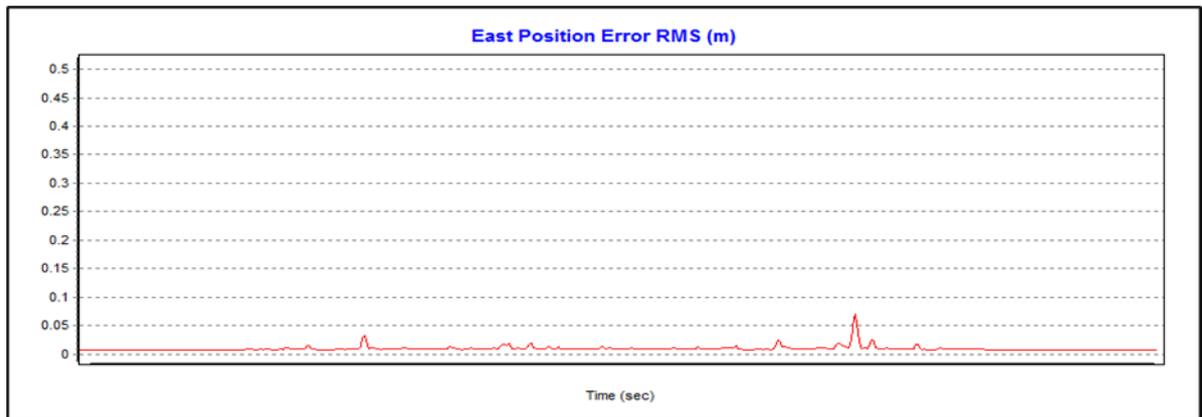
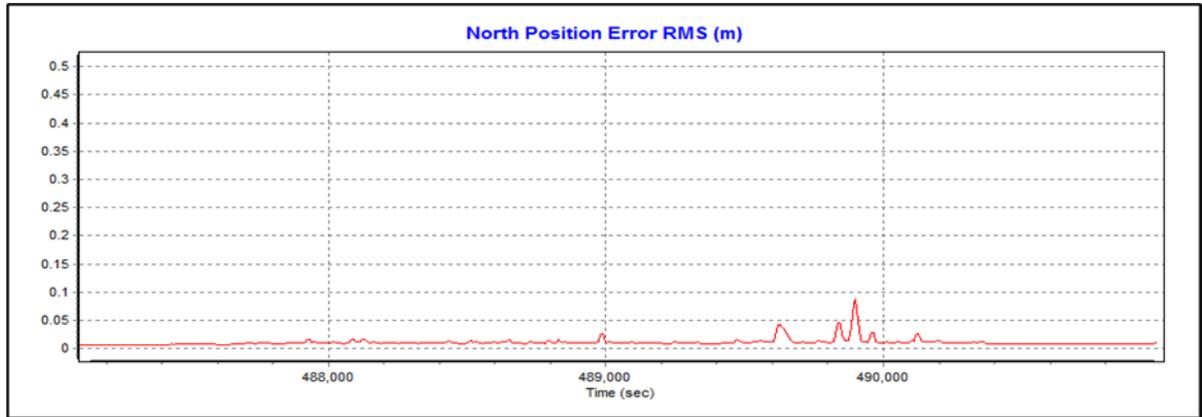


Figura 4.24 Precisione di posizionamento della traiettoria di riferimento MMS (Mobile Mapping System) in ambito extraurbano

4.2.2.2. Dati raccolti

La piattaforma MMS (Mobile Mapping System) ha acquisito i dati INS (INertial System) ad una frequenza di 200 Hz.

Il ricevitore GNSS Septentrio AsteRx ha acquisito i dati ad una frequenza di 1 Hz.

Sono stati acquisiti i seguenti dati GNSS:

- GPS L1, L2, L5;
- Galileo E1, E5a, E5b, AltBoc, E6;
- GLONASS G1, G2, G3;
- BeiDou B1, B2, B3;
- IRNSS;
- SBAS.

Lo smartphone Xiaomi Mi 8 ha acquisito i dati ad una frequenza di 1 Hz.

Sono stati acquisiti i seguenti dati GNSS:

- GPS L1, L5;
- Galileo E1, E5a;
- GLONASS G1;
- BeiDou B1.

Come stazione di riferimento è stata utilizzata la stazione principale "TRSE" descritta in precedenza che ha acquisito i dati ad una frequenza di 1 Hz.

Sono stati acquisiti i seguenti dati GNSS:

- GPS L1, L2, L5;
- Galileo E1, E5a, E5b, AltBoc;
- GLONASS G1, G2;

4.2.2.3. Risultati dell'elaborazione dei dati

I dati sono stati registrati nella memoria interna del ricevitore GNSS Septentrio AsteRx-U. I dati sono stati quindi scaricati nel formato proprietario .sbf e controllati tramite il software SBF Analyzer, della suite APS3G Tools di Septentrio.

Una volta verificato che la campagna di misura non abbia presentato anomalie o che ci siano stati problemi nella registrazione dei dati, si è convertito il file .sbf in Rinex 3.03 tramite il software SBF Converter, sempre dalla suite APS3G Tools.

Per quanto riguarda lo smartphone, tramite alcune app presenti su Playstore (in ambiente Android), come Geo++ RINEX Logger, è possibile registrare i dati provenienti dai sistemi satellitari direttamente in formato Rinex 3.03.

Infine, le elaborazioni di post-elaborazione dei dati del ricevitore Septentrio e dello smartphone sono state eseguite utilizzando il software Novatel GrafNav v.8.90.2428.

Il software GrafNav fa uso di una tecnologia proprietaria denominata ARTK (AdVance RTK) per risolvere la problematica della stima delle ambiguità presenti nelle misure di fase. L'algoritmo ARTK è attivato per impostazione predefinita dal software GrafNav e ne viene in ogni caso consigliata l'attivazione in applicazioni ad alta precisione, cioè quando sono richiesti risultati a livello centimetrico.

Stando a quanto riportato nel manuale d'uso del software Novatel GrafNav, l'ARTK a doppia frequenza offre prestazioni veloci e affidabili, tuttavia, in ambienti ad alto multipath o dove la geometria dei satelliti è al limite dell'accettabilità, esiste la possibilità di una correzione delle ambiguità errata. Per questo motivo è importante consultare i grafici di controllo della qualità della soluzione ottenuta con il software GrafNav che consentono di individuare eventuali criticità.

Le soluzioni in termini di Position, Velocity, Time (PVT) sono state calcolate in post-elaborazione combinando la soluzione di tipo "forward" cioè la soluzione calcolata a partire dalla posizione di partenza del rilievo e la soluzione backward, cioè la soluzione ottenuta a partire dalla posizione finale.

Le elaborazioni sono state svolte utilizzando i seguenti di dati:

- GPS (L1/L2);
- Galileo (E1/E5b);
- GPS+Galileo (L1/L2, E1/E5b);
- GPS+GLONASS (L1/L2, G1/G2);
- GPS+GLONASS+Galileo (L1/L2, G1/G2, E1/E5b).

Le elaborazioni sono state fatte nel sistema ETRF2000 (all'epoca 2016.95), coerentemente con le coordinate della rete permanente regionale Marussi [121]; quindi trasformate (utilizzando un'utilità del software Novatel GrafNav v.8.90) in ITRF 2014 e proiettate nelle coordinate cartografiche Est (m) e Nord (m) UTM-ITRF2014 per motivi di allineamento rispetto alle soluzioni fornite da altri partner europei del progetto di ricerca.

Questo passaggio è stato svolto sia per le traiettorie ottenute utilizzando i dati del ricevitore Septentrio, che per quelle ottenute con la strumentazione Applanix del veicolo MMS e quelle ottenute con lo smartphone.

I dati di output in formato txt sono stati riordinati e convertiti in formato xlsx utilizzando uno script in MATLAB compilato appositamente (Figura 4.25).

```

files=dir('*.txt')
N=length(files)
for i=1:N
    thisfile = files(i).name
    a=readtable(thisfile,"NumHeaderLines",19)
    g=a(:,1:end-2)
    h=a(:,end-1:end)
    [drg, dcg]=size(g)
    z=array2table(nan(drg,3),'VariableNames',{'vuota1','vuota2','vuota3'})
    l=[g z h]
    [~,name]=fileparts(thisfile)
    y=sprintf('%s.xlsx',name)
    writetable(l,y)
end

```

Figura 4.25 Script in MATLAB per l'import dei file txt di output delle elaborazioni GrafNav

Dopo aver convertito i dati si sono svolti i confronti epoca per epoca fra la soluzione di riferimento MMS e quella calcolata con il software GrafNav utilizzando Microsoft Excel.

Si sono calcolate quindi le differenze planimetriche ed altimetriche che sono state tracciate rispetto al tempo in appositi grafici.

Successivamente sono state calcolate le statistiche per tutte le differenze, in termini di valori min/max, media, deviazione standard e 95° percentile.

Infine sono stati riportati gli skyplot, i grafici del rapporto segnale/rumore per tutte le combinazioni di satelliti GNSS e i grafici relativi al numero di epoche con soluzioni di tipo "fixed" (con ambiguità di fase fissate al valore intero) e "float" (ovvero con ambiguità di fase non fissate al valore intero).

4.2.2.3.1. Risultati dell'elaborazione dei dati ricevitore Septentrio – Rilievo urbano

Dalla Figura 4.26 alla Figura 4.35 sono state tracciate le differenze planimetriche (ΔN , ΔE) e altimetriche (Δh) in (m) tra le traiettorie del ricevitore Septentrio e quelle MMS, rispetto al tempo (s):

GPS L1 L2 - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

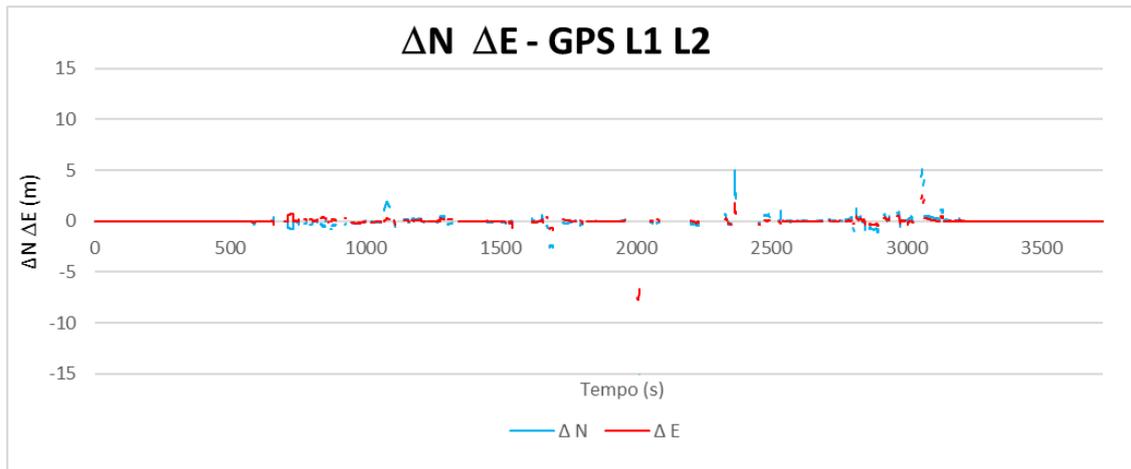


Figura 4.26 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito urbano

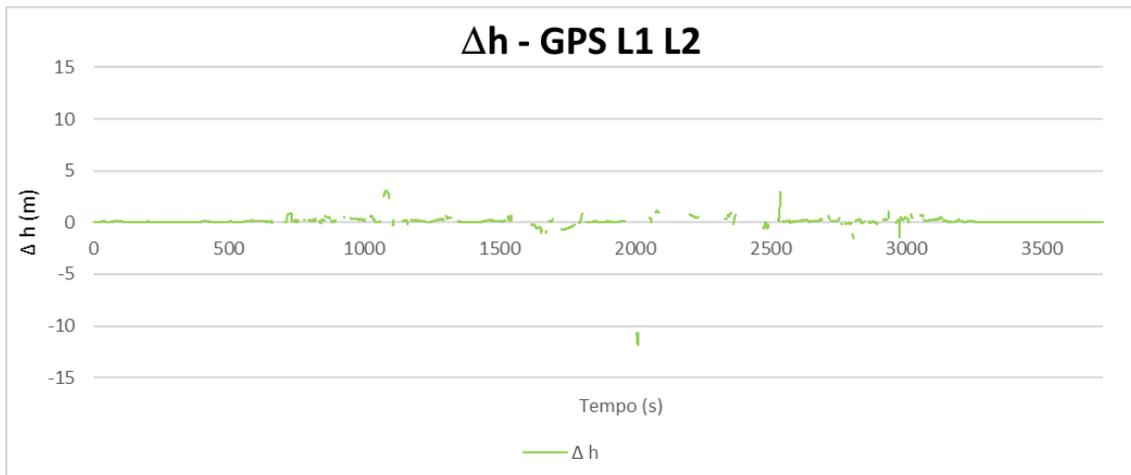


Figura 4.27 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito urbano

Galileo E1 E5b - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

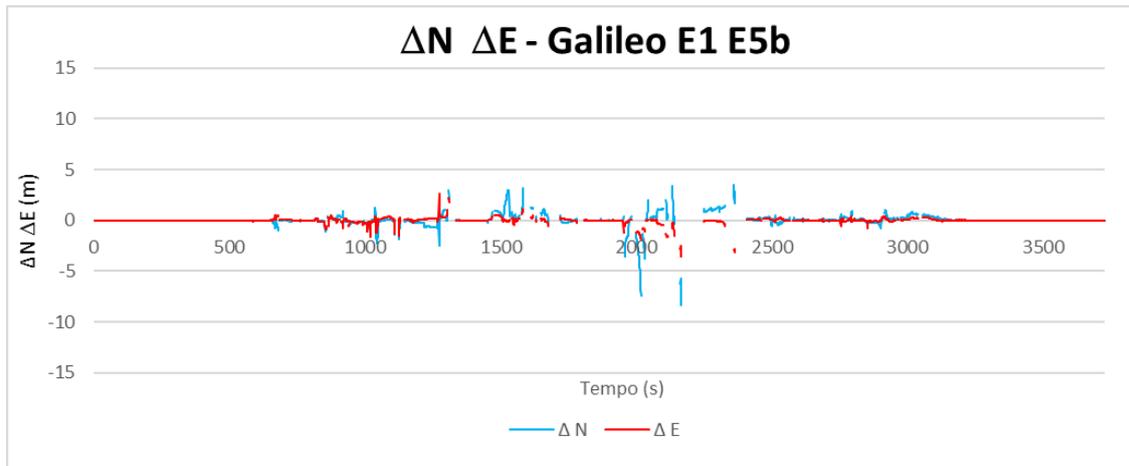


Figura 4.28 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano

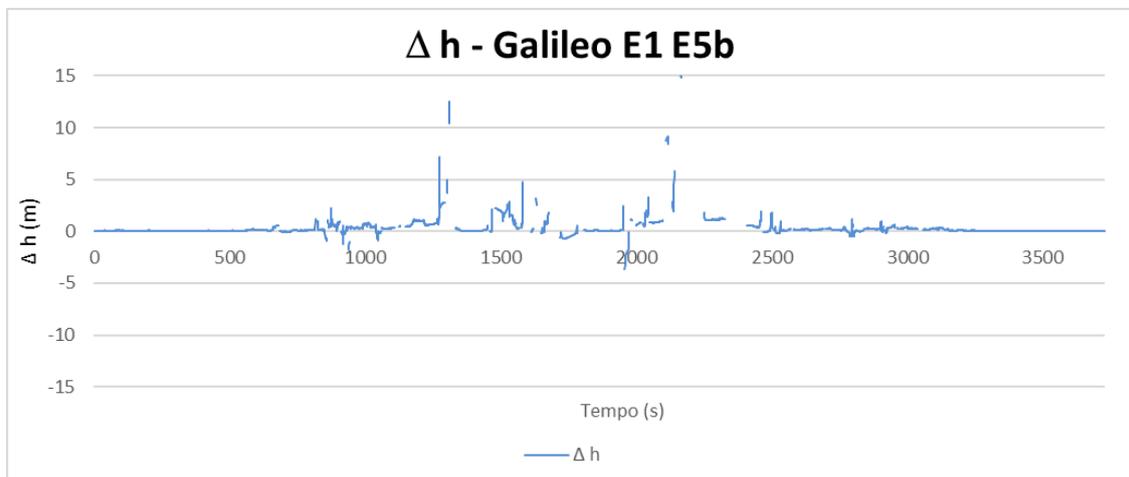


Figura 4.29 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano

GPS+GLONASS L1 L2, G1 G2 - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

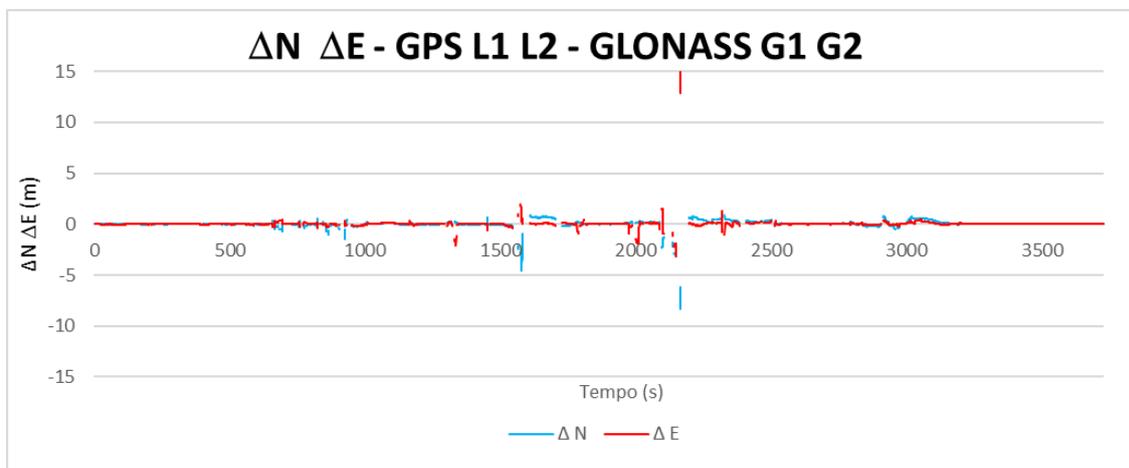


Figura 4.30 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano

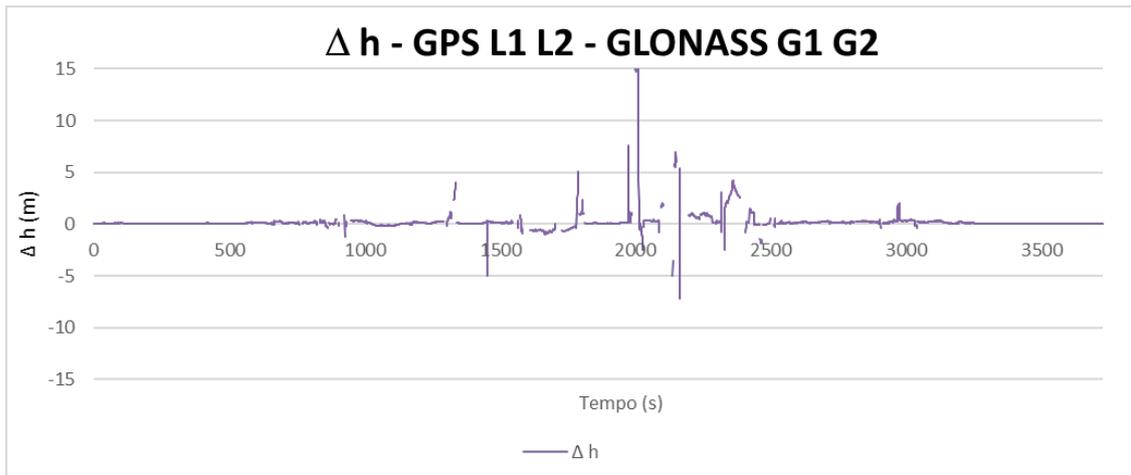


Figura 4.31 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano

GPS+Galileo L1 L2, E1 E5b - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

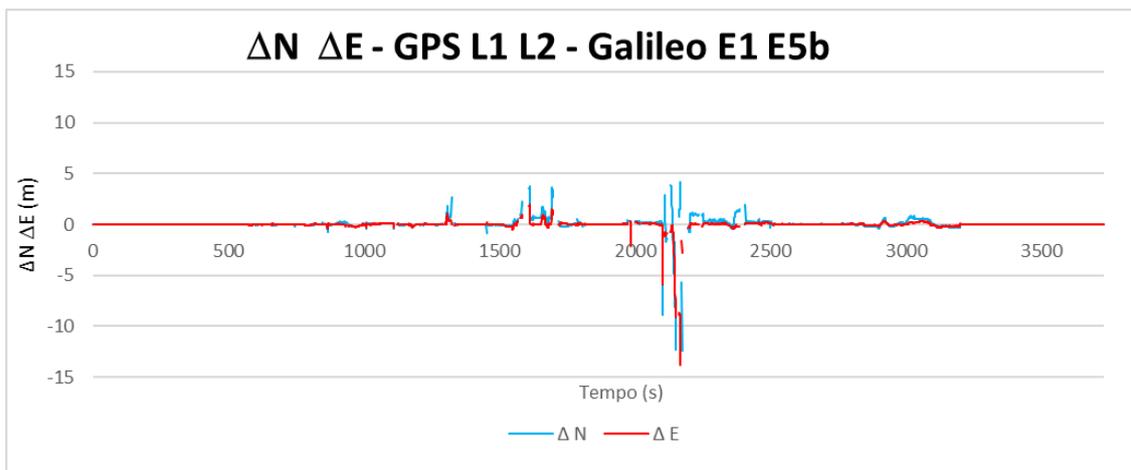


Figura 4.32 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano

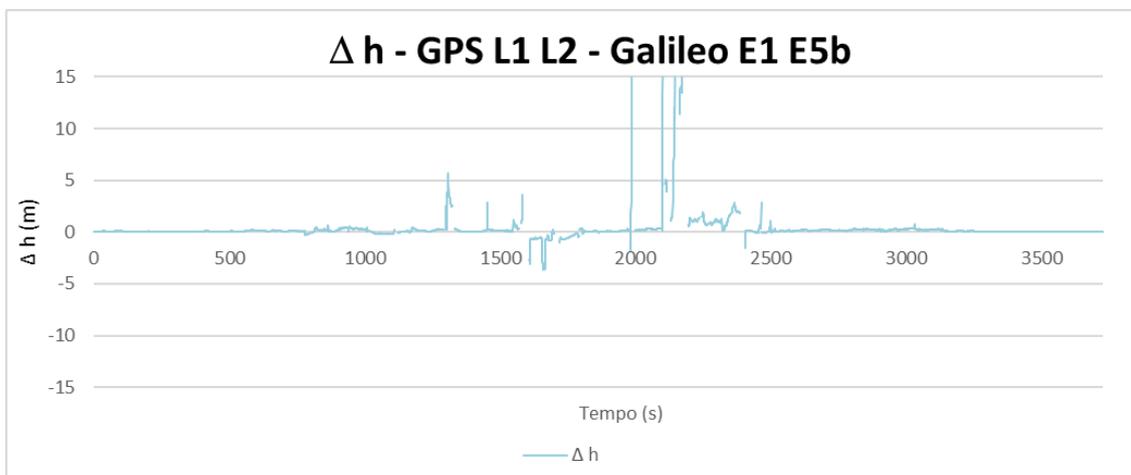


Figura 4.33 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo Ambito urbano

GPS+GLONASS+Galileo L1 L2, G1 G2, E1 E5b - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

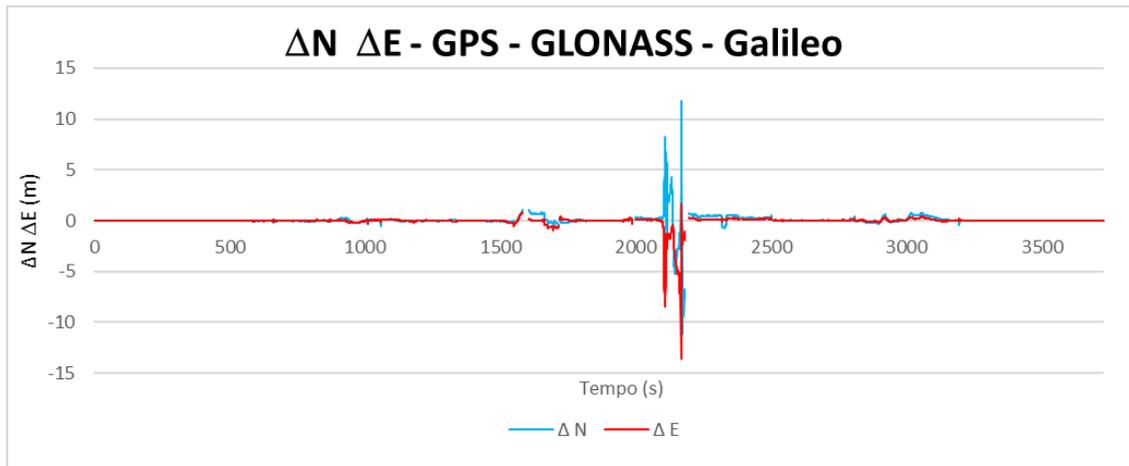


Figura 4.34 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

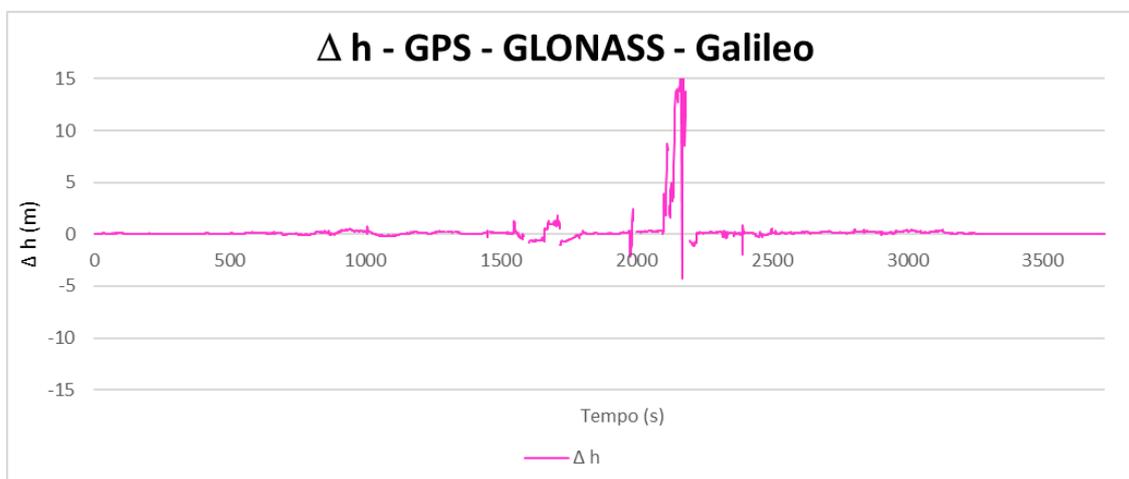


Figura 4.35 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

STATISTICHE TRAIETTORIE SEPTENTRIO IN AMBITO URBANO

	ΔE (m)				
	GPS L1 L2	Gal E1 E5b	GPS L1 L2 GLO G1 G2	GPS L1 L2 Gal E1 E5b	GPS GLO Gal
MAX ass	7.701	26.266	26.579	13.845	13.539
MIN ass	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MEDIA	0.095	0.114	0.090	0.098	0.133
DEV STD	0.461	0.539	0.567	0.542	0.629
Epoche	2679	3194	3364	3507	3647
Precisione del 95%	0.321	0.407	0.259	0.254	0.297

Tabella 4.6 Differenze planimetriche ΔE (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

	ΔN (m)				
	GPS L1 L2	Gal E1 E5b	GPS L1 L2 GLO G1 G2	GPS L1 L2 Gal E1 E5b	GPS GLO Gal
MAX ass	16.853	28.154	8.323	12.417	11.721
MIN ass	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MEDIA	0.209	0.255	0.147	0.178	0.200
DEV STD	1.015	0.770	0.367	0.598	0.705
Epoche	2679	3194	3364	3507	3647
Precisione del 95%	0.726	1.133	0.608	0.681	0.614

Tabella 4.7 Differenze planimetriche ΔN (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo - Ambito urbano

Si evidenzia che per il calcolo delle medie, delle deviazioni standard e del 95° percentile sono stati utilizzati i **valori assoluti** delle differenze Est Nord e Quota rispetto alla traiettoria di riferimento.

Osservando i valori in Tabella 4.6 si osserva innanzitutto come utilizzando il solo sistema satellitare Galileo sia stato possibile ottenere un maggior numero di soluzioni (3194) rispetto al sistema GPS (2679), pari al 19%. Inoltre si nota come con la combinazione GPS+Galileo si siano ottenute più soluzioni (3507) rispetto a quelle ottenute con la combinazione GPS+GLONASS (3364) e che la combinazione di tutti i sistemi abbia portato ad ottenere 3647 soluzioni, pari al 14% superiore alle soluzioni solo Galileo.

Sia nel caso delle ΔE che delle ΔN medie si osservano valori più alti per le soluzioni ottenute con il sistema satellitare Galileo, rispetto a quelle ottenute con il sistema GPS e le altre combinazioni. Unica eccezione è la ΔE media ottenuta con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo che risulta leggermente più elevata (0.133 m contro 0.114 m Galileo).

La deviazione standard dei valori ΔE Galileo (0.539 m) risulta essere maggiore di quella GPS (0.461 m) ma inferiore a quelle ottenute con la combinazione dei vari sistemi GNSS.

La deviazione standard dei valori ΔN Galileo (0.770 m) risulta essere minore di quella GPS (1.015 m) ma maggiore di tutte le altre.

I 95ⁱ percentili relativi ai valori medi dei valori assoluti ΔE che ΔN ottenuti con il sistema satellitare Galileo risultano essere più elevati rispetto a quelli ottenuti con il sistema GPS e le altre combinazioni.

La combinazione GPS+Galileo presenta un numero maggiore di soluzioni, di valori medi dei valori assoluti ΔE e ΔN e dei relativi 95ⁱ percentili confrontabili con quelli della combinazione GPS+GLONASS.

Alla luce di queste considerazioni si può evincere che per questa campagna di misura in ambito urbano, dal punto di vista planimetrico, il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere valori confrontabili con quelli ottenuti dal solo sistema satellitare GPS, anche se

più alti e con una dispersione maggiore di quelli ottenuti con quest'ultimo. Combinando il sistema satellitare GPS con quello Galileo si sono ottenuti valori planimetrici confrontabili con quelli della soluzione GPS+GLONASS ma anche in questo caso con valori più alti e con una dispersione maggiore.

	Δh (m)				
	GPS L1 L2	Gal E1 E5b	GPS L1 L2 GLO G1 G2	GPS L1 L2 Gal E1 E5b	GPS GLO Gal
MAX ass	11.885	26.156	18.707	28.355	19.068
MIN ass	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MEDIA	0.215	0.442	0.342	0.341	0.344
DEV STD	0.722	1.607	1.190	1.332	1.464
Epoche	2679	3194	3364	3507	3647
Precisione del 95%	0.646	1.399	1.061	1.073	0.674

Tabella 4.8 Differenze altimetriche Δh (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

Nel caso delle Δh medie in Tabella 4.8 si osservano valori più alti per le soluzioni ottenute con il sistema satellitare Galileo (0.442 m), rispetto alle soluzioni ottenute con il sistema GPS e le altre combinazioni.

La deviazione standard dei valori Δh Galileo (1.607 m) risulta essere maggiore di quella GPS (0.722 m) e di quelle ottenute con la combinazione dei vari sistemi GNSS.

Il 95° percentile relativo al valore medio dei valori assoluti Δh ottenuto con il sistema satellitare Galileo risulta essere più elevato rispetto a quelli ottenuti con il sistema GPS e le altre combinazioni.

La combinazione GPS+Galileo presenta un numero maggiore di epoche con una soluzione, valore medio dei valori assoluti Δh e il relativo 95° percentile confrontabili con quelli della combinazione GPS+GLONASS.

Alla luce di queste considerazioni si può evincere che per questa campagna di misura in ambito urbano, dal punto di vista altimetrico, il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere valori più elevati con quelli ottenuti dal solo sistema satellitare GPS e con una variabilità maggiore di quelli ottenuti con quest'ultimo. Combinando il sistema satellitare GPS con quello Galileo si sono ottenuti valori planimetrici pienamente confrontabili con quelli della soluzione GPS+GLONASS.

Oltre alle statistiche sopra esposte, sono state calcolate le percentuali di soluzioni con ambiguità fissate al valore intero (Fixed), ambiguità non fissate al valore intero (Float), calcolate con dati di codice (Code) e le soluzioni per le quali non è stato possibile calcolare soluzioni (No data) rispetto al numero di epoche corrispondenti alla durata complessiva del rilievo per le diverse combinazioni di costellazioni. I risultati sono riportati in Tabella 4.9.

	GPS L1 L2	Gal E1 E5b	GPS L1 L2 GLO G1 G2	GPS L1 L2 Gal E1 E5b	GPS GLO Gal
% Fixed	51.61	51.69	59.01	71.43	74.68
% Float	16.01	30.34	25.40	20.63	20.09
% Code	4.24	3.65	5.82	2.01	3.06
% No data	28.14	14.32	9.76	5.93	2.17

Tabella 4.9 Percentuali di soluzioni di tipo fixed, float, code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni

Dalla Tabella 4.9 come atteso, si può osservare che il valore delle percentuali Fixed e Float per le costellazioni GPS e Galileo differiscono per un valore trascurabile, ma aumentano per la soluzione GPS+GLONASS e aumentano in modo rilevante per le soluzioni multi-costellazione GPS+Galileo (71%) e GPS+GLONASS+Galileo (75%).

Per quanto riguarda la percentuale di soluzioni float invece, si evidenzia una percentuale quasi doppia per le soluzioni Galileo (30%) rispetto a quelle GPS (16%) e una percentuale sostanzialmente analoga per le soluzioni multi-costellazione (con percentuali che variano dal 20% al 25%).

Le percentuali di soluzioni ottenute con dati di codice sono sostanzialmente confrontabili fra le varie soluzioni ottenute con singola o multi costellazione, con il valore più basso corrispondente alle soluzioni GPS+Galileo (2%) e il valore più alto corrispondente alle soluzioni GPS+GLONASS (6%).

Per quanto riguarda la percentuale di epoche per le quali non è stato possibile calcolare una soluzione, Galileo (14%) presenta un valore pari alla metà di quello GPS (28%).

La soluzione ottenuta con i dati multi-costellazione GPS+GLONASS+Galileo è quella che presenta la percentuale di epoche senza dati minore evidenziando il vantaggio dell'uso della soluzione multi-costellazione.

Si è inoltre estrapolata una matrice di comparazione in cui sono evidenziate le percentuali di epoche per le quali l'utilizzo dei sistemi GPS e Galileo permette di calcolare negli stessi istanti soluzioni Fixed, Float, Code e No data, ma anche la percentuale di epoche in cui la soluzione calcolata con il sistema GPS è di tipo Fixed mentre quella Galileo è rispettivamente Float, Code e No data e tutte le altre possibili combinazioni (Tabella 4.10). Analoghe matrici di comparazione sono state estrapolate analizzando le percentuali relative a GPS e GPS+GLONASS (Tabella 4.11), GPS e GPS+Galileo (Tabella 4.12), GPS e GPS+GLONASS+Galileo (Tabella 4.13).

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
Galileo	Fixed	45.47	4.10	0.11	2.01
	Float	5.39	7.99	2.20	14.75
	Code	0.27	1.26	0.32	1.80
	No data	0.48	2.66	1.61	9.58

Tabella 4.10 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con il sistema GPS e Galileo

La matrice in Tabella 4.10 si presenta sostanzialmente simmetrica rispetto la diagonale principale che rappresenta le percentuali di soluzioni della stessa tipologia, tranne il caso del confronto fra GPS No data / Galileo Float (14.8%) e GPS Float / Galileo No data (2.7%). L'analisi dei valori percentuali presentati in Tabella 4.10 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando il sistema satellitare Galileo hanno consentito di ottenere un risultato qualitativamente superiore rispetto alle soluzioni GPS.

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
GPS+ GLONASS	Fixed	49.33	8.83	0.72	0.13
	Float	2.28	6.52	2.84	13.76
	Code	0.00	0.67	0.67	4.48
	No data	0.00	0.00	0.00	9.76

Tabella 4.11 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS

La matrice in Tabella 4.11 presenta percentuali relative alla tipologia delle soluzioni ottenute migliori per le soluzioni GPS+GLONASS se confrontate con quelle ottenute con la sola costellazione GPS.

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
GPS+ Galileo	Fixed	48.36	10.33	1.80	10.94
	Float	3.25	5.53	2.17	9.68
	Code	0.00	0.16	0.27	1.58
	No data	0.00	0.00	0.00	5.93

Tabella 4.12 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+Galileo

La matrice in Tabella 4.12 presenta per tutte le soluzioni GPS+Galileo percentuali relative alla tipologia delle soluzioni nettamente migliori rispetto a quelle ottenute con il solo sistema GPS.

Il confronto fra la Tabella 4.12 e la Tabella 4.11 evidenzia che la soluzione GPS+Galileo è migliore rispetto a quella GPS+GLONASS. Sommando le percentuali di Fix + Float GPS+Galileo in corrispondenza del caso No data GPS si ottiene una percentuale del 21% mentre con la soluzione GPS+GLONASS il corrispondente valore è del 14%.

Da un'analogia comparazione svolta con il confronto GPS e GPS+GLONASS+Galileo riportato in Tabella 4.13 si evidenzia una percentuale confrontabile (23%) rispetto a quella del confronto GPS e GPS+Galileo (21%).

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
GPS+GLONASS+Galileo	Fixed	48.87	9.52	1.90	14.38
	Float	2.74	6.12	2.31	8.93
	Code	0.00	0.38	0.03	2.66
	No data	0.00	0.00	0.00	2.17

Tabella 4.13 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo

La matrice in Tabella 4.13 mette in risalto come con l'utilizzo di più sistemi GNSS sia possibile ottenere una maggior percentuale di soluzioni con tipologia di soluzione migliore rispetto a quanto è possibile ottenere con un singolo sistema GNSS, come si può evincere dal confronto con i valori riportati nelle tabelle commentate in precedenza.

Ciò è particolarmente evidente nel confronto GPS+GLONASS+Galileo Fixed e GPS No data, che presenta la percentuale più alta rispetto a tutti i confronti effettuati con le precedenti matrici di comparazione.

Sommando le percentuali di Fix + Float GPS+GLONASS+Galileo in corrispondenza del caso No data GPS si ottiene una percentuale del 23% mentre con la soluzione GPS+GLONASS il corrispondente valore è del 14%, il che evidenzia il notevole contributo della costellazione Galileo. Si noti che il confronto GPS+GLONASS Fixed e GPS No data, presentava una percentuale dello 0.13% a fronte di una percentuale del 14.38% ottenuto nell'analogo confronto utilizzando la combinazione GPS+GLONASS+Galileo.

Si nota infine, come con le combinazioni GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo, la percentuale di epoche in cui la tipologia di soluzioni in corrispondenza del caso Fixed / Fixed si attesti intorno ad una percentuale del 48% a fronte di un massimo raggiungibile teorico pari al 51.61% (percentuale di soluzioni Fixed GPS, Tabella 4.9).

Correlate alle tabelle sopra descritte, sono state redatte le tabelle relative alle differenze planimetriche e altimetriche medie calcolate sui valori assoluti per il confronto GPS e Galileo (Tabella 4.14), GPS e GPS+GLONASS (Tabella 4.15), GPS e GPS+Galileo (Tabella 4.16), GPS e GPS+GLONASS+Galileo (Tabella 4.17).

Dalla Tabella 4.14, si nota che nel caso delle soluzioni della stessa tipologia, ottenute con il sistema GPS o con il sistema Galileo, come per il caso GPS Fixed / Galileo Fixed (che rappresenta il 46.47% dei confronti), i valori medi assoluti più bassi e quindi più "vicini" sia planimetricamente che altimetricamente alla soluzione di riferimento MMS, si hanno utilizzando il sistema Galileo.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta il 7.99% dei confronti) il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso

(0.366 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.409 m). Altimetricamente invece nel medesimo confronto il sistema satellitare GPS ha permesso di ottenere un valore medio più basso (0.389 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema Galileo (0.599 m).

Il confronto Code / Code (che rappresenta solamente lo 0.32% dei confronti) presenta dei valori planimetrici medi più bassi per il sistema GPS (0.658 m contro i 1.066 m ottenuti con il sistema Galileo) rispetto a quelli altimetrici (0.427 m contro i 3.825 m Galileo).

Come da attese i valori riportati nella parte sottostante la diagonale della tabella, presentano valori medi assoluti sempre migliori per il sistema GPS poiché la qualità della tipologia delle soluzioni GPS in questa parte della tabella è migliore rispetto a quella Galileo. Per quanto riguarda invece i valori soprastanti la diagonale della tabella, questi presentano valori medi assoluti migliori per il sistema Galileo poiché la qualità delle soluzioni Galileo in questa parte della tabella è migliore rispetto a quella GPS, eccetto che nel confronto GPS Code / Galileo Fixed (che rappresenta però solamente lo 0.11% dei confronti, quindi è poco significativo).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.14, tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.10, evidenzia quindi che le soluzioni Galileo sono confrontabili a livello centimetrico rispetto alle soluzioni GPS.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal
Galileo	Fixed	0.042	0.033	0.080	0.073	0.599	0.208	0.230	0.173	0.322	0.233	0.136	0.164	-	0.121	-	0.175
	Float	0.053	0.385	0.138	0.670	0.409	0.366	0.389	0.599	2.556	0.904	2.041	1.151	-	0.653	-	0.888
	Code	0.042	1.021	0.203	2.165	0.294	1.142	0.364	1.413	0.658	1.066	0.427	3.825	-	2.241	-	3.246
	No data	0.056	-	0.128	-	0.411	-	0.417	-	0.983	-	0.441	-	-	-	-	-

Tabella 4.14 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e Galileo

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		$\Delta N-E$ (m)		Δh ass (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh ass (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh ass (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh ass (m)	
		GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO
GPS+GLONASS	Fixed	0.043	0.042	0.084	0.084	0.430	0.153	0.249	0.185	0.299	0.247	0.599	0.308	-	0.118	-	0.198
	Float	0.054	0.056	0.147	0.145	0.496	0.239	0.468	0.310	0.971	0.377	0.656	0.867	-	0.283	-	0.368
	Code	-	-	-	-	0.256	0.588	0.552	0.951	6.672	0.856	4.552	6.692	-	1.284	-	2.197
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.15 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS

Dalla Tabella 4.15, si osserva che per il caso GPS Fixed / GPS+GLONASS Fixed (che rappresenta il 49.33% dei confronti), si hanno valori medi assoluti confrontabili a livello millimetrico sia planimetricamente che altimetricamente.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta il 6.52% dei confronti) la combinazione GPS+GLONASS ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso (0.239 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.496 m). Anche altimetricamente nel medesimo confronto la combinazione GPS+GLONASS ha permesso di ottenere un valore medio più basso (0.310 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema GPS (0.468 m).

Il confronto Code / Code (che rappresenta solamente lo 0.67% dei confronti) presenta dei valori planimetrici medi più bassi per il sistema GPS+GLONASS (0.856 m contro i 6.672 m ottenuti con il sistema GPS), mentre altimetricamente il sistema GPS ha permesso di ottenere valori medi inferiori (4.552 m contro i 6.692 m GPS+GLONASS).

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+GLONASS presenta valori medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS meno nel confronto altimetrico GPS Code / GPS+GLONASS Float che rappresenta solo il 2.84% dei confronti (0.656 m contro i 0.867 m GPS+GLONASS).

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si hanno valori medi assoluti comparabili a livello centimetrico nel confronto GPS Fixed / GPS+GLONASS Float e valori medi assoluti più bassi per il sistema GPS nel confronto GPS Float / GPS+GLONASS Code (che rappresenta però solamente lo 0.67% dei confronti, quindi poco significativo).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.15 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.11 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS hanno consentito di ottenere un risultato migliore rispetto a quanto è stato possibile ottenere utilizzando il solo sistema GPS.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal
GPS+Galileo	Fixed	0.040	0.038	0.082	0.077	0.496	0.175	0.373	0.186	1.632	0.360	1.315	0.339	-	0.199	-	0.182
	Float	0.089	0.147	0.164	0.152	0.367	0.332	0.309	0.455	1.823	0.488	1.316	0.711	-	0.456	-	0.780
	Code	-	-	-	-	0.254	1.092	0.407	3.173	2.083	0.732	0.475	2.481	-	3.745	-	6.666
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.16 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+Galileo

Dalla Tabella 4.16, si osserva che per il caso GPS Fixed / GPS+Galileo Fixed (che rappresenta il 48.36% dei confronti), si hanno valori medi assoluti confrontabili a livello centimetrico sia planimetricamente che altimetricamente.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta il 5.53% dei confronti) la combinazione GPS+Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso (0.332 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.367 m).

Altimetricamente invece nel medesimo confronto il sistema satellitare GPS ha permesso di ottenere un valore medio più basso (0.309 m) rispetto al valore ottenuto con la combinazione GPS+Galileo (0.455 m).

Il confronto Code / Code (che rappresenta solamente lo 0.27% dei confronti e quindi poco rappresentativo) presenta dei valori planimetrici medi più bassi per il sistema GPS+Galileo (0.732 m contro i 2.083 m ottenuti con il sistema GPS), mentre altimetricamente il sistema GPS ha permesso di ottenere valori medi inferiori (0.475 m contro i 2.481 m GPS+Galileo). Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+Galileo presenta valori medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS, a differenza di quanto visto nei confronti con la combinazione GPS+GLONASS analizzata in precedenza.

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si hanno valori medi assoluti comparabili a livello decimetrico nel confronto planimetrico GPS Fixed / GPS+Galileo Float (0.089 m contro i 0.147 m ottenuti con la combinazione GPS+Galileo) e valori medi assoluti comparabili in altimetria. Nel confronto GPS Float / GPS+Galileo Code (che rappresenta però solamente lo 0.16% dei confronti, quindi poco significativo) i valori medi assoluti ottenuti con il solo sistema GPS sono inferiori planimetricamente e altimetricamente a quelli ottenuti utilizzando la combinazione GPS+Galileo.

Comparando inoltre i valori del confronto GPS No data / GPS+Galileo Fixed che rappresenta ben il 10.94% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+Galileo pari a 0.199 m in planimetria e 0.182 m in altimetria. I valori ottenuti con la

combinazione GPS+GLONASS erano minori (Tabella 4.15) ma rappresentativi del solo 0.13% dei confronti.

Osservando invece i valori del confronto GPS No data / GPS+Galileo Float (che rappresenta il 9.68% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+Galileo pari a 0.456 m in planimetria e 0.780 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS erano minori (0.283 m in planimetria e 0.368 in altimetria Tabella 4.15) e rappresentativi del solo 13.76% dei confronti.

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.16 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.12 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando la combinazione dei sistemi satellitari GPS+Galileo hanno consentito di ottenere risultati comparabili a quelli ottenibili con la combinazione GPS+GLONASS e migliori a quanto è stato possibile ottenere con la soluzione GPS. Tuttavia i valori Float ottenuti quando il solo sistema GPS non ha dato nessun valore, risultano essere meno accurati di quelli ottenuti nel confronto GPS No data / GPS+GLONASS Float (con percentuali di rappresentatività del caso simili).

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal
GPS+GLO+Gal	Fixed	0.041	0.036	0.082	0.079	0.446	0.167	0.358	0.190	0.558	0.303	0.904	0.235	-	0.220	-	0.201
	Float	0.094	0.088	0.172	0.155	0.460	0.204	0.327	0.188	2.763	0.381	1.570	0.371	-	0.395	-	0.459
	Code	-	-	-	-	0.373	0.574	0.560	0.771	0.600	0.424	0.312	0.252	-	4.555	-	6.704
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.17 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo

Dalla Tabella 4.17, si osserva che per il caso GPS Fixed / GPS+GLONASS+Galileo Fixed (che rappresenta il 48.87% dei confronti), si hanno valori medi assoluti confrontabili a livello centimetrico sia planimetricamente che altimetricamente.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta il 6.12% dei confronti) la combinazione GPS+GLONASS+Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso (0.204 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.460 m).

Altimetricamente, nel medesimo confronto la combinazione di tre sistemi satellitari, ha permesso di ottenere un valore medio più basso (0.188 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema GPS (0.327 m).

Il confronto Code / Code (che rappresenta solamente lo 0.03% dei confronti e quindi poco rappresentativo) presenta dei valori planimetrici medi più bassi per il sistema GPS+GLONASS+Galileo (0.424 m contro i 0.600 m ottenuti con il sistema GPS), ed anche altimetricamente (0.252 m contro i 0.312 m GPS).

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+GLONASS+Galileo presenta valori medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS, come quanto visto nei confronti con la combinazione GPS+Galileo analizzata in precedenza.

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si hanno valori medi assoluti comparabili a livello centimetrico nel confronto planimetrico GPS Fixed / GPS+GLONASS+Galileo Float (0.094 m contro i 0.088 m ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo) e valori medi assoluti confrontabili in altimetria. Nel confronto GPS Float / GPS+GLONASS+Galileo Code (che rappresenta però solamente lo 0.38% dei confronti, quindi è poco significativo) i valori medi assoluti ottenuti con il solo sistema GPS sono inferiori planimetricamente e altimetricamente a quelli ottenuti utilizzando la combinazione GPS+GLONASS+Galileo.

Confrontando i valori GPS No data / GPS+GLONASS+Galileo Fixed che rappresentano ben il 14.34% dei confronti) si hanno valori medi assoluti GPS+GLONASS+Galileo pari a 0.220 m in planimetria e 0.201 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS sono stati minori (Tabella 4.15) ma rappresentativi del solo 0.13% dei confronti, mentre i risultati ottenuti con la combinazione GPS+Galileo risultano sempre inferiori (Tabella 4.16), ma confrontabili a livello centimetrico e con una rappresentatività simile (10.94%).

Osservando invece i valori del confronto GPS No data / GPS+GLONASS+Galileo Float che rappresenta l' 8.93% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+GLONASS+Galileo pari a 0.395 m in planimetria e 0.459 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS erano inferiori (0.283 m in planimetria e 0.368 m in altimetria Tabella 4.15) e rappresentativi del 13.76% dei confronti. I valori ottenuti con la combinazione GPS+Galileo, invece (rappresentativi del 9.68% dei confronti) hanno mostrato valori medi assoluti più elevati (0.456 m in planimetria e 0.780 m in altimetria).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.17, tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.13, evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS+Galileo hanno consentito di ottenere risultati confrontabili a quelli ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS ma leggermente peggiori rispetto alla soluzione GPS+Galileo. Tuttavia i valori Fixed ottenuti quando il solo sistema GPS non ha dato nessun valore, risultano essere meno accurati di quelli ottenuti nel confronto GPS No data / GPS+Galileo Fixed (con percentuali simili di rappresentatività).

Il contributo della costellazione Galileo risulta particolarmente evidente nei casi in cui il sistema GPS e le altre combinazioni già viste (GPS+GLONASS, GPS+Galileo) presentano parametri di qualità bassi (confronti GPS Float, Code, No data).

PDOP E N° DI SATELLITI TRAIETTORIE SEPTENTRIO IN AMBITO URBANO

Dalla Figura 4.36 alla Figura 4.40 sono riportati i grafici relativi al PDOP e al numero di satelliti e le relative statistiche dei dati elaborati per tutte le costellazioni utilizzate.

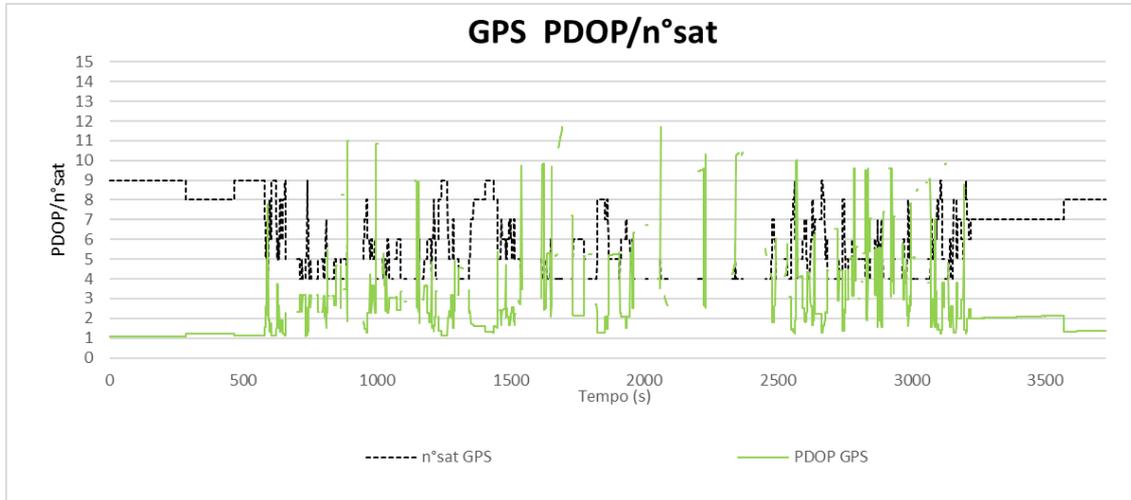


Figura 4.36 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS – Ambito urbano

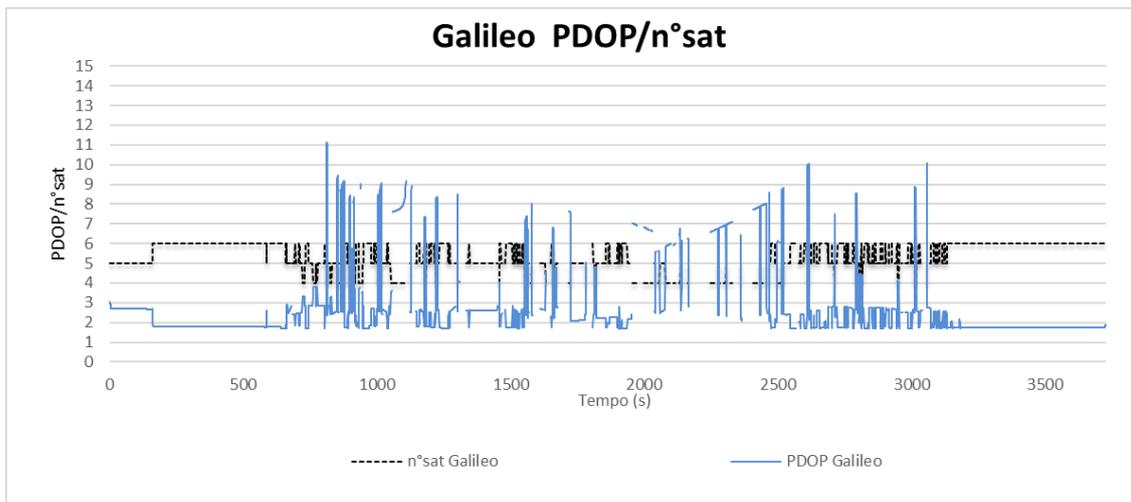


Figura 4.37 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati Galileo – Ambito urbano

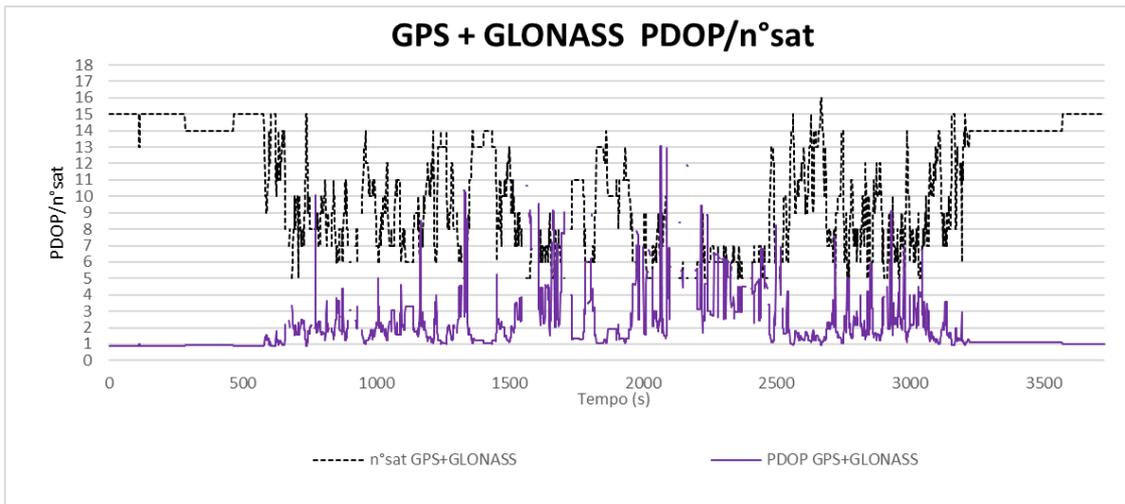


Figura 4.38 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Settentrrio per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano

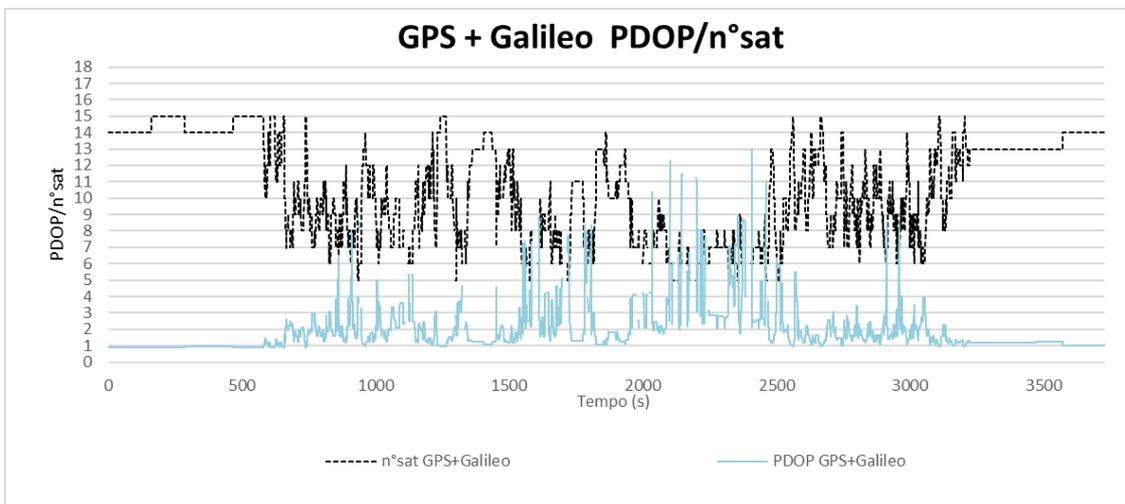


Figura 4.39 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Settentrrio per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano

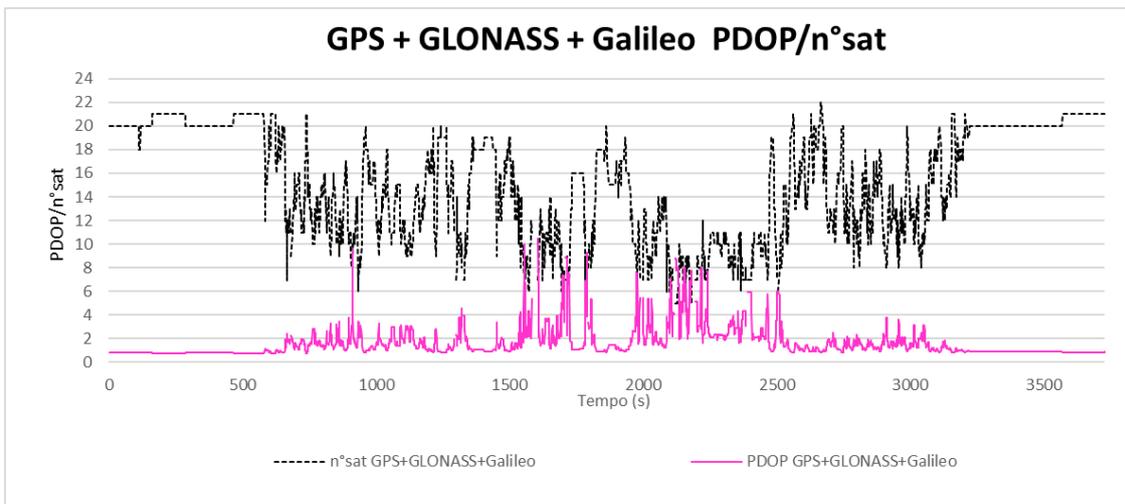


Figura 4.40 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Settentrrio per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

STATISTICHE PDOP E N° DI SATELLITI RICEVITORE SEPTENTRIO IN AMBITO URBANO

	GPS L1 L2		Galileo E1 E5b		GPS L1 L2 GLO G1 G2		GPS L1 L2 Galileo E1 E5b		GPS GLONASS Galileo	
	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP
MAX	9	11.72	6	11.12	16	13.09	15	12.99	22	12.16
MIN	4	1.09	4	1.69	5	0.88	5	0.89	5	0.77
MEDIA	6.62	2.69	5.35	2.79	10.77	2.06	10.84	1.92	15.32	1.64
epoche	2679	2679	3194	3194	3364	3364	3507	3507	3647	3647

Tabella 4.18 Statistiche relative al PDOP e al n° di satelliti per i dati GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

Dalla Tabella 4.18 si nota che il sistema satellitare Galileo presenta un numero medio e massimo di satelliti osservati, sensibilmente minore rispetto a quelli GPS. Il PDOP medio e massimo invece restano confrontabili.

SKYLOT RICEVITORE SEPTENTRIO IN AMBITO URBANO

Dalla Figura 4.41 alla Figura 4.45 sono riportati i grafici degli skyplot per tutte le costellazioni utilizzate:

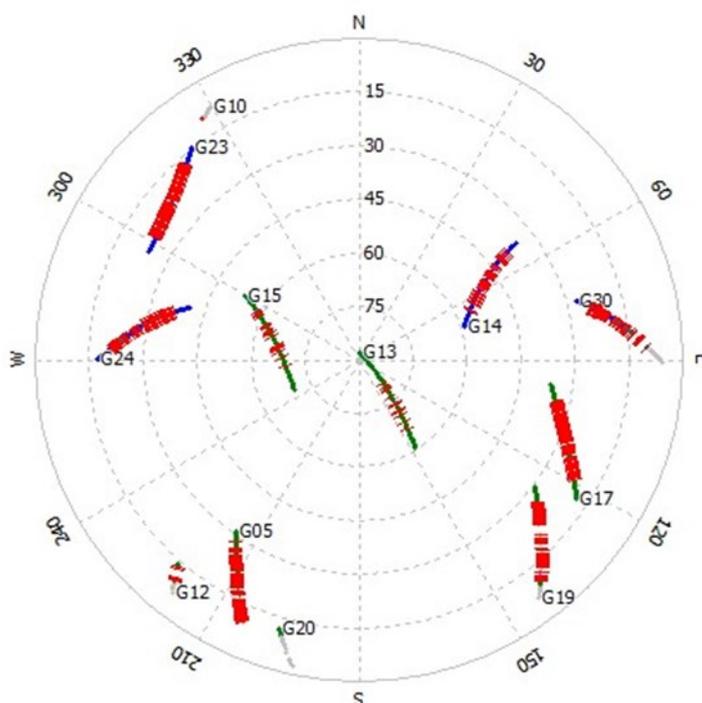


Figura 4.41 Skyplot dei satelliti GPS – Ambito urbano

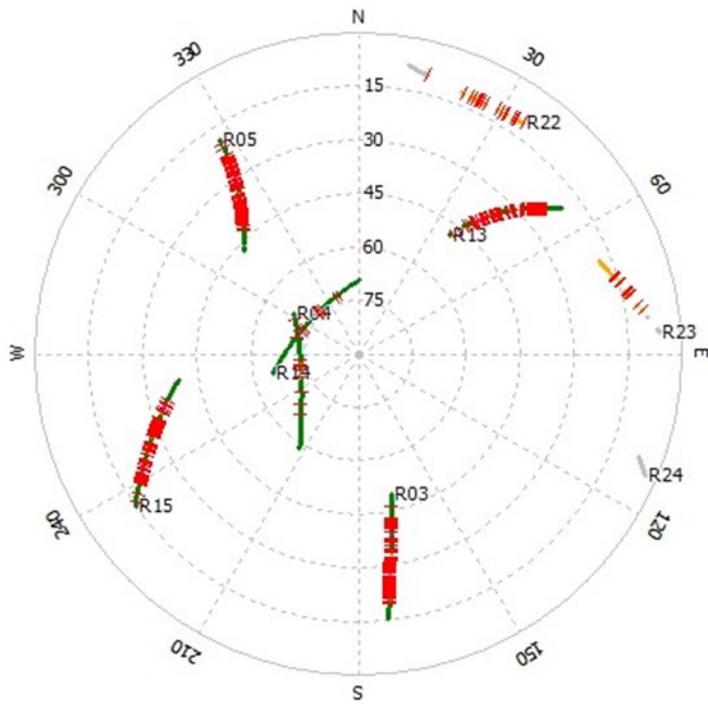


Figura 4.42 Skyplot dei satelliti GLONASS – Ambito urbano

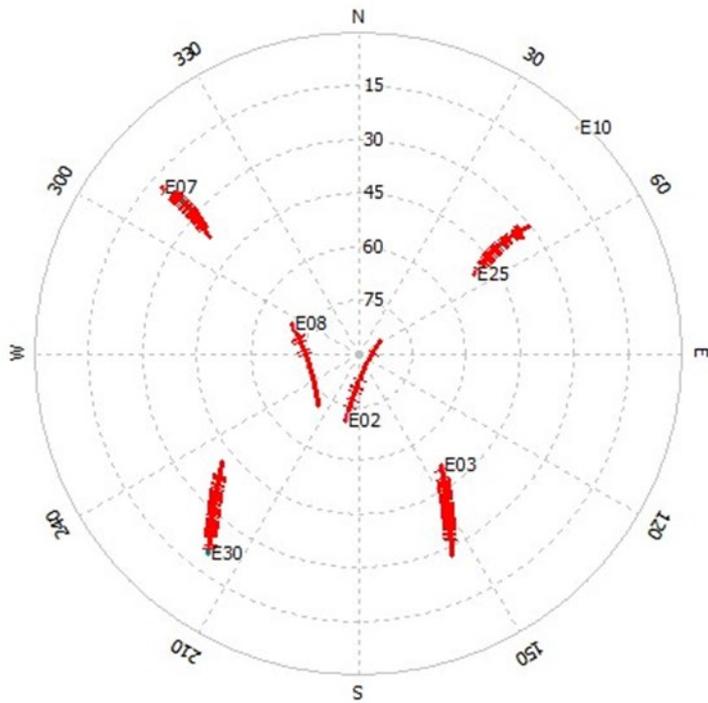


Figura 4.43 Skyplot dei satelliti Galileo – Ambito urbano

GRAFICI RAPPORTO SEGNALE/RUMORE E AMBIGUITÀ IN AMBITO URBANO

Nelle figure seguenti sono presentati alcuni grafici, ottenuti utilizzando il software Novatel GrafNav v.8.90 relativi all'elaborazione dei dati urbani: nel grafico in Figura 4.46 è riportato il rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (per i satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s):

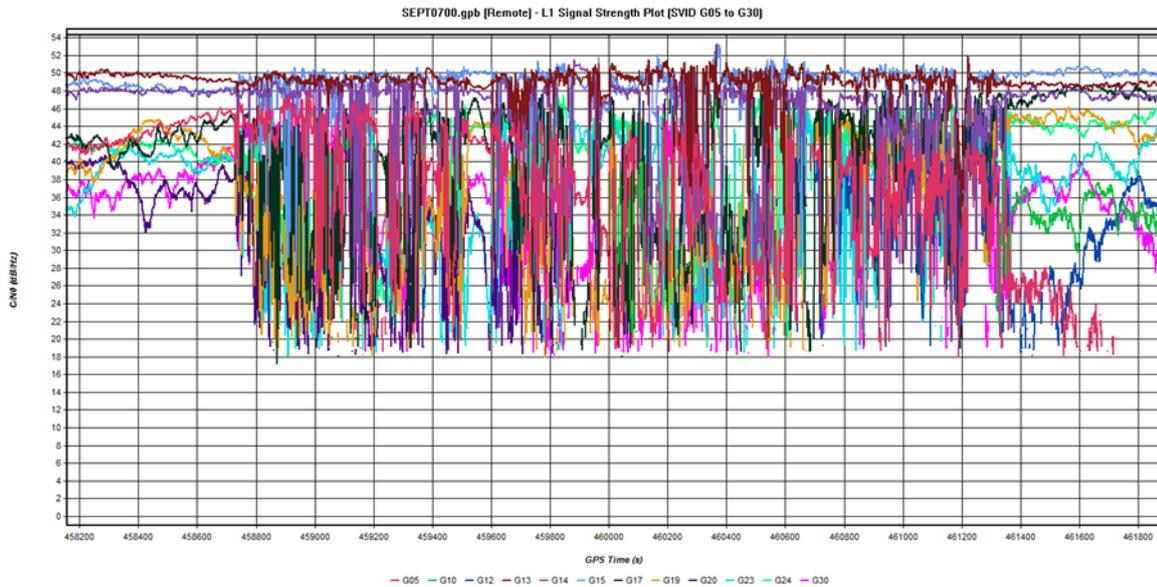


Figura 4.46 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s) – Ambito urbano

Nella Figura 4.47 si riporta il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS L1/L2:

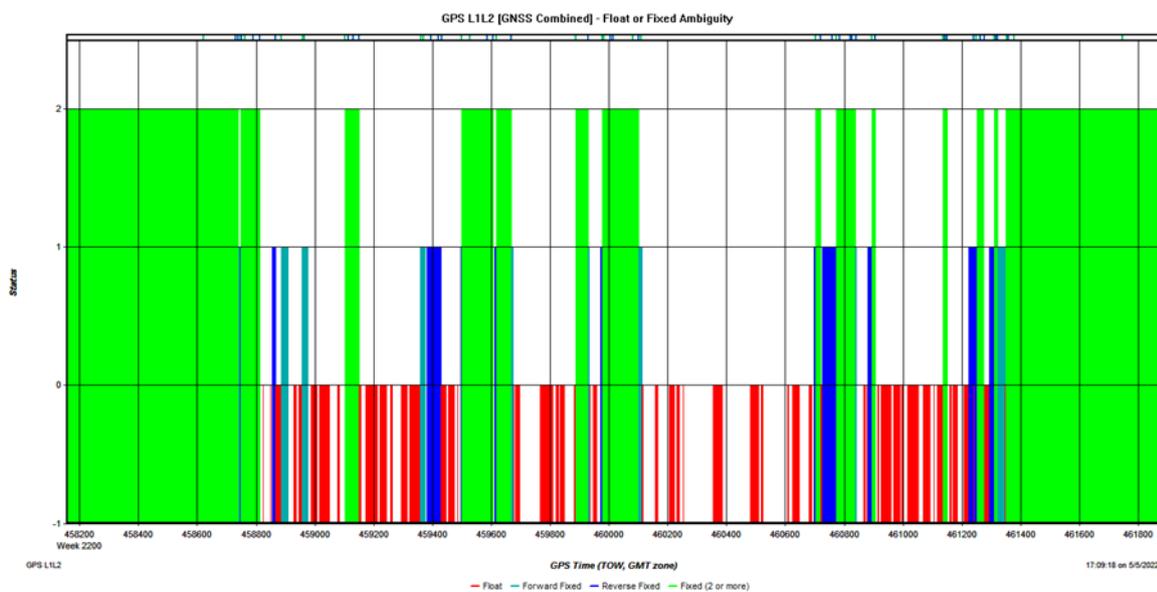


Figura 4.47 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS L1/L2 – Ambito urbano

Nel grafico in Figura 4.48 è riportato il rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (per i satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s):

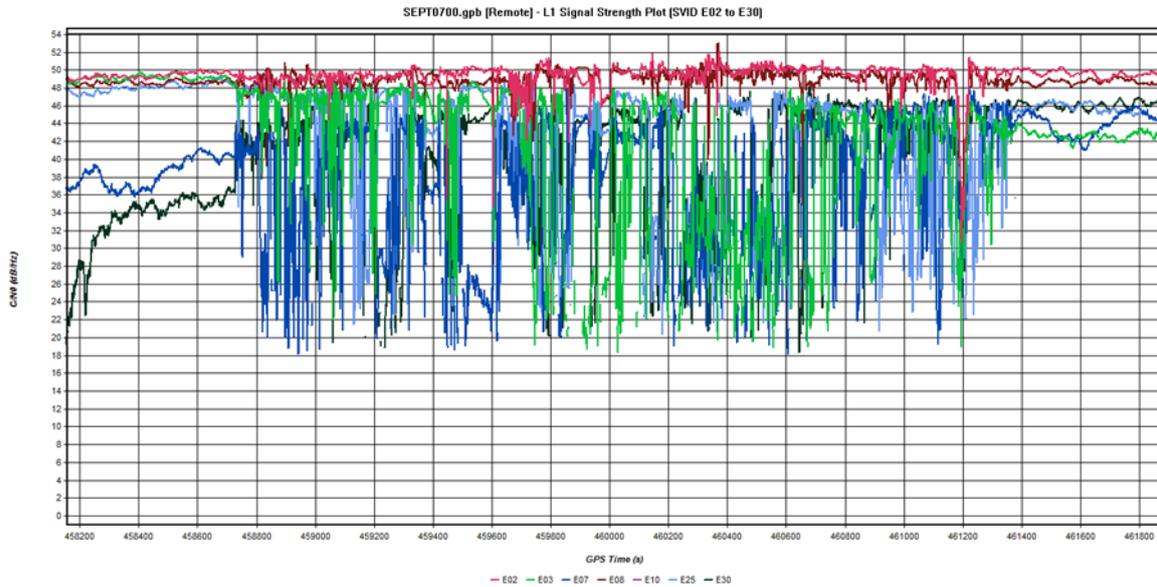


Figura 4.48 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s) – Ambito urbano

Nella Figura 4.49 si riporta il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati Galileo E1/E5b:

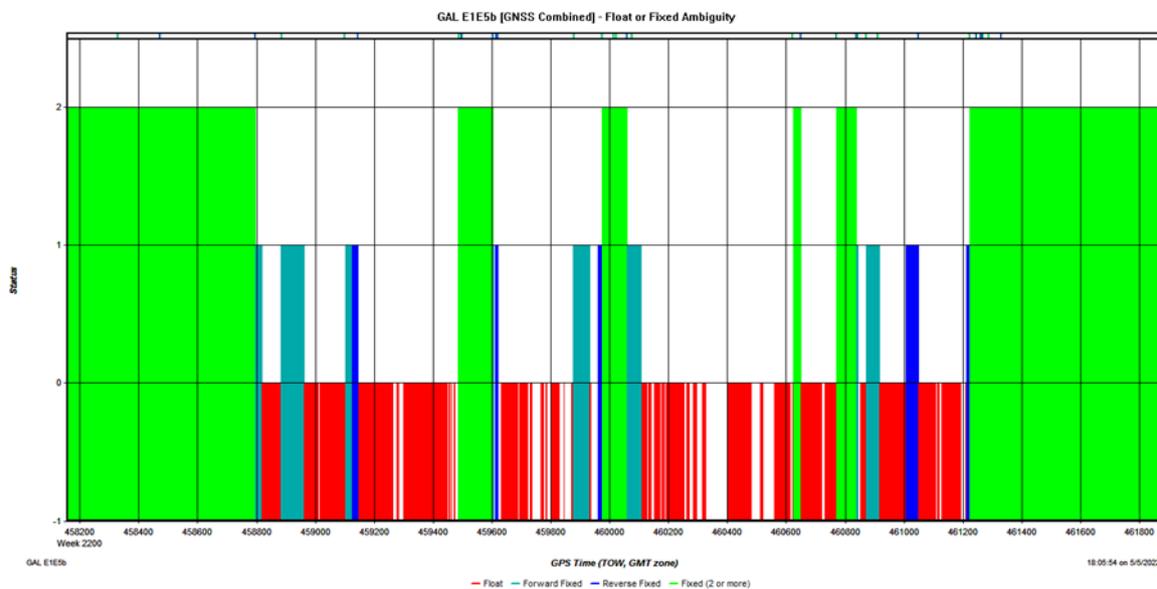


Figura 4.49 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati Galileo E1/E5b – Ambito urbano

Nella Figura 4.50 seguente è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L2, E1/E5b:

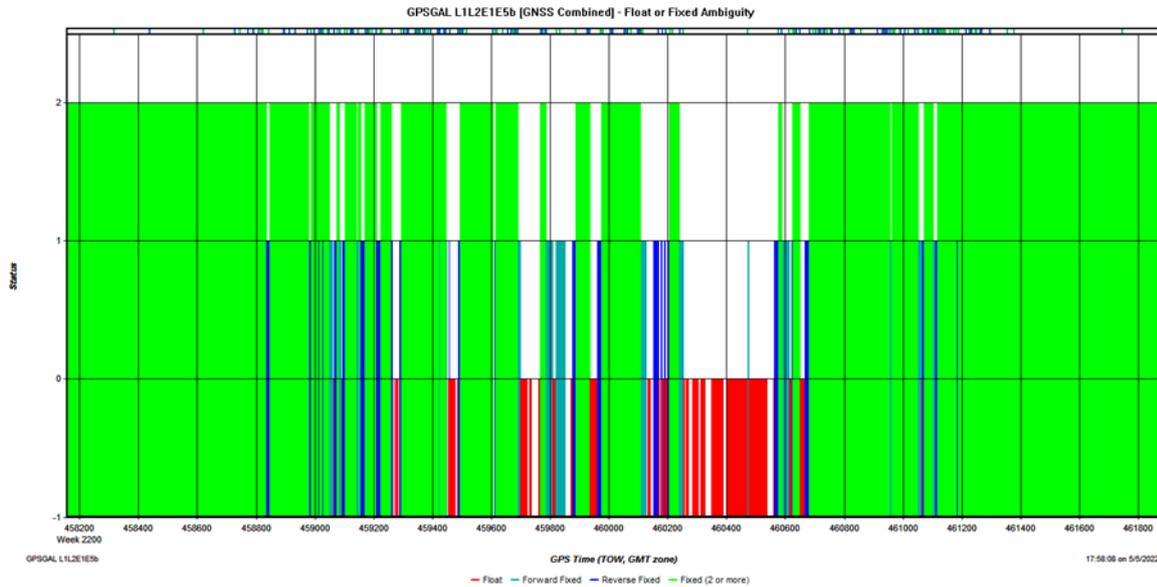


Figura 4.50 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L2, E1/E5b – Ambito urbano

Nella Figura 4.51 seguente è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L2, G1/G2:

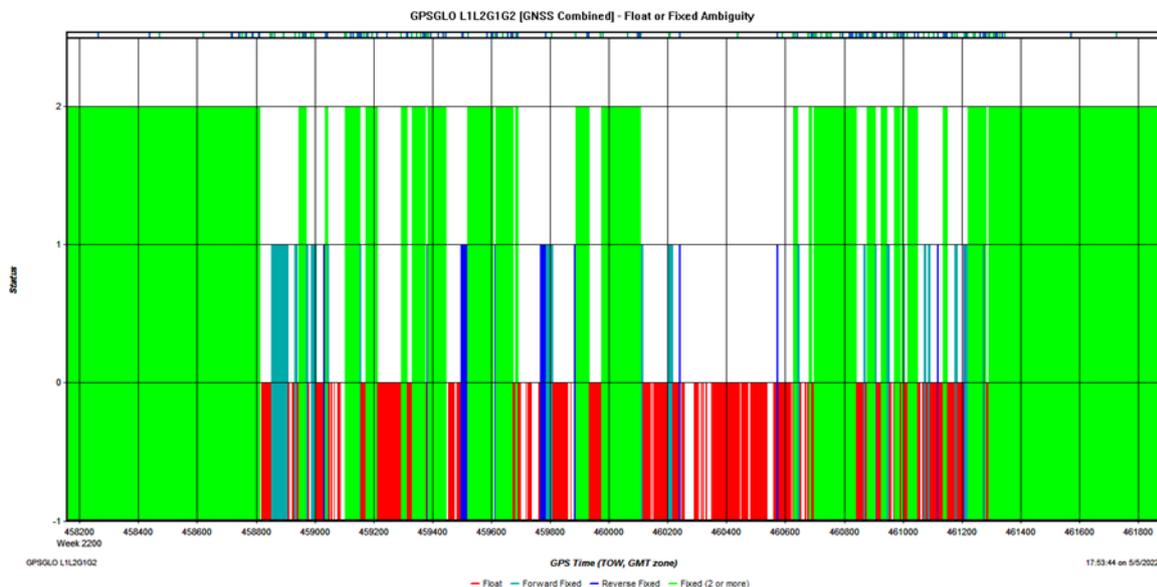


Figura 4.51 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L2, G1/G2 – Ambito urbano

Nella Figura 4.52 sottostante è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L2, G1/G2, E1/E5b:

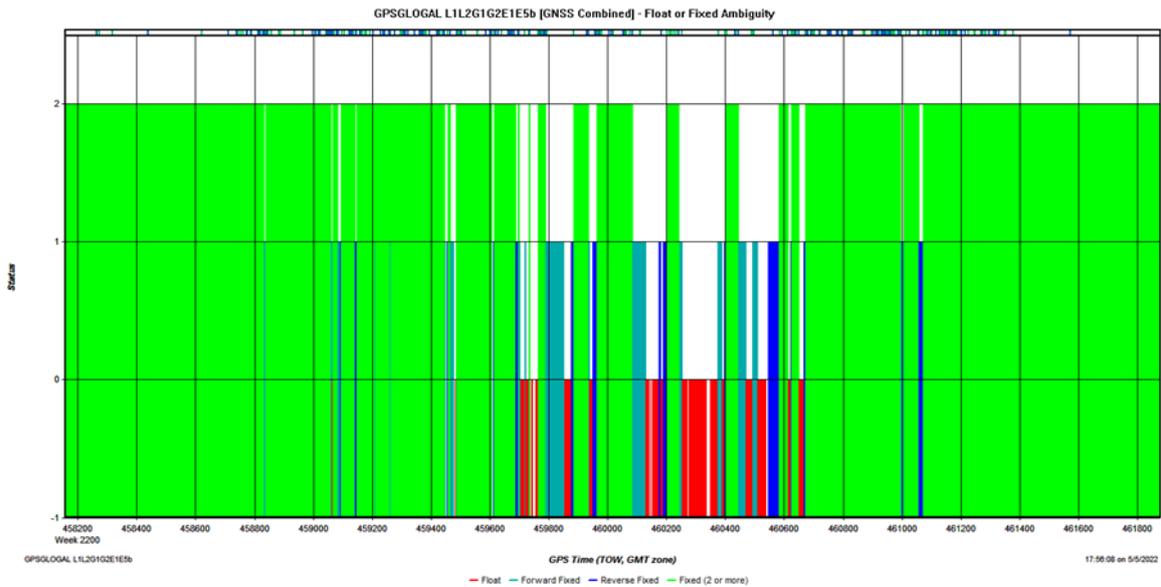


Figura 4.52 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L2, G1/G2, E1/E5b – Ambito urbano

PARTICOLARI DELLA TRAIETTORIA OTTENUTA IN AMBITO URBANO

Nelle due figure seguenti, viene presentato un ingrandimento della traiettoria urbana sovrapposta alle immagini satellitari di Google Earth, in cui sono evidenziate la traiettoria GPS (in rosso) e Galileo (in blu) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde):



Figura 4.53 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)

Nella Figura 4.53 soprastante, sono evidenti alcune posizioni GPS e Galileo che non potevano essere calcolate a causa degli ostacoli artificiali (edifici) presenti lungo la traiettoria.

Si può osservare come sia stato possibile calcolare molte posizioni utilizzando il sistema satellitare Galileo al contrario delle poche epoche ottenute con il sistema satellitare GPS.



Figura 4.54 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)

Nella Figura 4.54 soprastante è raffigurata una tipica situazione di "canyon urbano", in cui non è stato possibile ottenere una soluzione GPS e Galileo per alcune epoche. In particolare in alcuni punti sono visibili pochissime posizioni GPS, mentre è presente un numero maggiore di posizioni Galileo. Tuttavia in una parte della traiettoria, le posizioni calcolate con il sistema satellitare Galileo presentano una deviazione dalla traiettoria di riferimento.

4.2.2.3.2. Risultati dell'elaborazione dei dati ricevitore Septentrio – Rilievo extraurbano

Dalla Figura 4.55 alla Figura 4.64 sono state tracciate le differenze planimetriche (ΔN , ΔE) e altimetriche (Δh) in (m) tra le traiettorie del ricevitore Septentrio e quelle MMS, rispetto al tempo (s):

GPS L1 L2 - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

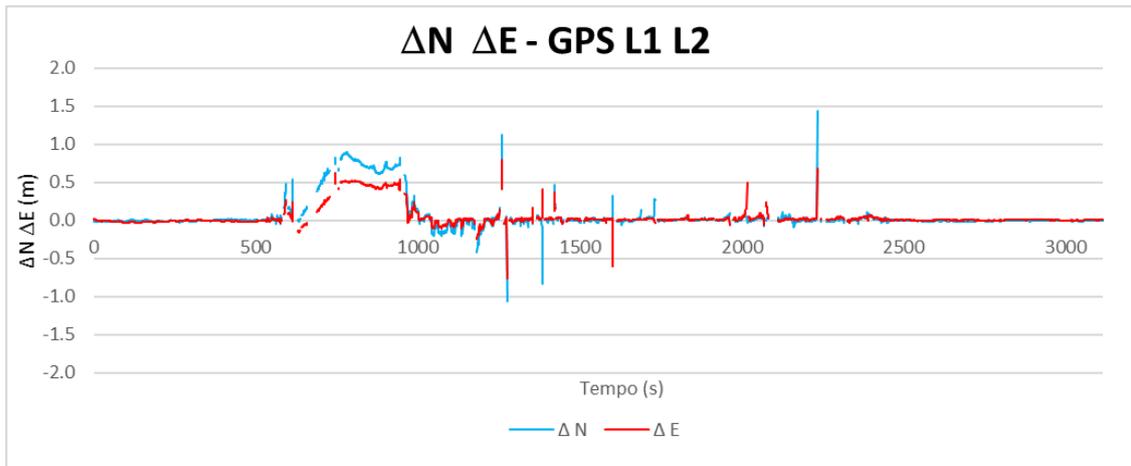


Figura 4.55 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano

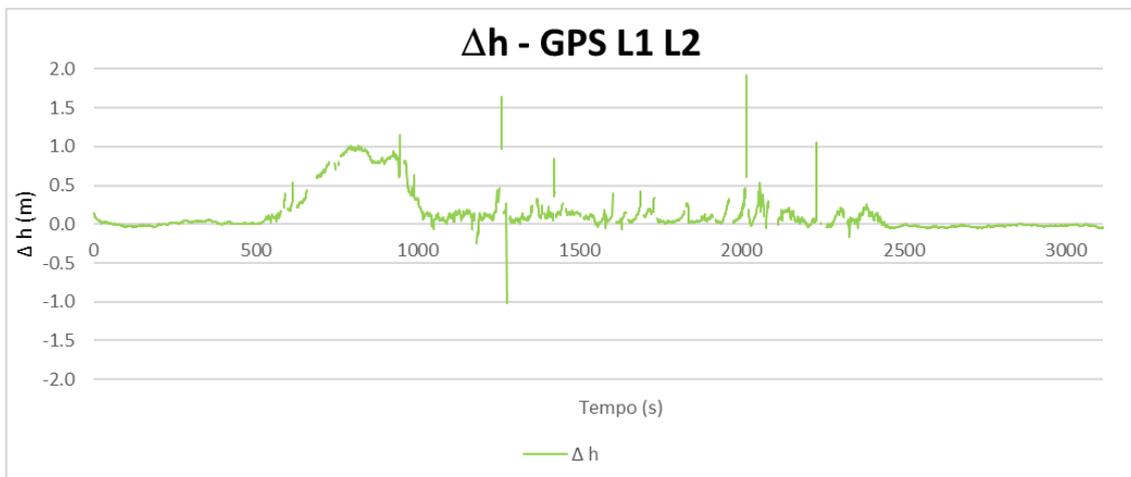


Figura 4.56 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano

Galileo E1 E5b - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

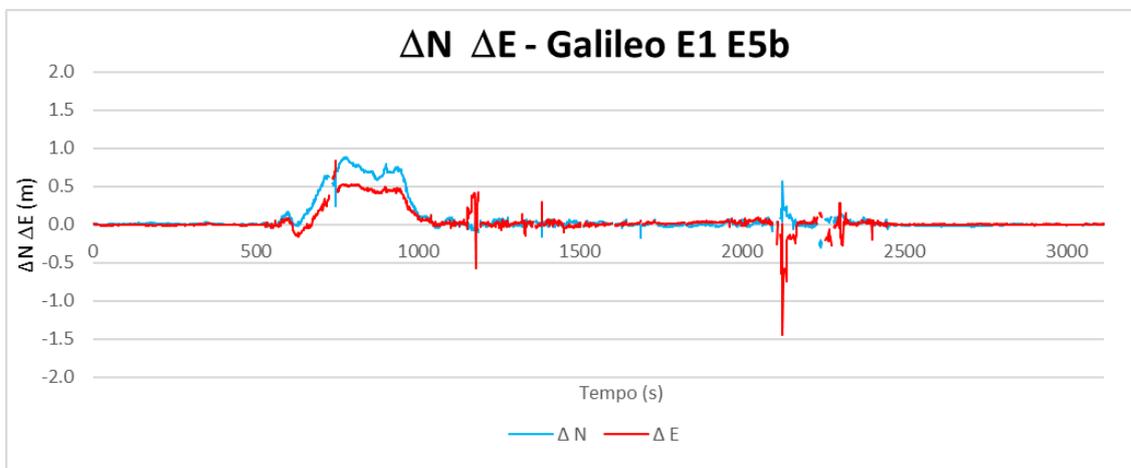


Figura 4.57 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano

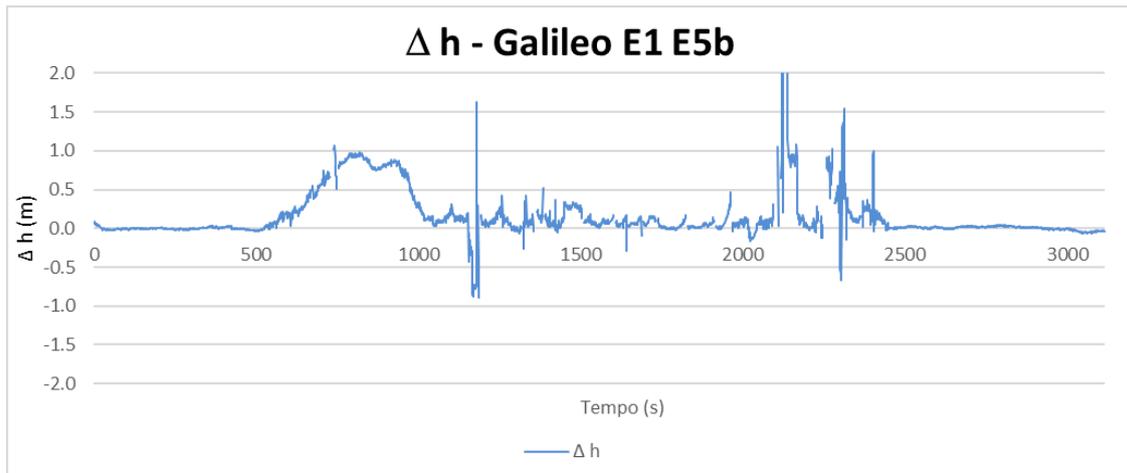


Figura 4.58 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano

GPS+GLONASS L1 L2, G1 G2 - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

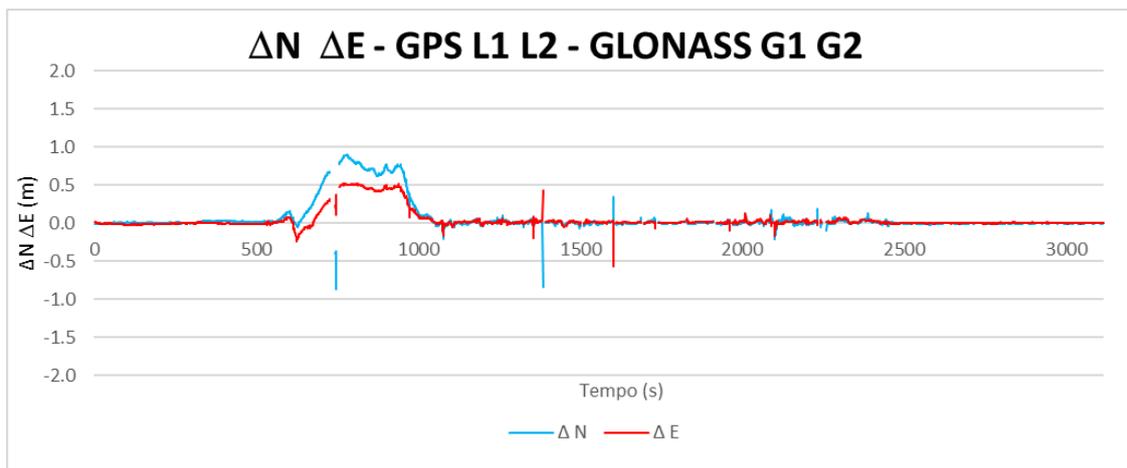


Figura 4.59 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano

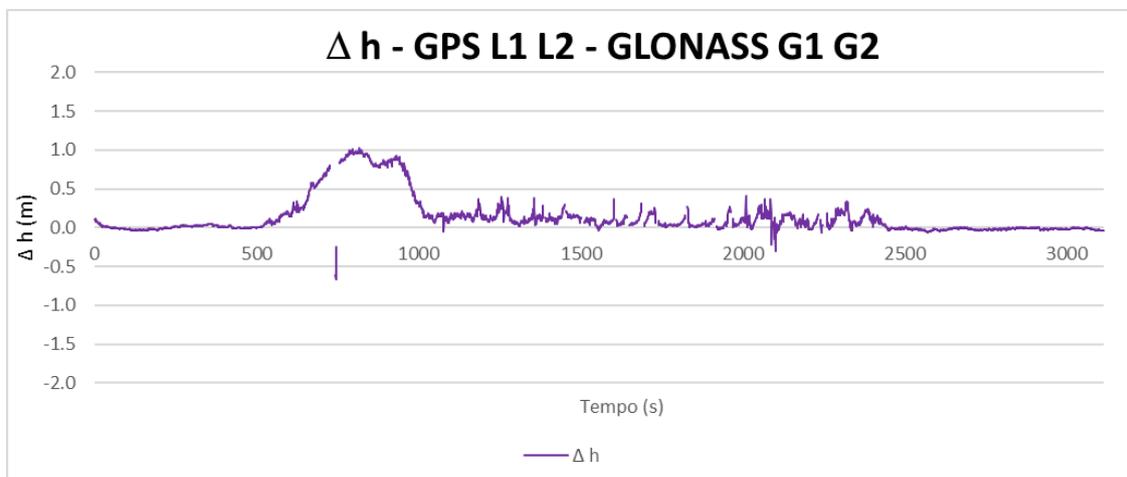


Figura 4.60 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano

GPS+Galileo L1 L2, E1 E5b - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

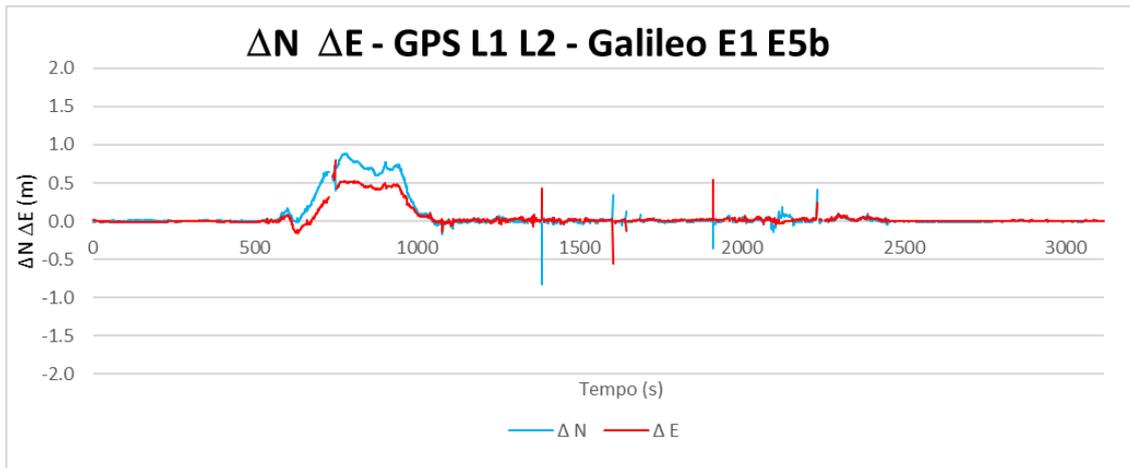


Figura 4.61 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano

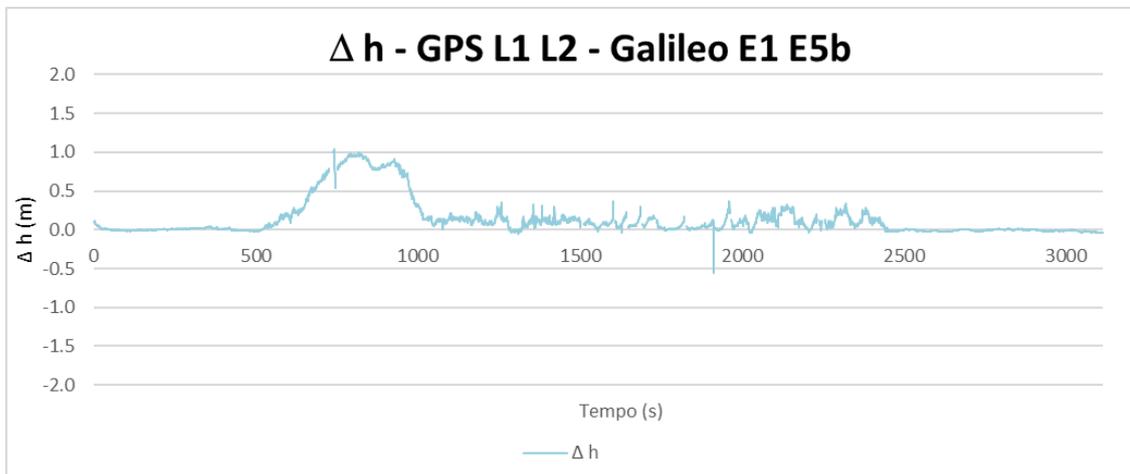


Figura 4.62 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano

GPS+GLONASS+Galileo L1 L2, G1 G2, E1 E5b - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

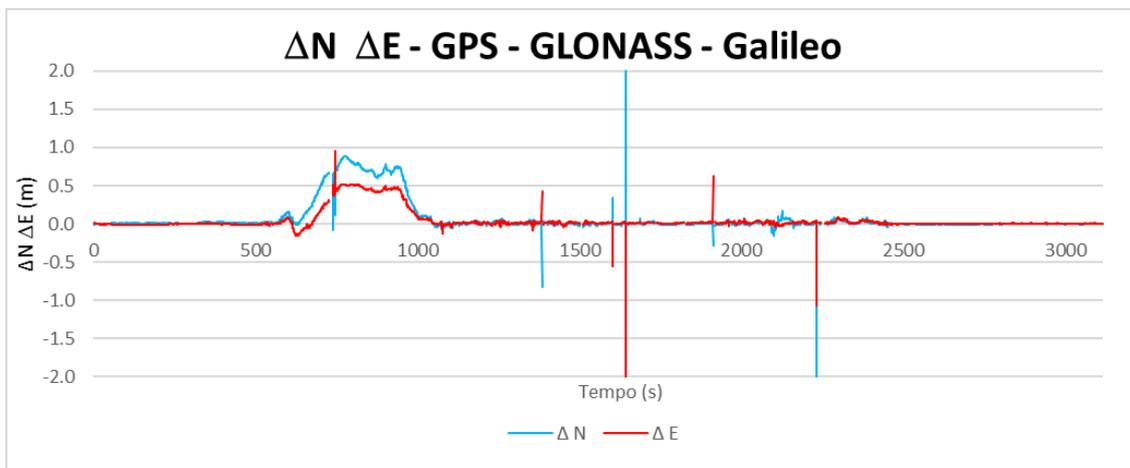


Figura 4.63 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

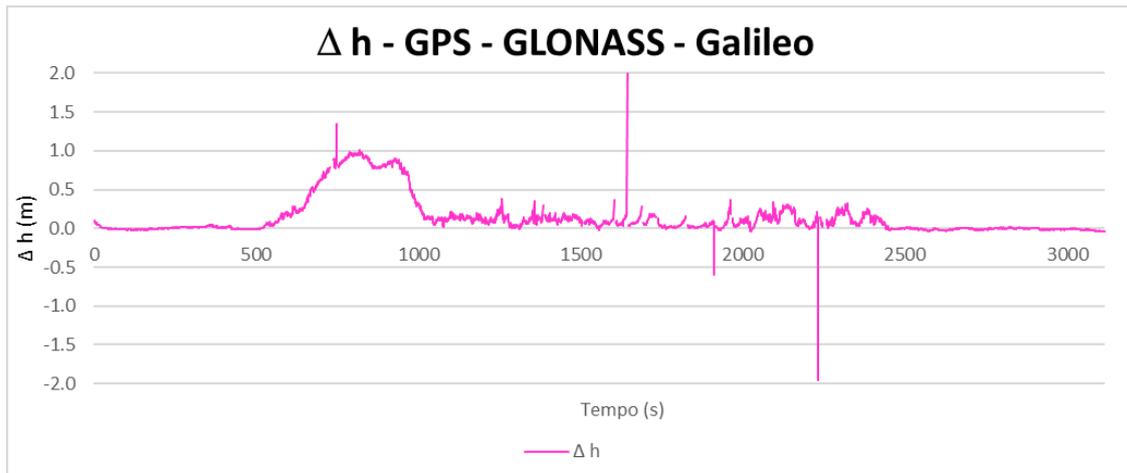


Figura 4.64 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

STATISTICHE TRAIETTORIE SEPTENTRIO IN AMBITO EXTRAURBANO

	ΔE (m)				
	GPS L1 L2	Gal E1 E5b	GPS L1 L2 GLO G1 G2	GPS L1 L2 Gal E1 E5b	GPS GLO Gal
MAX ass	0.791	1.445	0.568	0.805	2.350
MIN ass	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MEDIA	0.056	0.066	0.052	0.053	0.053
DEV STD	0.125	0.138	0.120	0.123	0.131
Epoche	2829	2977	3003	3039	3039
Precisione del 95%	0.456	0.453	0.451	0.452	0.450

Tabella 4.19 Differenze planimetriche ΔE (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

	ΔN (m)				
	GPS L1 L2	Gal E1 E5b	GPS L1 L2 GLO G1 G2	GPS L1 L2 Gal E1 E5b	GPS GLO Gal
MAX ass	1.444	0.877	0.898	0.883	2.346
MIN ass	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MEDIA	0.083	0.085	0.081	0.079	0.082
DEV STD	0.200	0.195	0.197	0.194	0.204
Epoche	2829	2977	3003	3039	3039
Precisione del 95%	0.691	0.686	0.693	0.682	0.692

Tabella 4.20 Differenze planimetriche ΔN (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

Si evidenzia che per calcolo delle medie, delle deviazioni standard e 95° percentile sono stati utilizzati i valori assoluti delle differenze Est Nord e Quota rispetto alla traiettoria di riferimento.

Osservando i valori in Tabella 4.19 si osserva innanzitutto come utilizzando il solo sistema satellitare Galileo sia stato possibile ottenere un maggior numero di epoche (2977) rispetto a quanto sia stato possibile ottenere con il sistema GPS (2829). Inoltre si nota come con la combinazione GPS+Galileo si siano ottenute un numero di epoche confrontabile (3039) a quelle ottenute con la combinazione GPS+GLONASS (3003) e GPS+GLONASS+Galileo (3039).

Sia nel caso delle ΔE che delle ΔN medie si osservano valori più alti, (ma confrontabili a livello centimetrico) per le soluzioni ottenute con il sistema satellitare Galileo, rispetto alle soluzioni ottenute con il sistema GPS e le altre combinazioni.

La deviazione standard dei valori ΔE Galileo (0.138 m) risulta essere maggiore di quella GPS (0.125 m) e di quelle ottenute con la combinazione dei vari sistemi GNSS.

La deviazione standard dei valori ΔN Galileo (0.195 m) risulta essere di poco minore di quella GPS (0.200 m) e confrontabile a livello centimetrico tutte le altre.

I 95ⁱ percentili relativi sia ai valori medi dei valori assoluti ΔE che ΔN ottenuti con il sistema satellitare Galileo risultano essere confrontabili a livello centimetrico rispetto a quelli ottenuti con il sistema GPS e le altre combinazioni.

La combinazione GPS+Galileo presenta un numero maggiore di epoche con una soluzione, valori medi dei valori assoluti ΔE e ΔN e i relativi 95ⁱ percentili confrontabili a livello centimetrico con quelli della combinazione GPS+GLONASS.

Alla luce di queste considerazioni si può evincere che per questa campagna di misura in ambito extraurbano, dal punto di vista planimetrico, il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere valori confrontabili con quelli ottenuti dal solo sistema satellitare GPS, anche dal punto di vista della dispersione dei risultati contrariamente a quanto osservato nella campagna urbana. Combinando il sistema satellitare GPS con quello Galileo si sono ottenuti valori planimetrici confrontabili con quelli della soluzione GPS+GLONASS anche dal punto di vista della dispersione dei risultati a differenza da quanto osservato in ambito urbano.

	Δh (m)				
	GPS L1 L2	Gal E1 E5b	GPS L1 L2 GLO G1 G2	GPS L1 L2 Gal E1 E5b	GPS GLO Gal
MAX ass	1.917	5.505	1.023	1.039	2.139
MIN ass	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MEDIA	0.141	0.178	0.145	0.142	0.144
DEV STD	0.239	0.329	0.233	0.233	0.238
Epoche	2829	2977	3003	3039	3039
Precisione del 95%	0.831	0.857	0.829	0.816	0.814

Tabella 4.21 Differenze altimetriche Δh (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

Nel caso delle Δh medie in Tabella 4.21 si osservano valori più alti per le soluzioni ottenute con il sistema satellitare Galileo, rispetto alle soluzioni ottenute con il sistema GPS e le altre combinazioni (0.178 m).

La deviazione standard dei valori Δh Galileo (0.329 m) risulta essere maggiore di quella GPS (0.239 m) e di quelle ottenute con la combinazione dei vari sistemi GNSS.

Il 95° percentile relativo al valore medio dei valori assoluti Δh ottenuti con il sistema satellitare Galileo risulta essere più elevato ma confrontabile rispetto a quello ottenuto con il sistema GPS e le altre combinazioni.

La combinazione GPS+Galileo presenta un numero maggiore di epoche con una soluzione, valore medio dei valori assoluti Δh e il relativo 95° percentile confrontabili con quelli della combinazione GPS+GLONASS.

Alla luce di queste considerazioni si può evincere che per questa campagna di misura in ambito extraurbano, dal punto di vista altimetrico, il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere valori confrontabili con quelli ottenuti dal solo sistema satellitare GPS e con una dispersione analoga a quelli ottenuti con quest'ultimo. Combinando il sistema satellitare GPS con quello Galileo si sono ottenuti valori planimetrici pienamente confrontabili con quelli della soluzione GPS+GLONASS.

Analogamente a quanto visto per il rilievo in ambito urbano, oltre alle statistiche sopra esposte, sono state calcolate le percentuali di soluzioni di tipo Fixed, Float, Code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni. I risultati sono riportati in Tabella 4.22

	GPS L1 L2	Gal E1 E5b	GPS L1 L2 GLO G1 G2	GPS L1 L2 Gal E1 E5b	GPS GLO Gal
%Fixed	81.32	87.39	88.38	90.40	89.89
%Float	9.27	7.96	7.64	7.03	7.48
%Code	0.19	0.19	0.35	0.10	0.16
%No data	9.21	4.46	3.63	2.47	2.47

Tabella 4.22 Percentuali di soluzioni di tipo fixed, float, code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni

Dalla Tabella 4.22 come atteso, si può osservare che la percentuale di soluzioni Fixed Galileo è apprezzabilmente più alta (87.39%) rispetto a quella GPS (81.32%) e confrontabile con quella ottenuta con la combinazione GPS+GLONASS (88.38%). La soluzione GPS+Galileo presenta una percentuale di soluzioni Fixed (90.40%) maggiore (anche se di poco) della soluzione GPS+GLONASS+Galileo (89.89%).

Per quanto riguarda la percentuale di soluzioni float invece, si evidenzia una percentuale quasi minore per le soluzioni Galileo (7.96%) rispetto a quelle GPS (9.27%) e una percentuale sostanzialmente analoga per le soluzioni multi-costellazione (con percentuali che variano dal 7.03% al 7.64%).

Le percentuali di soluzioni ottenute con dati di codice sono sostanzialmente confrontabili fra le varie soluzioni ottenute con singola o multi costellazione, con il valore più basso corrispondente alle soluzioni GPS+Galileo (0.10%) e il valore più alto corrispondente alle soluzioni GPS+GLONASS (0.35%), analogamente a quanto osservato in ambito urbano.

Per quanto riguarda la percentuale di epoche per le quali non è stato possibile calcolare una soluzione, Galileo (4.46%) presenta un valore pari alla metà di quello GPS (9.21%), analogo (in proporzione) a quanto osservato nei confronti in ambito urbano.

La soluzione ottenuta con i dati multi-costellazione GPS+Galileo è quella che presenta la percentuale più bassa di epoche senza dati (2.47%) come la soluzione GPS+GLONASS+Galileo, evidenziando la bontà della soluzione ottenuta senza sistema GLONASS.

In Tabella 4.23 analogamente a quanto è stato fatto per i rilievi svolti in ambito urbano, è riportata una matrice di comparazione in cui sono evidenziate le percentuali di epoche in cui l'utilizzo del sistema GPS e Galileo generano negli stessi istanti le medesime soluzioni Fixed, Float, Code e No data, ma anche la percentuale di epoche in cui la soluzione calcolata con il sistema GPS è di tipo Fixed mentre quella Galileo è rispettivamente Float, Code e No data. Analoghe matrici di comparazione sono state estrapolate analizzando le percentuali relative a GPS e GPS+GLONASS (Tabella 4.24), GPS e GPS+Galileo (Tabella 4.25), GPS e GPS+GLONASS+Galileo (Tabella 4.26).

%		GPS			
		Fix	Float	Code	No data
Galileo	Fixed	75.48	7.25	0.10	4.56
	Float	4.97	1.57	0.10	1.32
	Code	0.06	0.06	0.00	0.06
	No data	0.80	0.39	0.00	3.27

Tabella 4.23 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e Galileo

La matrice in Tabella 4.23 si presenta sostanzialmente simmetrica rispetto la diagonale principale che rappresenta le percentuali di soluzioni ottenute della stessa tipologia, tranne il caso del confronto fra GPS No data / Galileo Fixed (4.56%) e GPS Fixed / Galileo No data (0.80%).

L'analisi dei valori percentuali presentati in Tabella 4.23 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando il sistema satellitare Galileo hanno consentito di ottenere un risultato qualitativamente superiore rispetto alle soluzioni GPS come riscontrato anche in ambito urbano.

%		GPS			
		Fix	Float	Code	No data
GPS+ GLONASS	Fixed	78.82	6.84	0.00	2.73
	Float	2.50	2.41	0.16	2.57
	Code	0.00	0.03	0.03	0.29
	No data	0.00	0.00	0.00	3.63

Tabella 4.24 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS

La matrice in Tabella 4.24 presenta percentuali relative alla tipologia delle soluzioni ottenute migliori per tutte le soluzioni ottenute con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS se confrontate con quelle ottenute con la sola costellazione GPS come riscontrato analogamente in ambito urbano.

%		GPS			
		Fix	Float	Code	No data
GPS+ Galileo	Fixed	77.31	7.09	0.00	6.00
	Float	4.01	2.12	0.19	0.71
	Code	0.00	0.06	0.00	0.03
	No data	0.00	0.00	0.00	2.47

Tabella 4.25 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+Galileo

La matrice in Tabella 4.25 presenta per tutte le soluzioni ottenute con la combinazione GPS+Galileo percentuali relative alla qualità delle soluzioni nettamente migliori rispetto a quelle ottenute con il solo sistema GPS.

Il confronto fra la Tabella 4.25 e la Tabella 4.24 evidenzia che la soluzione GPS+Galileo è confrontabile rispetto a quella GPS+GLONASS. Sommando le percentuali di Fixed + Float GPS+Galileo in corrispondenza del caso No data GPS si ottiene una percentuale del 6.71% mentre con la soluzione GPS+GLONASS il corrispondente valore è del 5.30%.

Da un'analoga comparazione svolta con il confronto GPS e GPS+GLONASS+Galileo riportato in Tabella 4.13 si evidenzia una percentuale confrontabile (6.64%) con quella del confronto GPS e GPS+Galileo (6.71%).

%		GPS			
		Fix	Float	Code	No data
GPS+GLONASS+Galileo	Fixed	77.37	6.68	0.13	5.71
	Float	3.95	2.54	0.06	0.93
	Code	0.00	0.06	0.00	0.10
	No data	0.00	0.00	0.00	2.47

Tabella 4.26 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo

La matrice in Tabella 4.26 evidenzia come con l'utilizzo di più sistemi GNSS è possibile ottenere una maggior percentuale di soluzioni con qualità migliore rispetto a quanto è possibile ottenere con un singolo sistema GNSS, come si può evincere dal confronto con i valori riportati nelle tabelle commentate in precedenza. Le differenze tuttavia sono meno marcate rispetto a quanto osservato in ambito urbano, dove l'utilizzo di più costellazioni rende disponibile la ricezione dei segnali di più satelliti in ambiti difficili come nei canyon urbani, quando con un solo sistema GNSS non sarebbe possibile calcolare la posizione. In ambito extraurbano infatti mancando situazioni ambientali così ardue, si verifica un "appiattimento" delle prestazioni che risultano meno dissimili a seconda della quantità di satelliti visibili / numero di costellazioni utilizzate.

Ciò è particolarmente evidente nel confronto GPS+GLONASS+Galileo Fixed e GPS No data, che presenta una percentuale confrontabile rispetto ai confronti effettuati con le matrici di comparazione relative al solo Galileo (4.56%) e alla combinazione GPS+Galileo (6.00%), presentando comunque una percentuale maggiore (5.71%) di quella GPS+GLONASS (2.73%) a fronte di un numero comparabile di epoche con una soluzione (Tabella 4.21 e Tabella 4.22).

Sommando le percentuali di Fix + Float GPS+GLONASS+Galileo in corrispondenza del caso No data GPS si ottiene una percentuale del 6.64% mentre con la soluzione GPS+GLONASS il corrispondente valore è del 5.30%, evidenziando il minore contributo della costellazione Galileo in ambito extraurbano rispetto a quello più significativo in ambito urbano.

Si nota infine, come con le combinazioni GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo, la percentuale di epoche in cui la qualità di soluzioni in corrispondenza del caso Fixed / Fixed si attesti intorno ad una percentuale del 77.37% a fronte di un massimo raggiungibile pari al 81.32% (percentuale di soluzioni Fixed GPS, Tabella 4.22).

Correlate alle tabelle sopra descritte, ne sono state redatte di analoghe con le differenze planimetriche e altimetriche medie per il confronto GPS e Galileo (Tabella 4.27), GPS e GPS+GLONASS (Tabella 4.28), GPS e GPS+Galileo (Tabella 4.29), GPS e GPS+GLONASS+Galileo (Tabella 4.30).

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		$\Delta N-E$ (m)		Δh_{ass} (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh_{ass} (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh_{ass} (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh_{ass} (m)	
		GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal
Galileo	Fixed	0.095	0.096	0.128	0.124	0.165	0.132	0.243	0.213	1.018	0.060	1.273	0.105	-	0.207	-	0.298
	Float	0.059	0.209	0.137	0.714	0.137	0.091	0.221	0.226	0.950	0.947	0.747	0.718	-	0.206	-	0.412
	Code	0.068	0.860	0.135	3.042	0.084	0.254	0.209	0.107	-	-	-	-	-	0.576	-	0.312
	No data	0.053	-	0.080	-	0.402	-	0.242	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.27 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e Galileo

Dalla Tabella 4.27, si nota che nel caso delle soluzioni della stessa tipologia, ottenute con il sistema GPS o con il sistema Galileo, come per il caso GPS Fixed / Galileo Fixed (che rappresenta il 75.48% dei confronti), i valori medi assoluti sia planimetricamente che altimetricamente sono confrontabili a livello centimetrico.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta l'1.57% dei confronti) il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso (0.091 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.137 m). Altimetricamente invece nel medesimo confronto il sistema satellitare GPS ha permesso di ottenere un valore medio leggermente più basso (0.221 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema Galileo (0.226 m).

Il confronto Code / Code non presenta valori poiché non esistono casi corrispondenti, così come nel caso del confronto No data / No data.

Come già visto in ambito urbano i valori riportati nella parte sottostante la diagonale della tabella, presentano valori medi assoluti migliori per il sistema GPS poiché la qualità delle

soluzioni GPS in questa parte della tabella è migliore (meno nel caso GPS Float / Galileo Code altimetrico) rispetto alla qualità delle soluzioni Galileo.

I valori soprastanti la diagonale della tabella, presentano valori medi assoluti migliori per il sistema Galileo (dovuto alla qualità delle soluzioni Galileo migliore rispetto a quelle GPS). Il comparando i valori ottenuti con i confronti GPS Fixed / Galileo Float (rappresentatività 4.97%) e Galileo Fixed / GPS Float (rappresentatività 7.25%) è possibile osservare che i valori planimetrici e altimetrici ottenuti con Galileo Float (0.209 m e 0.714 m) sono più elevati di quelli ottenuti con GPS Float (0.165 m e 0.243 m).

L'analisi dei valori percentuali presentati in Tabella 4.27 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.23 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando il sistema satellitare Galileo hanno consentito di ottenere un risultato confrontabile a livello centimetrico rispetto alle soluzioni GPS.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO
GPS+GLONASS	Fixed	0.092	0.091	0.126	0.125	0.144	0.093	0.220	0.201	-	-	-	-	-	0.197	-	0.350
	Float	0.113	0.116	0.183	0.197	0.242	0.160	0.294	0.264	0.975	0.207	1.055	0.415	-	0.149	-	0.231
	Code	-	-	-	-	0.275	0.097	0.342	0.066	1.029	0.460	0.786	0.616	-	0.174	-	0.120
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.28 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS

Dalla Tabella 4.28 , si osserva che per il caso GPS Fixed / GPS+GLONASS Fixed (che rappresenta il 78.82% dei confronti), si hanno valori medi assoluti confrontabili a livello millimetrico sia planimetricamente che altimetricamente, come visto anche in ambito urbano.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta il 2.41% dei confronti) la combinazione GPS+GLONASS ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso (0.160 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.242 m). Anche altimetricamente nel medesimo confronto la combinazione GPS+GLONASS ha permesso di ottenere un valore medio leggermente più basso (0.264 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema GPS (0.294 m).

Il confronto Code / Code rappresenta solamente lo 0.03% dei confronti per cui i confronti non sono significativi.

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+GLONASS presenta valori medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS.

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si hanno valori medi assoluti comparabili a livello centimetrico nel confronto GPS Fixed / GPS+GLONASS Float e valori medi assoluti più bassi per la combinazione GPS+GLONASS nel confronto GPS Float / GPS+GLONASS Code (che rappresenta però solamente lo 0.03% dei confronti, quindi non significativo).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.28 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.24 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS hanno consentito di ottenere un risultato migliore rispetto a quanto è stato possibile ottenere utilizzando il solo sistema GPS.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		$\Delta N-E$ (m)		Δh_{ass} (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh_{ass} (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh_{ass} (m)		$\Delta N-E$ (m)		Δh_{ass} (m)	
		GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal
GPS+Galileo	Fixed	0.090	0.087	0.123	0.117	0.157	0.098	0.231	0.195	-	-	-	-	-	0.158	-	0.263
	Float	0.140	0.144	0.220	0.261	0.180	0.129	0.256	0.226	0.984	0.465	1.010	0.436	-	0.271	-	0.363
	Code	-	-	-	-	1.260	0.710	0.649	0.214	-	-	-	-	-	0.647	-	0.554
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.29 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+Galileo

Dalla Tabella 4.29, si osserva che per il caso GPS Fixed / GPS+Galileo Fixed (che rappresenta il 77.31% dei confronti), si hanno valori medi assoluti confrontabili a livello centimetrico sia planimetricamente che altimetricamente.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta il 2.12% dei confronti) la combinazione GPS+Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso (0.129 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.180 m).

Altimetricamente nel medesimo confronto la combinazione GPS+Galileo ha permesso di ottenere un valore medio leggermente più basso (0.226 m) rispetto al valore ottenuto con il solo sistema GPS (0.256 m).

Il confronto Code / Code non è rappresentativo in quanto non ci sono epoche in cui sia con il sistema GPS sia con la combinazione GPS+Galileo si siano ottenute soluzioni Code.

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+Galileo presenta valori medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS.

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si hanno valori medi assoluti comparabili a livello centimetrico nel confronto planimetrico GPS Fixed / GPS+Galileo Float (0.140 m

contro i 0.144 m ottenuti con la combinazione GPS+Galileo) e altimetrico (0.220 m GPS contro 0.260 m GPS+Galileo). Nel confronto GPS Float / GPS+Galileo Code (che rappresenta però solamente lo 0.06% dei confronti, quindi poco significativo) i valori medi assoluti ottenuti con la combinazione GPS+Galileo sono inferiori planimetricamente e altimetricamente a quelli ottenuti utilizzando il solo sistema GPS.

Comparando inoltre i valori del confronto GPS No data / GPS+Galileo Fixed che rappresenta il 6.00% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+Galileo pari a 0.158 m in planimetria e 0.263 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS erano più alti (Tabella 4.28) ma rappresentativi del solo 2.73% dei confronti. I valori del confronto GPS No data / GPS+Galileo Float che rappresenta il solo 0.71% dei confronti quindi poco rappresentativo.

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.29 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.25 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando la combinazione dei sistemi satellitari GPS+Galileo hanno consentito di ottenere risultati comparabili a quelli ottenibili con la combinazione GPS+GLONASS e migliori a quanto è stato possibile ottenere con la soluzione GPS.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal
GPS+GLO+Gal	Fixed	0.090	0.088	0.123	0.118	0.154	0.088	0.225	0.186	1.004	0.410	1.024	0.466	-	0.156	-	0.264
	Float	0.149	0.148	0.225	0.241	0.182	0.141	0.267	0.236	0.943	0.433	0.982	0.484	-	0.225	-	0.313
	Code	-	-	-	-	1.260	1.758	0.649	1.125	-	-	-	-	-	1.440	-	1.207
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.30 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo

Dalla Tabella 4.30, si osserva che per il caso GPS Fixed / GPS+GLONASS+Galileo Fixed (che rappresenta il 77.37% dei confronti), si hanno valori medi assoluti confrontabili a livello centimetrico sia planimetricamente che altimetricamente.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta il 2.54% dei confronti) la combinazione GPS+GLONASS+Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio leggermente più basso (0.141 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.182 m).

Altimetricamente, nel medesimo confronto la combinazione di tre sistemi satellitari, ha permesso di ottenere un valore medio confrontabile (0.236 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema GPS (0.267 m).

Il confronto Code / Code non è rappresentativo in quanto non ci sono epoche in cui sia con il sistema GPS sia con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo si siano ottenute soluzioni Code.

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+GLONASS+Galileo presenta valori medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS, analogamente a quanto visto nei confronti con la combinazione GPS+Galileo analizzata in precedenza.

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si hanno valori medi assoluti comparabili a livello centimetrico nel confronto planimetrico GPS Fixed / GPS+GLONASS+Galileo Float (0.149 m contro i 0.148 m ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo) e in altimetria (0.225 m GPS contro 0.240 m GPS+GLONASS+Galileo). Nel confronto GPS Float / GPS+GLONASS+Galileo Code (che rappresenta però solamente lo 0.06% dei confronti, quindi poco significativo) i valori medi assoluti ottenuti con il solo sistema GPS sono inferiori planimetricamente e altimetricamente a quelli ottenuti utilizzando la combinazione GPS+GLONASS+Galileo.

Comparando inoltre i valori del confronto GPS No data / GPS+GLONASS+Galileo Fixed che rappresenta ben il 5.71% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+GLONASS+Galileo pari a 0.156 m in planimetria e 0.264 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS erano leggermente più elevati (Tabella 4.28) ma rappresentativi del solo 2.73% dei confronti, mentre i risultati ottenuti con la combinazione GPS+Galileo risultano comparabili a livello centimetrico (Tabella 4.29), e con una rappresentatività simile (6.00%).

I valori del confronto GPS No data / GPS+GLONASS+Galileo Float rappresenta solamente lo 0.93% dei confronti per cui poco rappresentativi.

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.30 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.26 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS+Galileo hanno consentito di ottenere risultati comparabili a quelli ottenibili con la combinazione GPS+GLONASS e con la soluzione GPS+Galileo. I valori Fixed ottenuti quando il solo sistema GPS non ha dato nessun valore, risultano essere comparabili a quelli ottenuti nel confronto GPS No data / GPS+Galileo Fixed (con percentuali di rappresentatività del caso simili).

Le differenze con le altre soluzioni (il sistema GPS e le altre combinazioni già viste GPS+GLONASS, GPS+Galileo) sono meno marcate rispetto a quanto osservato in ambito urbano, presentando apprezzabili differenze solo nei casi in cui hanno difficoltà ad ottenere delle soluzioni (confronti GPS Float, Code, No data).

PDOP E N° DI SATELLITI TRAIETTORIE SEPTENTRIO IN AMBITO EXTRAURBANO

Dalla Figura 4.65 alla Figura 4.69 sono riportati i grafici relativi al PDOP e al numero di satelliti e le relative statistiche dei dati elaborati per tutte le costellazioni utilizzate.

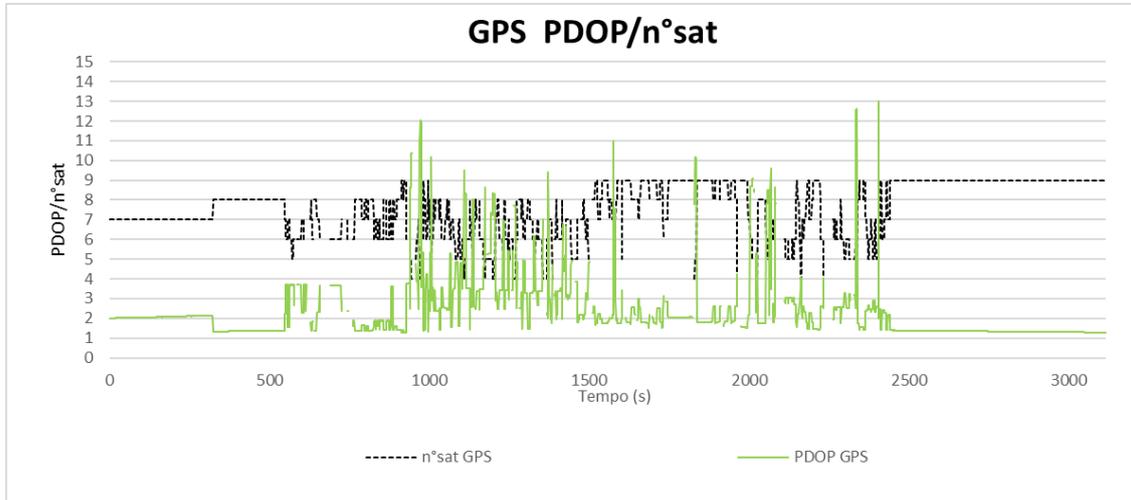


Figura 4.65 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS – Ambito extraurbano

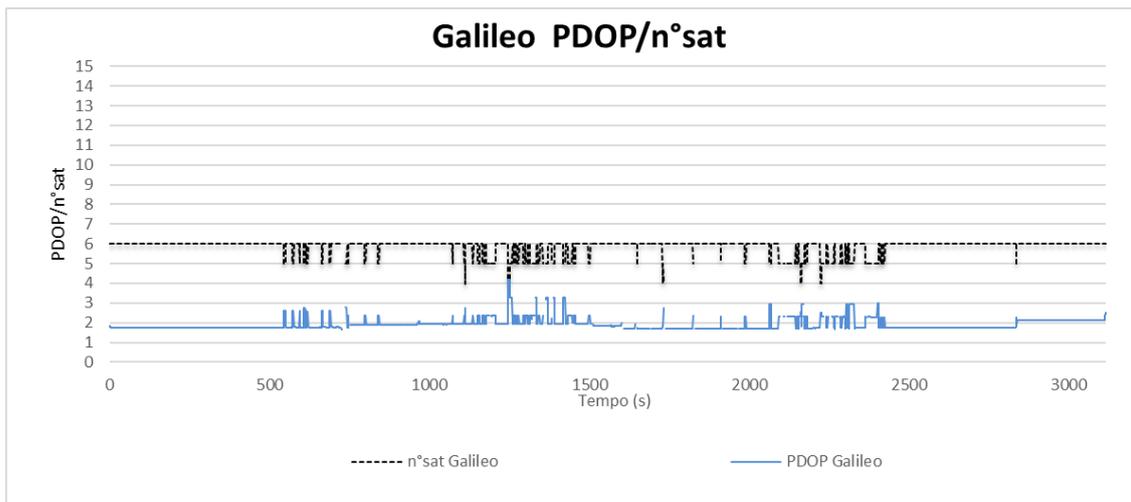


Figura 4.66 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati Galileo – Ambito extraurbano

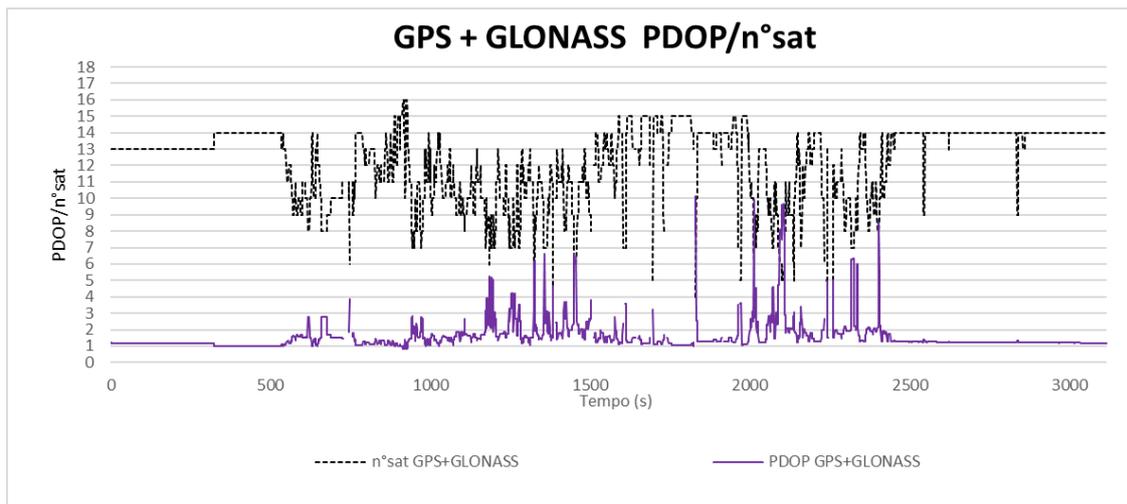


Figura 4.67 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Settentrrio per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano

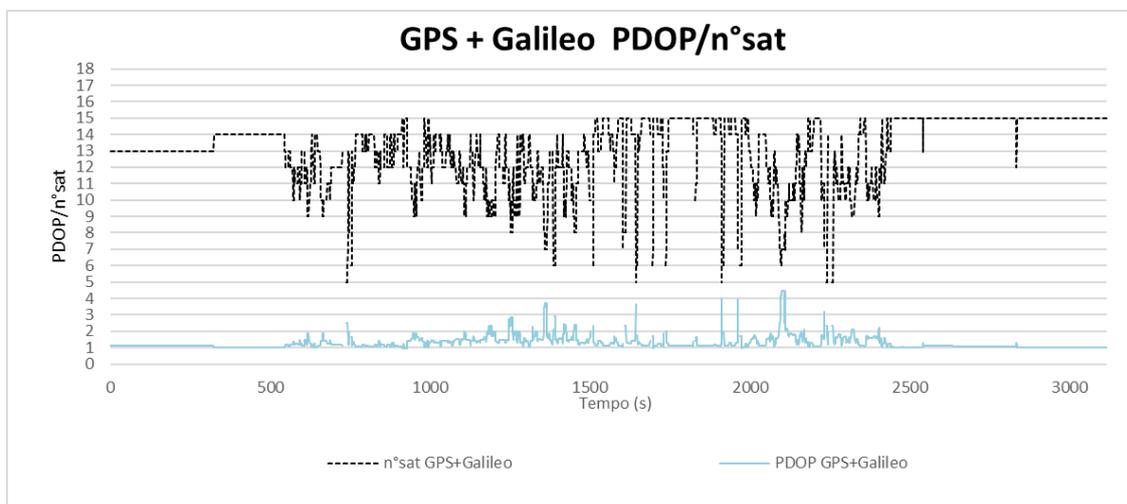


Figura 4.68 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Settentrrio per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano

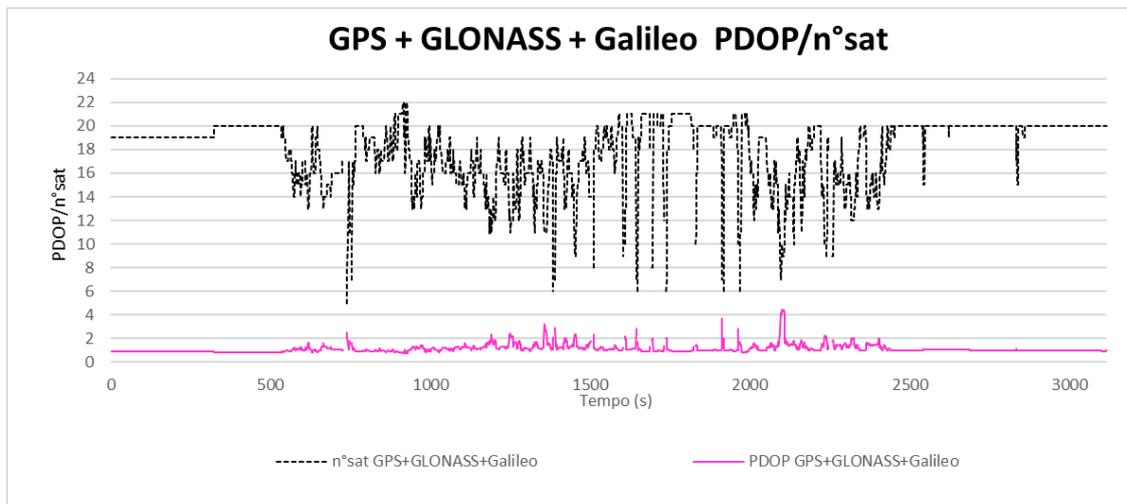


Figura 4.69 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Settentrrio per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

STATISTICHE PDOP E N° DI SATELLITI RICEVITORE SEPTENTRIO IN AMBITO EXTRAURBANO

	GPS L1 L2		Galileo E1 E5b		GPS L1 L2 GLO G1 G2		GPS L1 L2 Galileo E1 E5b		GPS GLONASS Galileo	
	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP
MAX	9	13.00	6	4	16	10	15	4	22	4
MIN	4	1.27	4	2	4	1	5	1	5	1
MEDIA	7.59	2.33	5.87	1.91	12.26	1.55	13.12	1.28	17.98	1.12
epoche	2829	2829	2977	2977	3003	3003	3039	3039	3039	3039

Tabella 4.31 Statistiche relative al PDOP e al n° di satelliti per i dati GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

Dalla Tabella 4.31 si nota che il sistema satellitare Galileo presenta un numero medio e massimo di satelliti osservati, sensibilmente minore rispetto a quelli GPS, il PDOP medio resta invece confrontabile. Combinando i diversi GNSS come prevedibile, il numero medio di satelliti aumenta e il PDOP diminuisce.

SKYPLOT RICEVITORE SEPTENTRIO IN AMBITO EXTRAURBANO

Dalla Figura 4.70 alla Figura 4.74 sono riportati i grafici degli skyplot per tutte le costellazioni utilizzate:

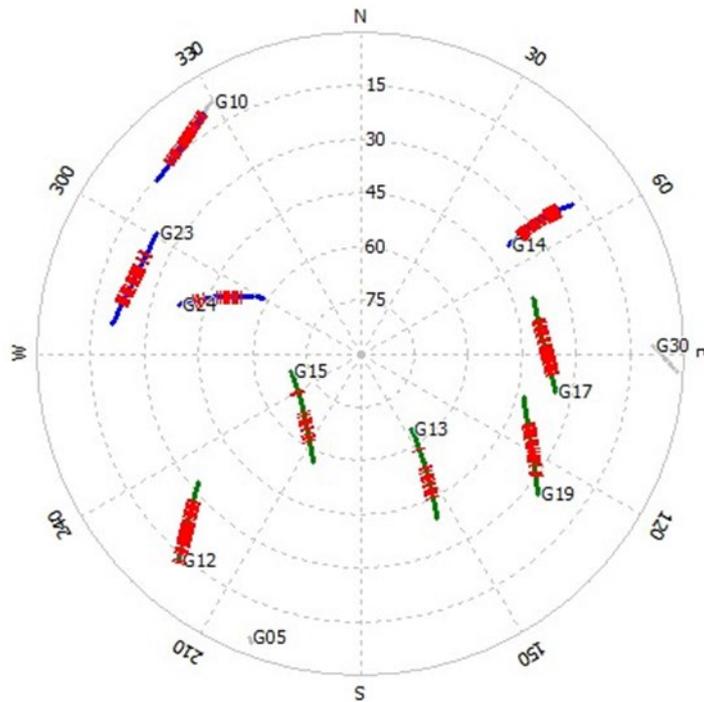


Figura 4.70 Skyplot dei satelliti GPS – Ambito extraurbano

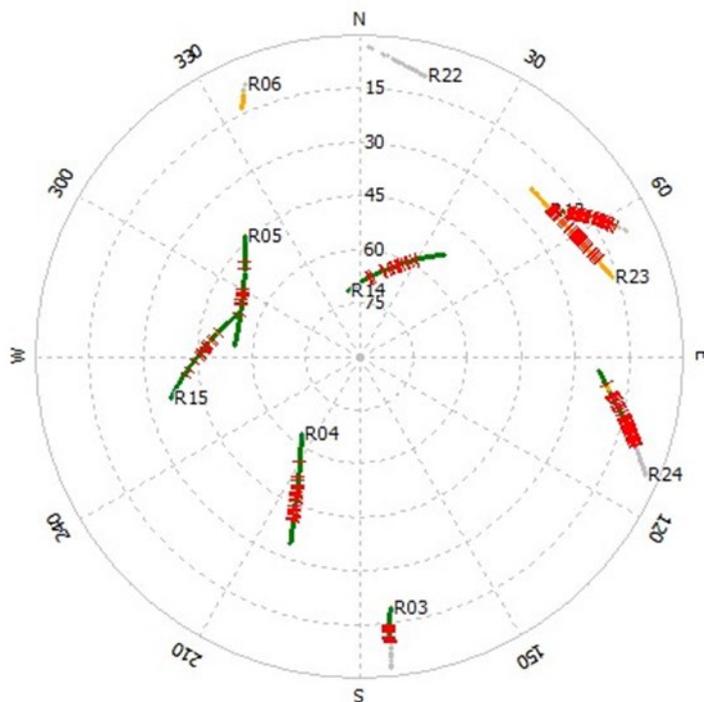


Figura 4.71 Skyplot dei satelliti GLONASS – Ambito extraurbano

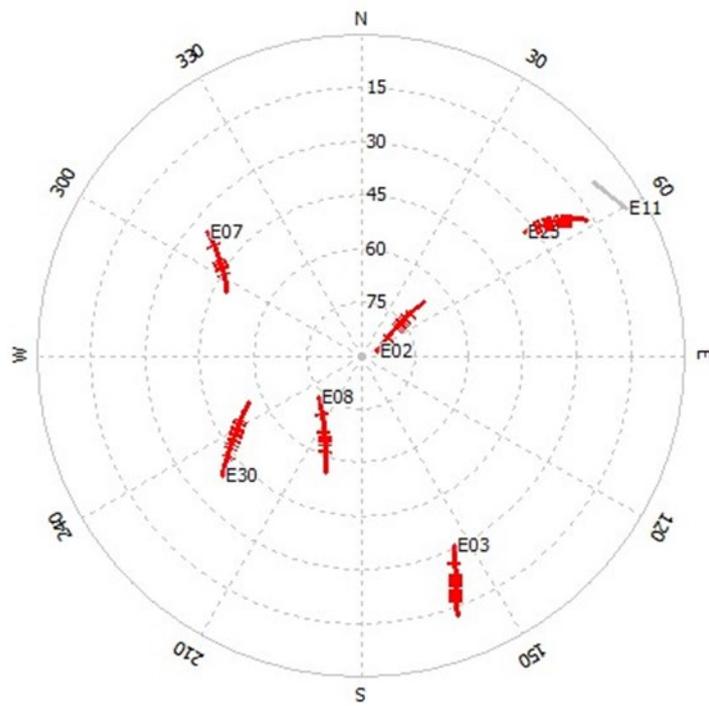


Figura 4.72 Skyplot dei satelliti Galileo – Ambito extraurbano

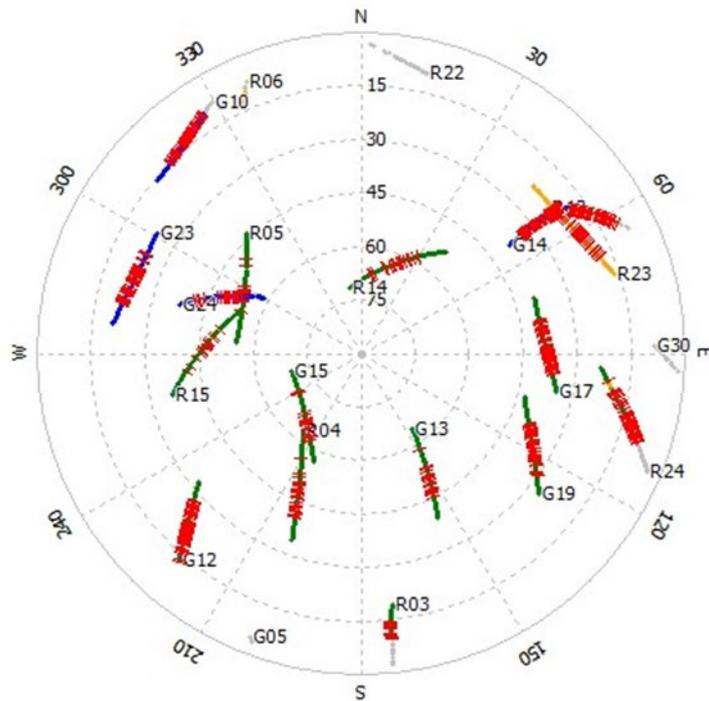


Figura 4.73 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS – Ambito extraurbano

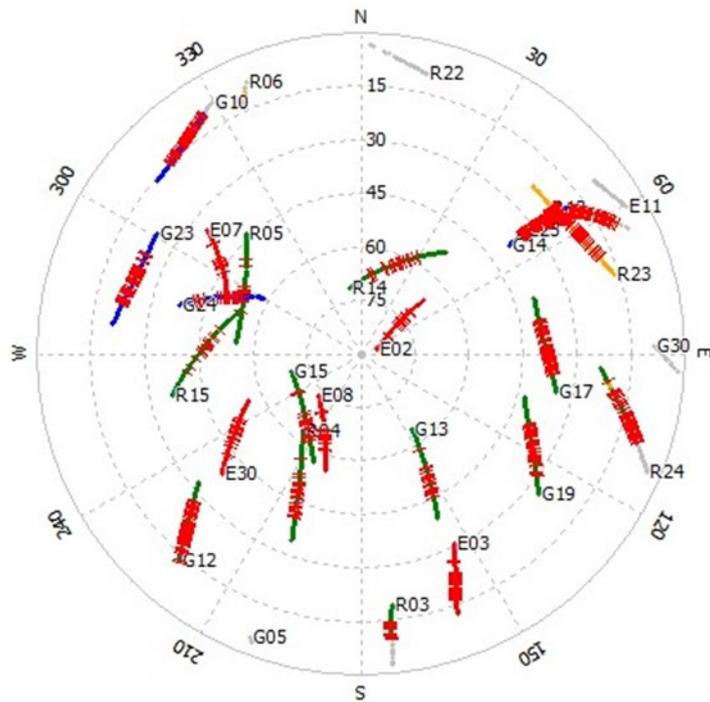


Figura 4.74 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

GRAFICI RAPPORTO SEGNALE/RUMORE E AMBIGUITÀ IN AMBITO EXTRAURBANO

Nelle figure seguenti sono presentati alcuni grafici, ottenuti utilizzando il software Novatel GrafNav v.8.90 relativi all'elaborazione dei dati extraurbani: nel grafico in Figura 4.75 è riportato il rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (per i satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s):

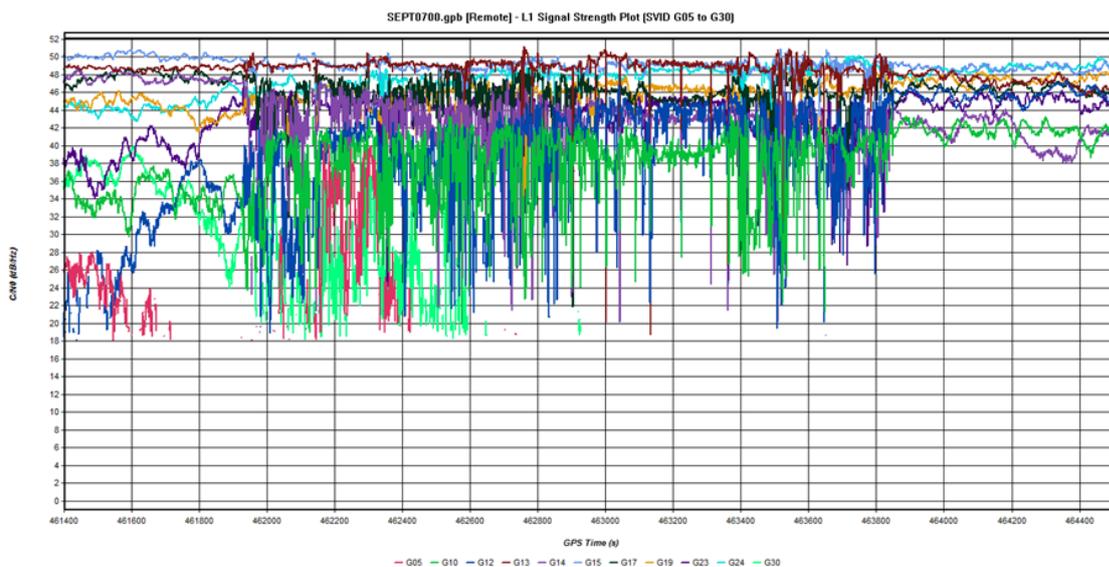


Figura 4.75 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s) – Ambito extraurbano

Nella Figura 4.76 seguente si riporta il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS L1/L2:

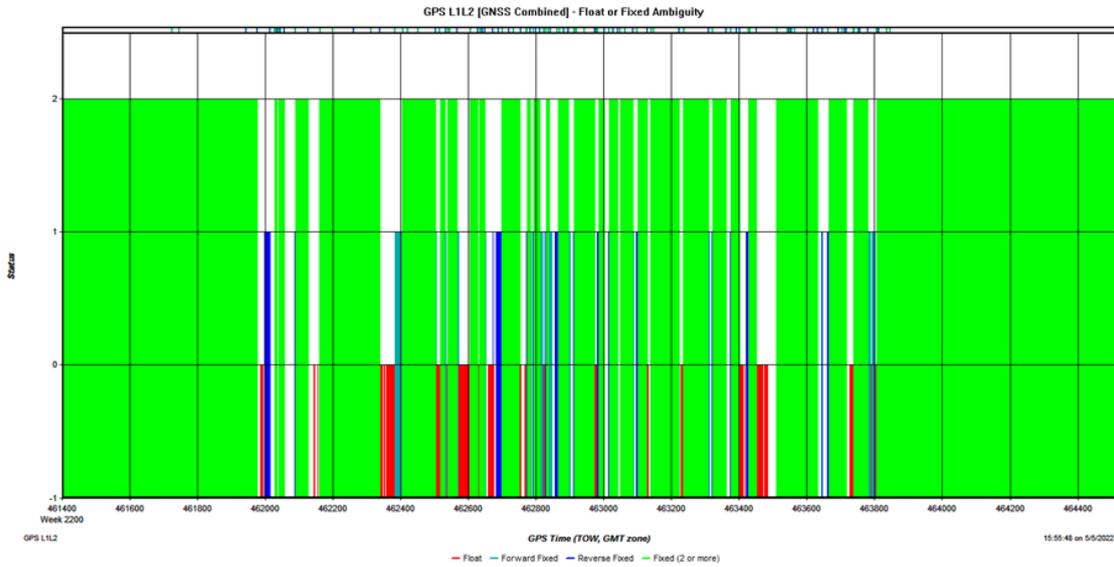


Figura 4.76 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS L1/L2 – Ambito extraurbano

Nel grafico sottostante in Figura 4.77 è riportato il rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (per i satelliti da E02 a E36) rispetto al tempo (s):

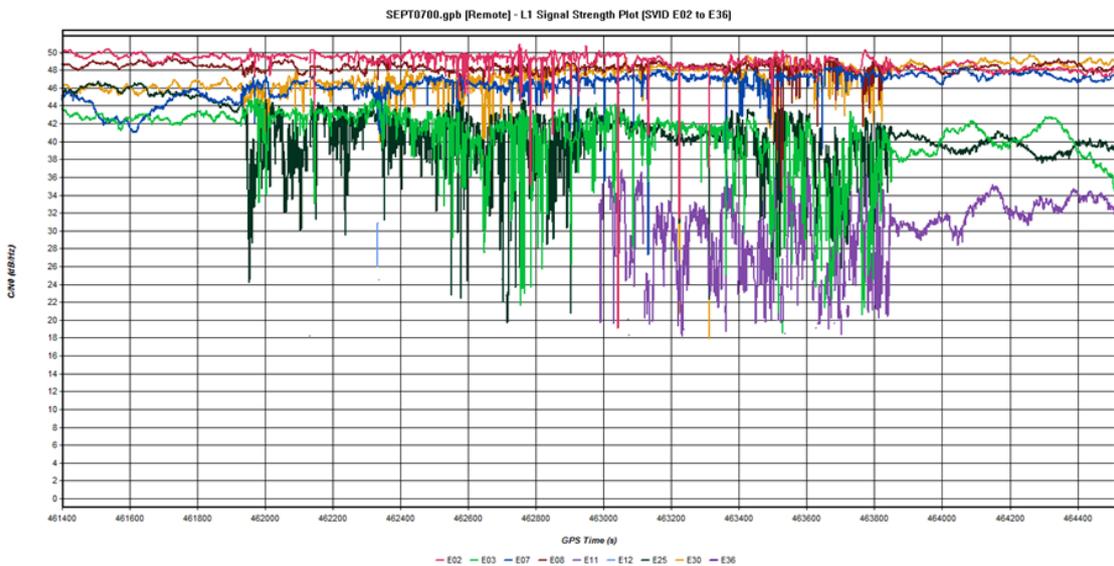


Figura 4.77 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (satelliti da E02 a E36) rispetto al tempo (s) – Ambito extraurbano

Nella Figura 4.78 seguente si riporta il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati Galileo E1/E5b:

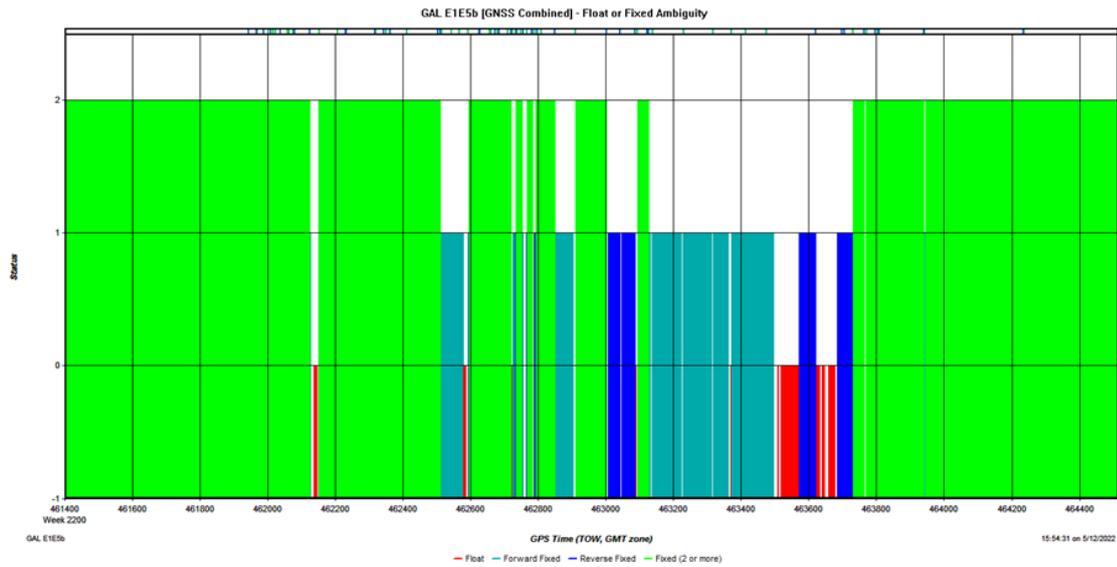


Figura 4.78 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati Galileo E1/E5b – Ambito extraurbano

Nella Figura 4.79 è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L2, E1/E5b:

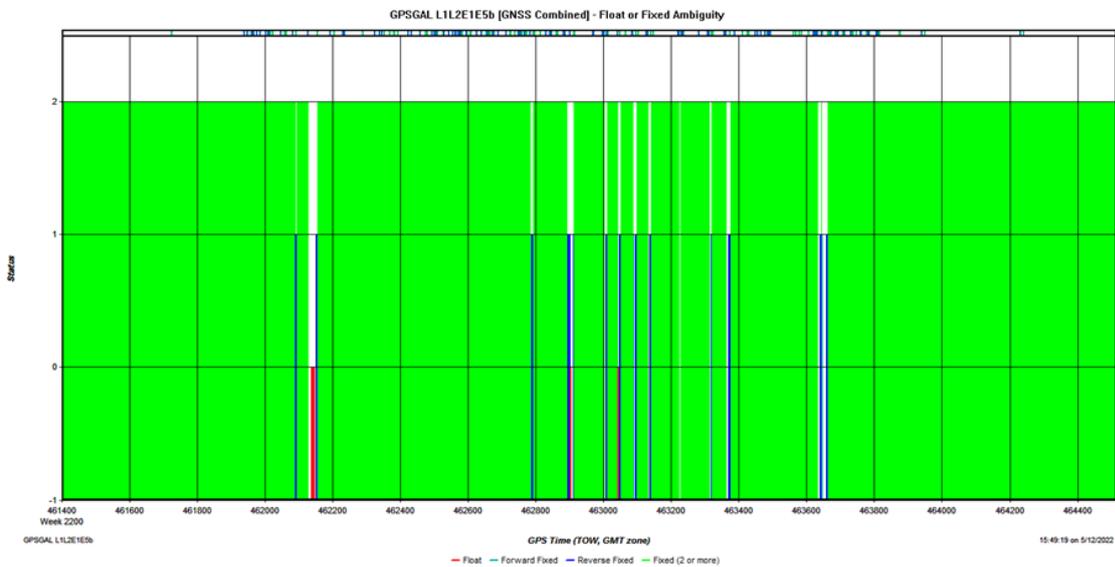


Figura 4.79 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L2, E1/E5b – Ambito extraurbano

Nella sottostante Figura 4.80 è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L2, G1/G2:

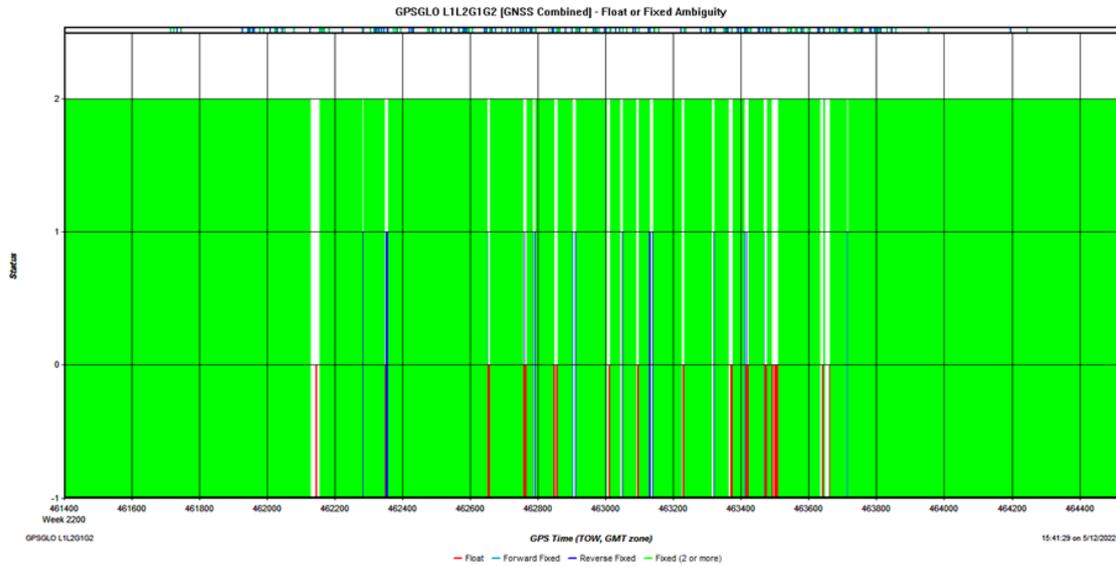


Figura 4.80 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L2, G1/G2 – Ambito extraurbano

In Figura 4.81 è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L2, G1/G2, E1/E5b:

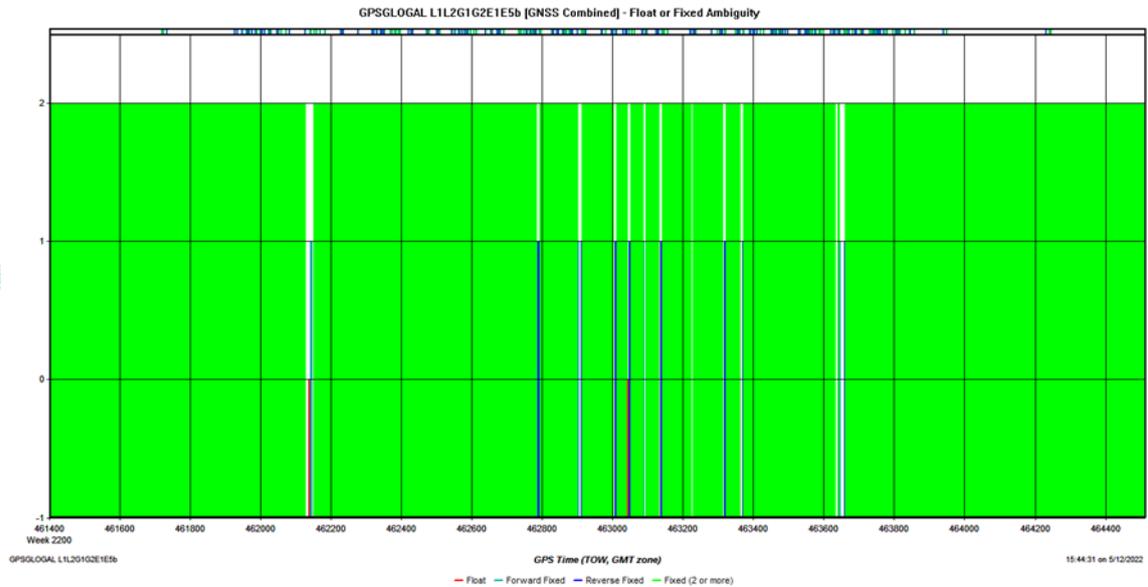


Figura 4.81 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L2, G1/G2, E1/E5b – Ambito extraurbano

PARTICOLARI DELLA TRAIETTORIA OTTENUTA IN AMBITO EXTRAURBANO

Nelle due figure seguenti, viene presentato un ingrandimento della traiettoria in ambito extraurbano sovrapposta alle ortofoto ottenute dal server WMS della Regione Friuli Venezia Giulia, in cui sono evidenziate la traiettoria GPS (in rosso) e Galileo (in blu) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde).

In queste due figure, si può notare il passaggio MMS sotto due ponti. Si evidenzia che dopo il passaggio sotto il ponte, utilizzando la costellazione Galileo è stato possibile calcolare la soluzione dopo un numero di epoche inferiore rispetto al sistema GPS.

In Figura 4.82, prima del passaggio del ponte, le posizioni GPS sono state calcolate con le ambiguità fissate al valore intero.

L'ultima posizione calcolata prima dell'ostacolo era di tipo fixed con un PDOP di 2.61 e 8 satelliti, l'epoca successiva, un'altra posizione GPS di tipo float è stata calcolata quando il veicolo stava per passare sotto il ponte (con un PDOP di 4.23 e 4 satelliti). Undici epoche dopo, è stato possibile calcolare una posizione GPS di tipo fixed con 9 satelliti e un PDOP di 1.60.

Prima del passaggio sotto al ponte, una posizione Galileo di tipo float è stata calcolata con 6 satelliti e un valore PDOP di 1.71. Sette epoche dopo, è stato possibile calcolare una posizione float con 6 satelliti e un valore PDOP pari a 1.71.



Figura 4.82 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)

Nella sottostante Figura 4.83 viene mostrato un dettaglio delle traiettorie GPS (in rosso) e Galileo (in blu) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde) in corrispondenza del passaggio sotto un altro ponte.

Prima del passaggio del ponte le posizioni GPS sono state calcolate con ambiguità di tipo float, 8 satelliti e un PDOP di 2.16. Dieci epoche dopo il passaggio del ponte, è stato possibile calcolare una posizione GPS di tipo fixed con 9 satelliti e un PDOP di 2.08.

Prima del passaggio del ponte, una posizione Galileo di tipo float è stata calcolata con 6 satelliti e un valore PDOP di 1.70. 6 epoche dopo, è stata calcolata una posizione fixed con 6 satelliti e un valore PDOP pari a 1.70.



Figura 4.83 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)

4.2.2.3.3. Risultati dell'elaborazione dei dati dello smartphone – Rilievo urbano

Dalla Figura 4.84 alla Figura 4.93 sono state tracciate le differenze planimetriche (ΔN , ΔE) e altimetriche (Δh) in (m) tra le traiettorie dello smartphone Xiaomi Mi 8 e quelle MMS, rispetto al tempo (s) per tutti i dati che son stati processati (GPS L1 L5, Galileo E1 E5a, GPS+GLONASS L1 L5 G1, GPS+GLONASS+Galileo L1 L5 G1 E1 E5a):

GPS L1 L5 - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

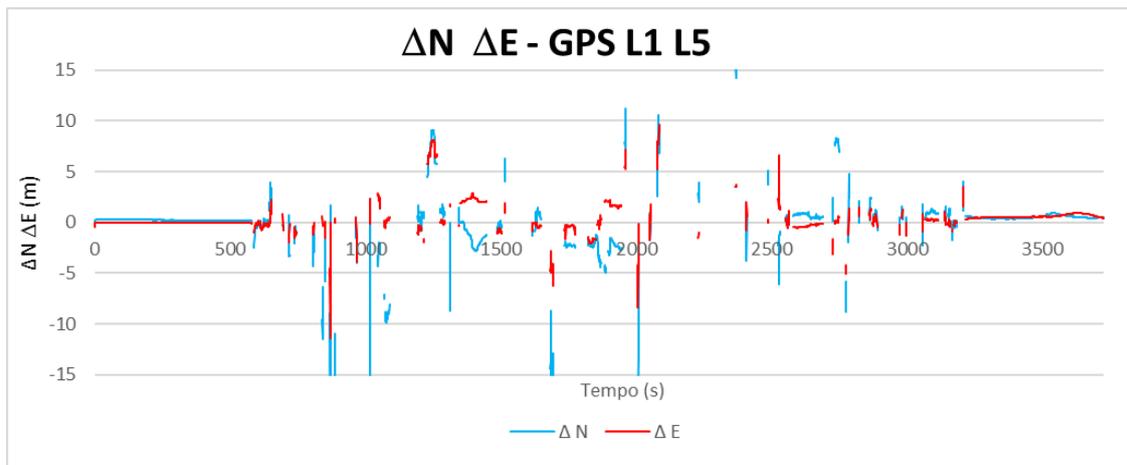


Figura 4.84 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS – Ambito urbano

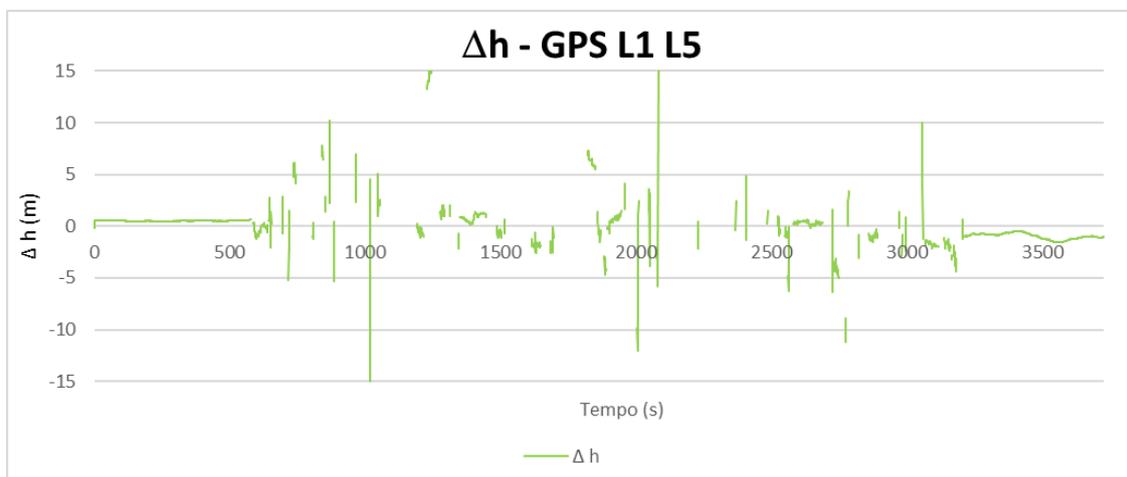


Figura 4.85 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS – Ambito urbano

Galileo E1 E5a - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

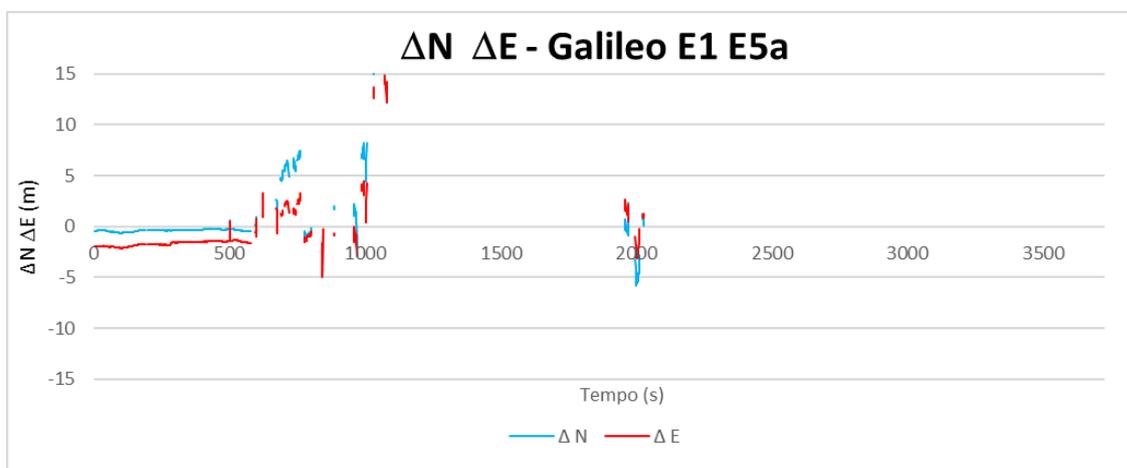


Figura 4.86 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano

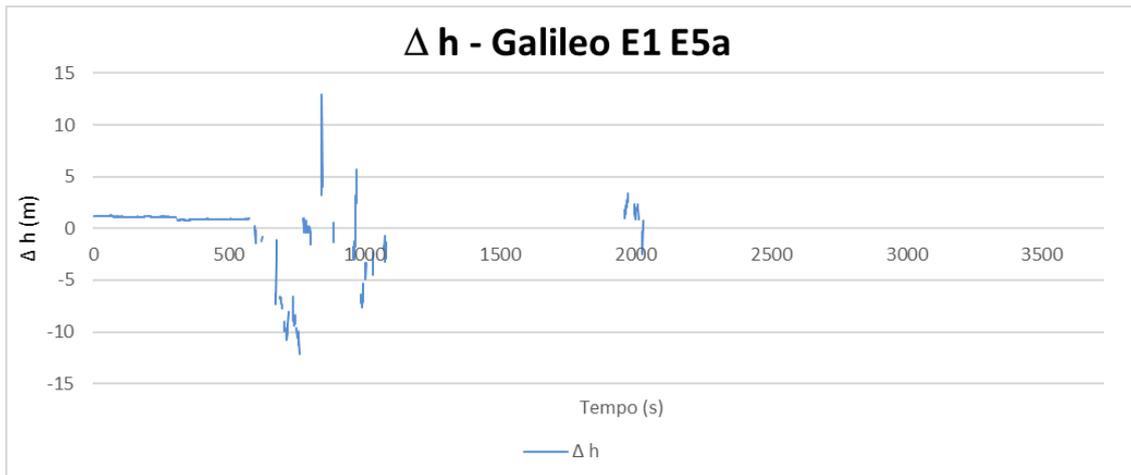


Figura 4.87 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano

GPS+GLONASS L1 L5, G1 - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

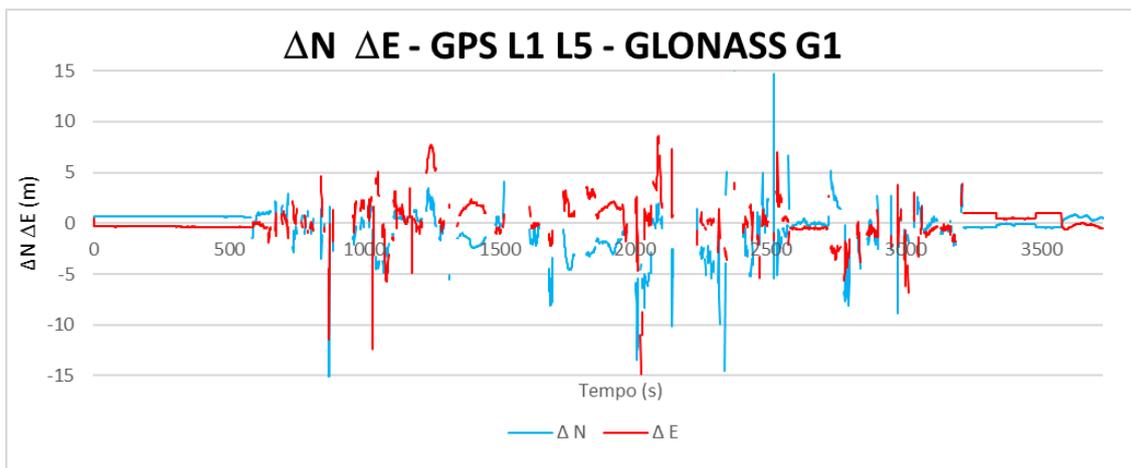


Figura 4.88 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano

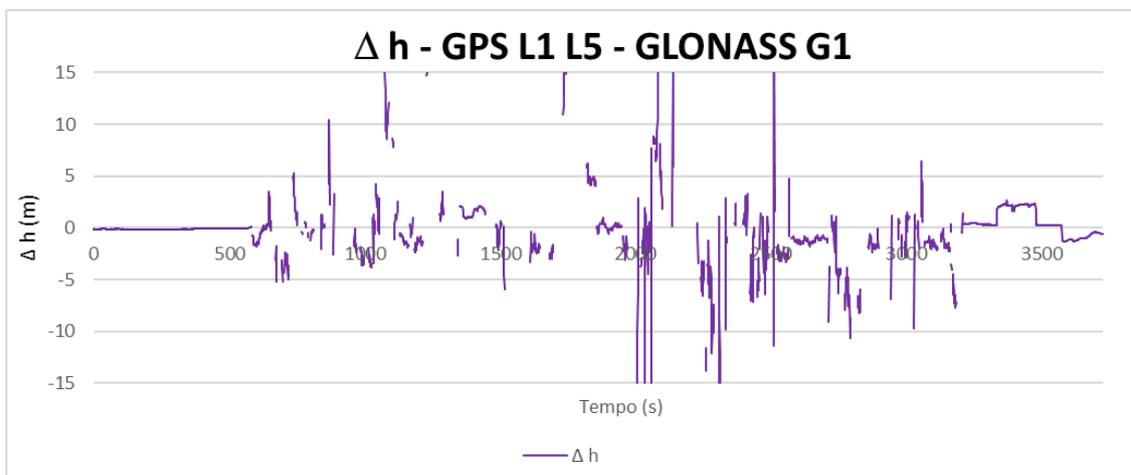


Figura 4.89 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano

GPS+Galileo L1 L5, E1 E5a - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

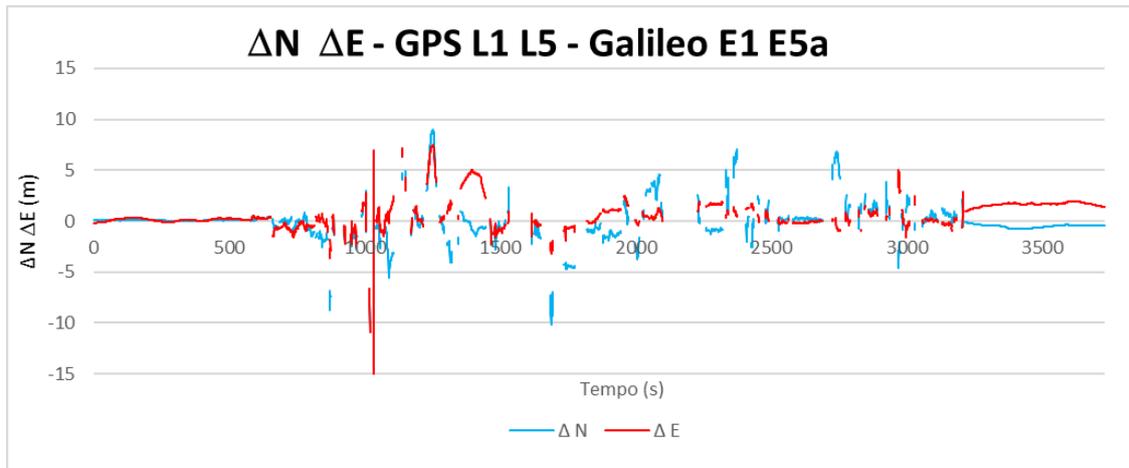


Figura 4.90 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano

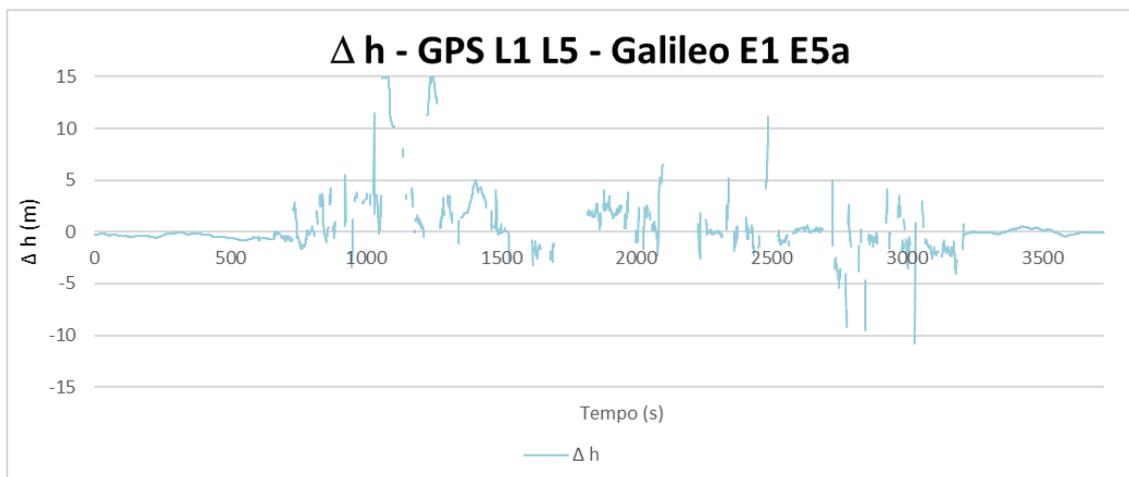


Figura 4.91 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+Galileo Ambito urbano

GPS+GLONASS+Galileo L1 L5, G1, E1 E5a - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

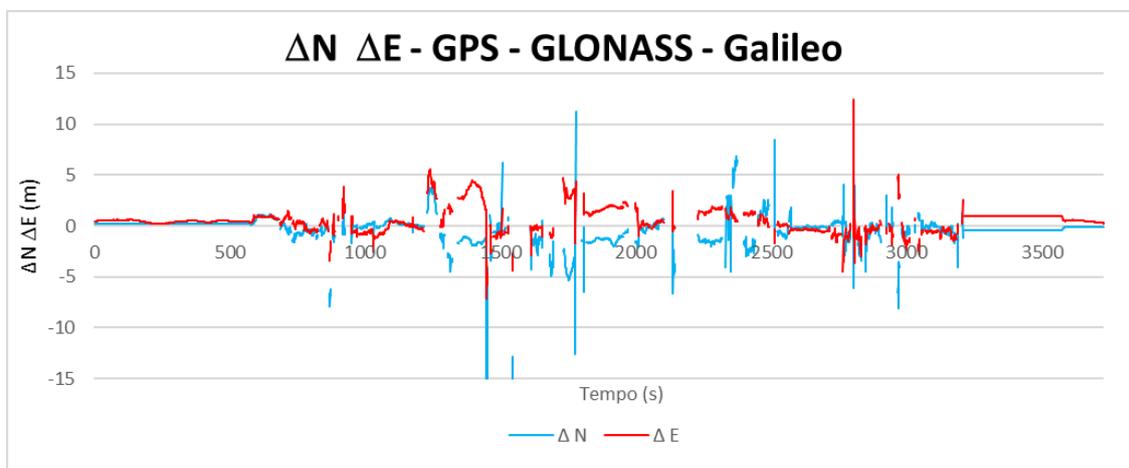


Figura 4.92 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

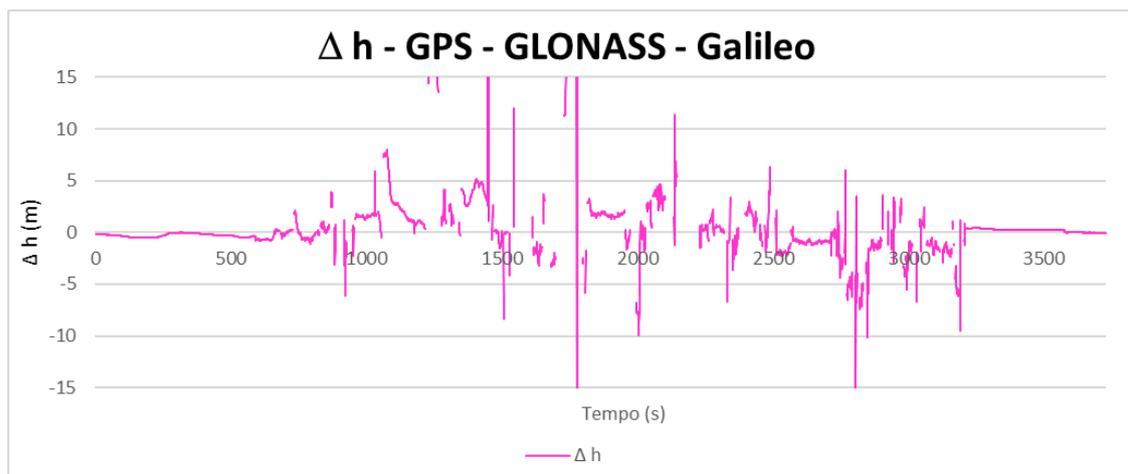


Figura 4.93 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

STATISTICHE ELABORAZIONE TRAIETTORIE SMARTPHONE IN AMBITO URBANO

	ΔE (m)				
	GPS L1 L5	Gal E1 E5a	GPS L1 L5 GLO G1	GPS L1 L5 Gal E1 E5a	GPS GLO Gal
MAX ass	25.370	18.975	17.446	21.041	12.457
MIN ass	0.000	0.004	0.001	0.000	0.001
MEDIA	0.798	1.901	1.086	1.004	0.919
DEV STD	1.487	1.688	1.494	1.349	0.926
Epoche	1950	742	2463	2549	2935
Precisione del 95%	2.486	2.798	3.677	3.578	2.971

Tabella 4.32 Differenze planimetriche ΔE (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

	ΔN (m)				
	GPS L1 L5	Gal E1 E5a	GPS L1 L5 GLO G1	GPS L1 L5 Gal E1 E5a	GPS GLO Gal
MAX ass	31.832	24.080	31.708	19.545	19.124
MIN ass	0.000	0.054	0.000	0.000	0.000
MEDIA	1.338	1.371	1.263	0.993	0.830
DEV STD	2.581	3.000	1.820	1.634	1.302
Epoche	1950	742	2463	2549	2935
Precisione del 95%	6.947	6.457	4.421	4.444	3.044

Tabella 4.33 Differenze planimetriche ΔN (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

Si evidenzia che per calcolo delle medie, delle deviazioni standard e 95° percentile sono stati utilizzati i valori assoluti delle differenze Est Nord e Quota rispetto alla traiettoria di riferimento.

Osservando i valori in Tabella 4.32 si osserva innanzitutto come utilizzando il solo sistema satellitare Galileo sia stato possibile ottenere un numero di epoche (742) sensibilmente minore rispetto a quanto sia stato possibile ottenere con il sistema GPS (1950). Inoltre si nota come con la combinazione GPS+Galileo si siano ottenute più epoche con una soluzione (2549) rispetto a quelle ottenute con la combinazione GPS+GLONASS (2463) e che la combinazione di tutti i sistemi abbia portato ad ottenere 2935 epoche con una soluzione. Sia nel caso delle ΔE che delle ΔN medie si osservano valori più alti per le soluzioni ottenute con il sistema satellitare Galileo, rispetto alle soluzioni ottenute con il sistema GPS e le altre combinazioni.

La deviazione standard dei valori ΔE Galileo (1.688 m) risulta essere maggiore di quella GPS (1.487 m) e di quelle ottenute con la combinazione dei vari sistemi GNSS.

La deviazione standard dei valori ΔN Galileo (3.000 m) risulta essere maggiore di quella GPS (2.581 m) e di tutte le altre.

Il 95° percentile relativo al valore medio assoluto ΔE ottenuto con il sistema satellitare Galileo (2.798 m) risulta essere maggiore di quello ottenuto con il sistema GPS (2.486 m) ma minore di quelli ottenuti con tutte le altre combinazioni.

Il 95° percentile relativo al valore medio assoluto ΔN ottenuto con il sistema satellitare Galileo (6.457 m) risulta essere minore di quello ottenuto con il sistema GPS (6.947 m) ma maggiore di quelli ottenuti con tutte le altre combinazioni.

La combinazione GPS+Galileo presenta un numero maggiore di epoche con una soluzione, valori medi dei valori assoluti ΔE e ΔN e i relativi 95° percentili confrontabili a livello decimetrico con quelli della combinazione GPS+GLONASS.

Alla luce di queste considerazioni si può evincere che per questa campagna di misura in ambito urbano, dal punto di vista planimetrico, il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere meno soluzioni, con valori più elevati e con una dispersione maggiore di quelli ottenuti con il solo sistema satellitare GPS.

Combinando il sistema satellitare GPS con quello Galileo si sono ottenuti valori planimetrici confrontabili a livello decimetrico e con una dispersione simile a quelli della soluzione GPS+GLONASS.

	Δh (m)				
	GPS L1 L5	Gal E1 E5a	GPS L1 L5 GLO G1	GPS L1 L5 Gal E1 E5a	GPS GLO Gal
MAX ass	25.269	19.639	32.278	23.929	51.357
MIN ass	0.005	0.002	0.001	0.001	0.000
MEDIA	2.045	1.754	2.248	1.721	1.759
DEV STD	4.246	2.316	4.039	3.715	3.509
Epoche	1950	742	2463	2549	2935
Precisione del 95%	14.096	8.125	10.831	9.400	6.387

Tabella 4.34 Differenze altimetriche Δh (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

Nel caso delle Δh medie in Tabella 4.34 si osserva un valore medio assoluto per le soluzioni ottenute con il sistema satellitare Galileo (1.754 m), più basso rispetto a quello ottenuto con il sistema GPS (2.045m), la combinazione GPS+GLONASS (2.248 m) confrontabile con quella GPS+GLONASS+Galileo (1.759 m) e più alto di quello GPS+Galileo (1.721 m).

La deviazione standard dei valori Δh Galileo (2.316 m) risulta essere minore di quella GPS (4.246 m) e di quelle ottenute con la combinazione dei vari sistemi GNSS.

Il 95° percentile relativo al valore medio dei valori assoluti Δh ottenuto con il sistema satellitare Galileo risulta essere minore rispetto a quelli ottenuti con il sistema GPS e le combinazioni GPS+GLONASS e GPS+Galileo.

La combinazione GPS+Galileo presenta un numero maggiore di epoche con una soluzione, valore medio dei valori assoluti Δh e il relativo 95° percentile minori di quelli ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS.

Alla luce di queste considerazioni si può evincere che per questa campagna di misura in ambito urbano, dal punto di vista altimetrico, il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere valori minori di quelli ottenuti dal solo sistema satellitare GPS e con una dispersione minore di quelli ottenuti con quest'ultimo, ma su un campione di meno epoche. Combinando il sistema satellitare GPS con quello Galileo si sono ottenuti valori planimetrici pienamente confrontabili se non migliori di quelli ottenuti con la soluzione GPS+GLONASS.

Analogamente a quanto visto per il rilievo in ambito urbano utilizzando il ricevitore Septentrio, oltre alle statistiche sopra esposte, sono state calcolate le percentuali di soluzioni di tipo Fixed, Float, Code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni. I risultati sono riportati in Tabella 4.35.

	GPS L1 L5	Gal E1 E5a	GPS L1 L5 GLO G1	GPS L1 L5 Gal E1 E5a	GPS GLO Gal
%Fixed	15.08	0.00	17.41	0.00	2.36
%Float	1.50	0.03	8.26	20.79	28.03
%Code	35.73	19.88	40.40	47.59	48.34
%No data	47.69	80.10	33.93	31.63	21.27

Tabella 4.35 Percentuali di soluzioni di tipo fixed, float, code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni

Dalla Tabella 4.35, si può osservare che il valore delle percentuali Fixed per le costellazioni GPS e Galileo differiscono di molto, infatti non si hanno soluzioni di tipo Fixed utilizzando la costellazione Galileo. La quasi totalità delle soluzioni Galileo sono di tipo Code e le restanti No data.

Una situazione analoga si può osservare per la combinazione GPS+Galileo che al contrario di quella GPS+GLONASS (17.41%) e GPS+GLONASS+Galileo (2.36%) non presenta soluzioni di tipo fixed.

Per quanto riguarda la percentuale di soluzioni float invece, si evidenzia una percentuale molto bassa per le soluzioni Galileo (0.03%) e GPS (1.50%). Le soluzioni multicostellazione permettono di ottenere una maggior percentuale di soluzioni float. Si evidenzia una percentuale del 20.79% per la soluzione GPS+Galileo, minore di quella ottenuta con la costellazione GPS+GLONASS+Galileo (28.03%) che aveva evidenziato anch'essa una bassa percentuale di soluzioni Fixed.

Le percentuali di soluzioni ottenute con dati di codice sono elevate e sostanzialmente confrontabili fra le varie soluzioni ottenute con singola o multi costellazione (dal 35.73% GPS al 48.38% GPS+GLONASS+Galileo) se si esclude quanto ottenuto con il sistema Galileo (19.88%).

Per quanto riguarda la percentuale di epoche per le quali non è stato possibile calcolare una soluzione, Galileo (80.10%) presenta il valore più elevato di tutte le altre soluzioni analizzate e sensibilmente più alto di quella GPS (47.69%).

La soluzione ottenuta con i dati multi-costellazione GPS+GLONASS+Galileo è quella che presenta la percentuale di epoche senza dati minore evidenziando il vantaggio dell'uso della soluzione multi-costellazione anche su device come smartphone.

In Tabella 4.36 è riportata una matrice di comparazione in cui sono evidenziate le percentuali di epoche in cui l'utilizzo del sistema GPS e Galileo generano negli stessi istanti le medesime soluzioni Fixed, Float, Code e No data, ma anche la percentuale di epoche in cui la soluzione calcolata con il sistema GPS è di tipo Fixed mentre quella Galileo è rispettivamente Float, Code e No data. Analoghe matrici di comparazione sono state

estrapolate analizzando le percentuali relative a GPS e GPS+GLONASS (Tabella 4.37), GPS e GPS+Galileo (Tabella 4.38), GPS e GPS+GLONASS+Galileo (Tabella 4.39).

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
Galileo	Fixed	0.00	0.00	0.00	0.00
	Float	0.00	0.00	0.03	0.00
	Code	14.75	0.54	1.34	3.25
	No data	0.32	0.97	34.36	44.45

Tabella 4.36 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e Galileo

La matrice in Tabella 4.36 presenta valori quasi esclusivamente nella parte inferiore alla diagonale principale. Dai valori in tabella si deduce che le elaborazioni eseguite utilizzando il sistema satellitare Galileo hanno consentito di ottenere un risultato qualitativamente inferiore rispetto alle soluzioni GPS.

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
GPS+ GLONASS	Fixed	12.88	0.13	4.40	0.00
	Float	2.20	0.40	5.47	0.19
	Code	0.00	0.97	25.86	13.57
	No data	0.00	0.00	0.00	33.93

Tabella 4.37 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS

La matrice in Tabella 4.37 presenta percentuali relative alla qualità delle soluzioni ottenute migliori per tutte le soluzioni ottenute con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS se confrontate con quelle ottenute con la sola costellazione GPS ad eccezione del confronto GPS Fixed / GPS+GLONASS Float che presenta una percentuale del 2.20% contro lo 0.13% del caso GPS+GLONASS Float / GPS Fixed.

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
GPS+ Galileo	Fixed	0.00	0.00	0.00	0.00
	Float	14.54	0.97	4.69	0.59
	Code	0.54	0.54	31.04	15.48
	No data	0.00	0.00	0.00	31.63

Tabella 4.38 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+Galileo

La matrice in Tabella 4.38 presenta percentuali relative alla qualità delle soluzioni ottenute migliori per tutte le soluzioni ottenute con la combinazione GPS+Galileo se confrontate con quelle ottenute con la costellazione GPS, ad eccezione del confronto GPS fixed /

GPS+Galileo Float che presenta una percentuale del 4.40% contro lo 0.00% del caso GPS+Galileo Fixed / GPS Float.

Il confronto fra la Tabella 4.38 e la Tabella 4.37 evidenzia che la soluzione GPS+GLONASS è migliore rispetto a quella GPS+Galileo, soprattutto a causa delle poche soluzioni Fixed e Float ottenute.

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
GPS+GLONASS+Galileo	Fixed	0.00	0.03	2.31	0.03
	Float	15.08	0.54	11.99	0.43
	Code	0.00	0.94	21.43	25.97
	No data	0.00	0.00	0.00	21.27

Tabella 4.39 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo

La matrice in Tabella 4.39 evidenzia il contributo della costellazione Galileo in alcuni confronti. Malgrado nel confronto Fixed / Fixed non si abbiano risultati al contrario di quanto osservato con la combinazione GPS+GLONASS, nei confronti GPS Code / GPS+GLONASS+Galileo Float si ottiene una percentuale del 11.99%, che è più alta rispetto a tutti i confronti effettuati con le precedenti matrici di comparazione.

Si noti che il confronto GPS+GLONASS Code / GPS No data, presentava una percentuale dello 13.57% a fronte di una percentuale del 25.97% ottenuto nell'analogo confronto utilizzando la combinazione GPS+GLONASS+Galileo.

Correlate alla tabelle sopra descritte, ne sono state redatte di analoghe con le differenze planimetriche e altimetriche medie per il confronto GPS e Galileo (Tabella 4.40), GPS e GPS+GLONASS (Tabella 4.41), GPS e GPS+Galileo (Tabella 4.42), GPS e GPS+GLONASS+Galileo (Tabella 4.43).

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal
Galileo	Fixed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Float	-	-	-	-	-	-	-	-	0.483	4.336	0.031	0.855	-	-	-	-
	Code	0.237	1.722	0.511	1.000	0.350	1.925	0.717	1.398	5.773	8.650	7.697	4.489	-	4.186	-	4.116
	No data	0.224	-	0.529	-	0.959	-	0.912	-	2.170	-	2.552	-	-	-	-	-

Tabella 4.40 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e Galileo

Dalla Tabella 4.40, si nota che l'unico confronto tra soluzioni della stessa tipologia, ottenute con il sistema GPS o con il sistema Galileo, è il confronto GPS Code / Galileo Code (che rappresenta solamente l'1.34% dei confronti), i valori medi assoluti più bassi e quindi più "vicini" planimetricamente si hanno con la soluzione GPS (5.773 m contro i 8.650 m Galileo) ed altimetricamente con la soluzione Galileo (4.489 m contro i 7.697 m GPS).

I valori riportati nella parte sottostante la diagonale della tabella, presentano valori medi assoluti sempre migliori per il sistema GPS.

Per quanto riguarda invece i valori soprastanti la diagonale della tabella (ad esclusione dei confronti GPS No data), si hanno valori medi assoluti migliori per il sistema GPS nel confronto GPS Code / Galileo Float che rappresenta però solo lo 0.03% dei confronti.

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.40 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.36 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando il sistema satellitare GPS hanno consentito di ottenere risultati più aderenti alla traiettoria di riferimento MMS rispetto alle soluzioni ottenute con il sistema Galileo.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO
GPS+GLONASS	Fixed	0.236	0.729	0.512	0.125	0.337	0.803	0.594	0.172	0.767	0.772	0.972	1.219	-	-	-	-
	Float	0.238	0.729	0.508	0.131	0.375	0.676	0.488	0.232	0.716	0.890	0.883	0.966	-	1.560	-	0.889
	Code	-	-	-	-	0.950	0.913	1.024	1.684	2.901	2.341	3.438	3.399	-	2.904	-	3.402
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.41 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS

Dalla Tabella 4.41, si osserva che per il caso GPS Fixed / GPS+GLONASS Fixed (che rappresenta il 12.88% dei confronti), si hanno valori medi assoluti più elevati planimetricamente per la combinazione GPS+GLONASS (0.729 m contro 0.236 m GPS) e altimetricamente più alti per il sistema GPS (0.512 m contro 0.125 m GPS+GLONASS).

Il confronto Float / Float rappresenta solamente lo 0.40% dei confronti, quindi è un confronto poco rappresentativo.

Il confronto Code / Code (che rappresenta ben il 25.86% dei confronti) presenta dei valori planimetrici medi più bassi per il sistema GPS+GLONASS (2.341 m contro i 2.901 m ottenuti

con il sistema GPS). Anche altimetricamente la combinazione GPS+GLONASS ha permesso di ottenere valori medi inferiori (3.399 m contro i 3.438 m GPS).

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+GLONASS presenta valori medi assoluti sempre più elevati rispetto a quelli GPS meno nel confronto altimetrico GPS Float / GPS+GLONASS Fixed che rappresenta solo il 0.13% dei confronti (0.172 m contro i 0.594 m GPS).

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si hanno percentuali di rappresentatività del campione bassi o nulli. Nel confronto GPS Fixed / GPS+GLONASS Float (che rappresenta però solamente il 2.20% dei confronti, quindi poco significativo) si hanno valori planimetrici medi assoluti più bassi per il sistema GPS (0.238 m contro 0.729 m GPS+GLONASS) mentre altimetricamente la combinazione GPS+GLONASS è migliore (0.131 m contro 0.508 m GPS+GLONASS).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.41 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.37 fornisce un quadro delle soluzioni ottenute alquanto variabile sia dal punto di vista planimetrico che altimetrico. Dal confronto GPS Code / GPS+GLONASS Code si evince tuttavia che il contributo della costellazione GLONASS nell'ottenere una soluzione è evidente.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal
GPS+Galileo	Fixed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Float	0.236	0.185	0.512	0.396	0.528	0.376	0.739	0.573	1.021	1.259	0.955	0.308	-	1.267	-	1.224
	Code	0.236	0.083	0.493	0.127	1.126	0.549	1.027	1.089	2.498	2.186	3.013	2.553	-	1.998	-	1.893
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.42 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+Galileo

Dalla Tabella 4.42, non si osservano confronti GPS Fixed / GPS+Galileo Fixed.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta solamente lo 0.97% dei confronti) la combinazione GPS+Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso (0.376 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.528 m). Altimetricamente nel medesimo confronto la combinazione GPS+Galileo ha permesso di ottenere un valore medio più basso (0.573 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema GPS (0.739 m).

Il confronto Code / Code (che rappresenta ben il 31.04% dei confronti) presenta dei valori planimetrici medi più bassi per il sistema GPS+Galileo (2.186 m contro i 2.498 m ottenuti

con il sistema GPS). Altimetricamente la combinazione GPS+Galileo ha permesso di ottenere valori medi inferiori (2.553 m contro i 3.013 m GPS).

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+Galileo presenta valori medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS, meno nel confronto planimetrico GPS Code / GPS+Galileo Float che rappresenta solo il 4.69% dei confronti (1.259 m contro i 1.021 m GPS).

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si hanno valori medi assoluti migliori per la combinazione GPS+Galileo nel confronto GPS Fixed / GPS+Galileo Float (rappresentatività 14.54%) planimetrico (0.236 m contro i 0.185 m ottenuti con la combinazione GPS+Galileo) e altimetrico (0.512 m contro 0.396 GPS+Galileo).

Nel confronto GPS Float / GPS+Galileo Code (che rappresenta però solamente lo 0.54% dei confronti, quindi poco significativo) i valori medi assoluti ottenuti con il solo sistema GPS sono superiori planimetricamente (1.126 m contro 0.549 GPS+Galileo) e inferiori altimetricamente a quelli ottenuti utilizzando la combinazione GPS+Galileo (1.027 m contro 1.089 GPS+Galileo).

Comparando inoltre i valori del confronto GPS No data / GPS+Galileo Code (che rappresenta ben il 15.48% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+Galileo pari a 1.998 m in planimetria e 1.893 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS erano maggiori (Tabella 4.41) e con analoga percentuale di rappresentatività (13.57%).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.42 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.38 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando la combinazione dei sistemi satellitari GPS+Galileo hanno consentito di ottenere risultati comparabili a quelli ottenibili con la combinazione GPS+GLONASS e migliori a quanto è stato possibile ottenere con la soluzione GPS. Tuttavia si rimarca l'assenza di soluzioni di tipo Fixed, presenti invece nelle soluzioni GPS+GLONASS.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal
GPS+GLO+Gal	Fixed	-	-	-	-	0.645	1.075	0.782	0.411	0.747	1.077	0.969	0.260	-	1.057	-	0.346
	Float	0.236	0.497	0.511	0.287	0.341	0.563	0.669	0.452	0.938	0.900	1.036	0.260	-	0.849	-	0.475
	Code	-	-	-	-	0.973	0.827	0.943	1.480	3.235	1.932	3.889	3.541	-	1.592	-	2.029
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.43 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo

Dalla Tabella 4.43, non si osservano confronti GPS Fixed / GPS+GLONASS+Galileo Fixed, analogamente a quanto visto nel confronto GPS / GPS+Galileo.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta lo 0.54% dei confronti, quindi poco rappresentativo) la combinazione GPS+GLONASS+Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più alto (0.563 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.341 m).

Altimetricamente, nel medesimo confronto la combinazione di tre sistemi satellitari, ha permesso di ottenere un valore medio più basso (0.452 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema GPS (0.669 m).

Il confronto Code / Code (che rappresenta ben il 21.43% dei confronti) presenta dei valori planimetrici medi più bassi per il sistema GPS+GLONASS+Galileo (1.932 m contro i 3.235 m ottenuti con il sistema GPS), ed anche altimetricamente (3.541 m contro i 3.889 m GPS).

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, il sistema GPS presenta valori planimetrici medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS+GLONASS+Galileo ad esclusione del confronto GPS Code /GPS+GLONASS+Galileo Float (rappresentatività 11.99%). Altimetricamente invece, i valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo presenta valori sempre minori rispetto ai valori ottenuti con il sistema GPS.

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, nel confronto planimetrico GPS Fixed / GPS+GLONASS+Galileo Float (rappresentatività 15.08%) si hanno valori planimetricamente più elevati per la combinazione di GNSS (0.497 m contro i 0.236 m ottenuti con il sistema GPS), mentre in altimetria il sistema GPS presenta valori più elevati (0.511 m contro 0.287 m GPS).

Nel confronto GPS Float / GPS+GLONASS+Galileo Code (che rappresenta però solamente lo 0.94% dei confronti, quindi poco significativo) il valore medio assoluto ottenuto con il solo sistema GPS è più elevato planimetricamente di quello ottenuto utilizzando la combinazione GPS+GLONASS+Galileo (0.973 m contro 0.827 m GPS+GLONASS+Galileo) mentre altimetricamente risulta minore (0.943 m contro 1.480 m GPS+GLONASS+Galileo). Comparando inoltre i valori del confronto GPS No data / GPS+GLONASS+Galileo Code che rappresenta ben il 25.97% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+GLONASS+Galileo pari a 1.592 m in planimetria e 2.029 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS erano maggiori (Tabella 4.41) e rappresentativi del 13.57% dei confronti, mentre i risultati ottenuti con la combinazione GPS+Galileo risultano maggiori planimetricamente e minori altimetricamente (Tabella 4.42), e con una rappresentatività simile a quella GPS+GLONASS (15.48%).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.43 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.39 fornisce un quadro delle soluzioni ottenute alquanto variabile sia dal punto di vista planimetrico che altimetrico. Dal confronto GPS Code / GPS+GLONASS+Galileo Code si evince tuttavia che il contributo della costellazione Galileo nell'ottenere una soluzione è evidente soprattutto dalle percentuali di rappresentatività (25.97% contro il 13.57% della combinazione GPS+GLONASS).

PDOP E N° DI SATELLITI ELABORAZIONE TRAIETTORIE SMARTPHONE IN AMBITO URBANO

Dalla Figura 4.94 alla Figura 4.98 sono riportati i grafici relativi al PDOP e al numero di satelliti e le relative statistiche dei dati elaborati per tutte le costellazioni utilizzate.

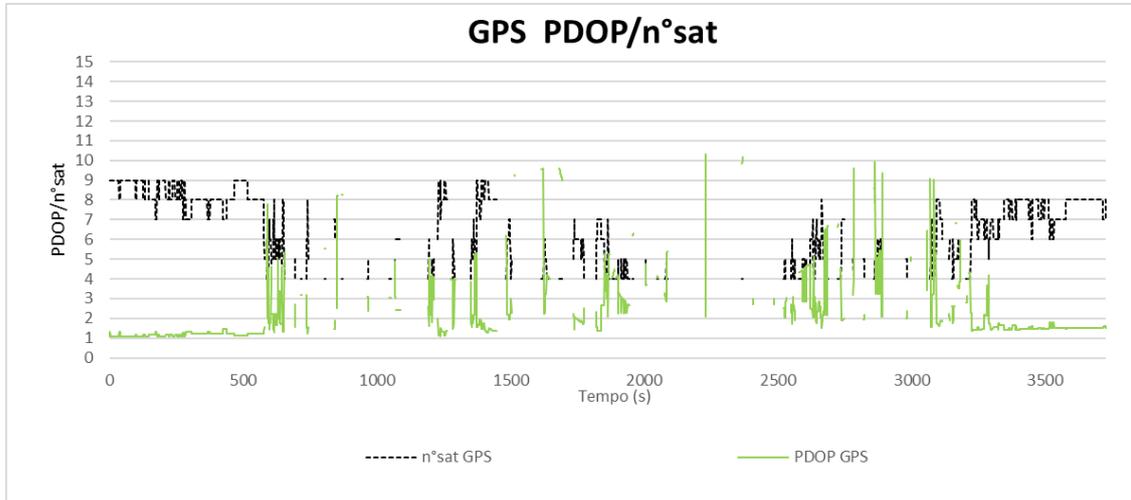


Figura 4.94 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS – Ambito urbano

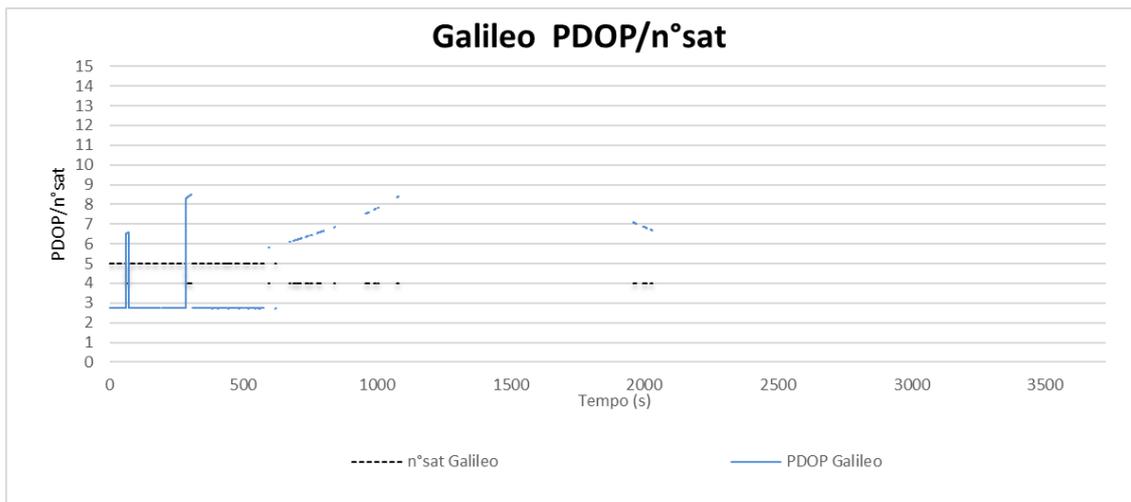


Figura 4.95 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati Galileo – Ambito urbano

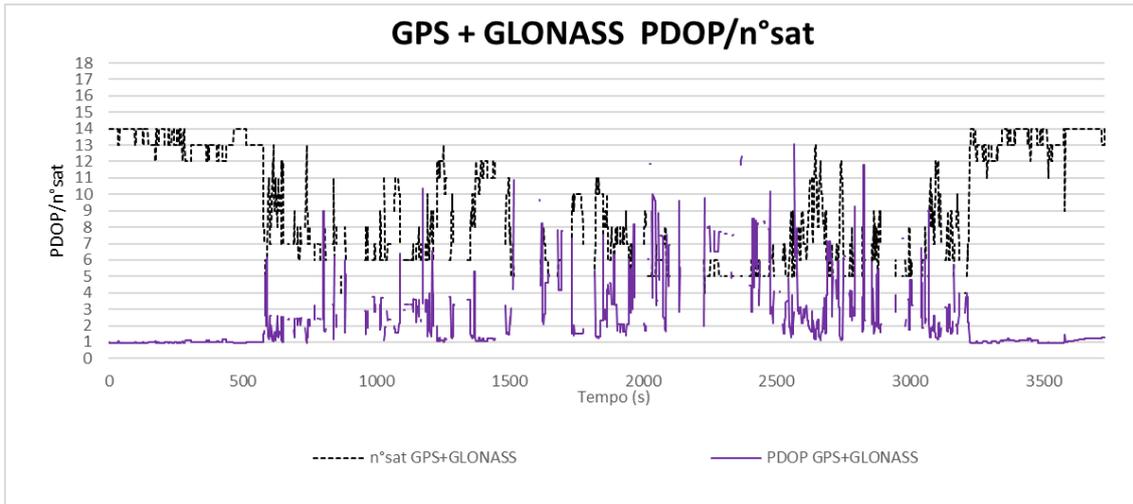


Figura 4.96 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano

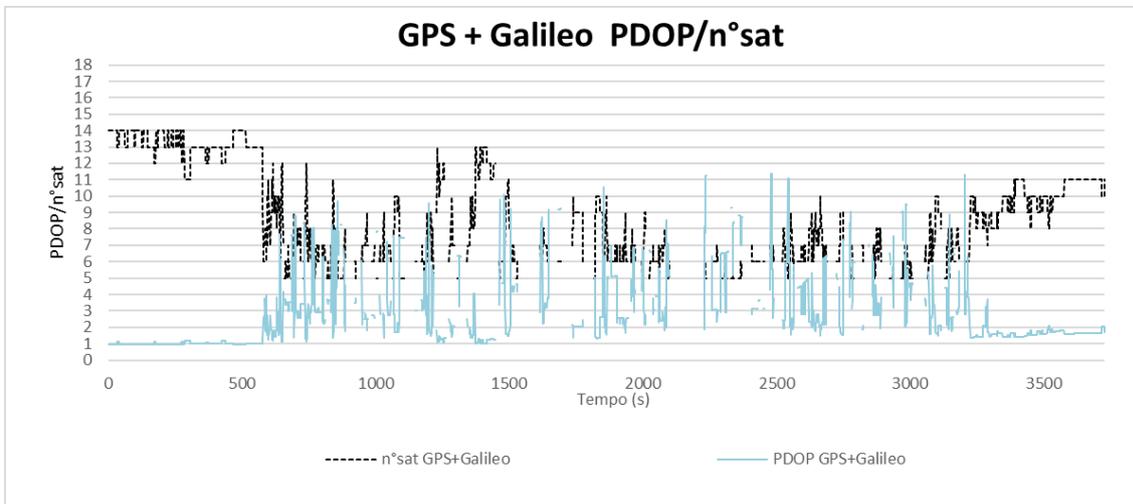


Figura 4.97 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano

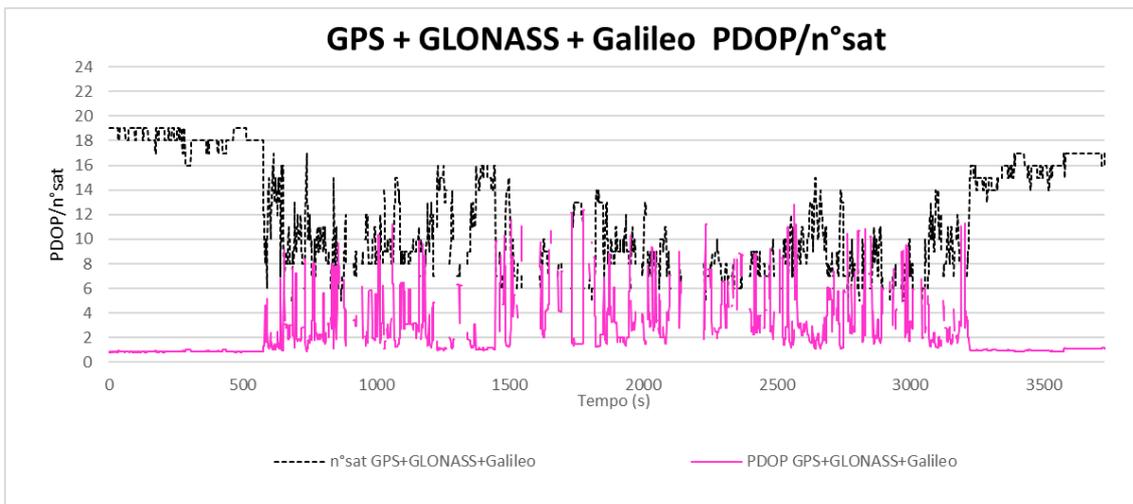


Figura 4.98 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

STATISTICHE PDOP E N° DI SATELLITI IN AMBITO URBANO - SMARTPHONE

	GPS L1 L2		Galileo E1 E5b		GPS L1 L2 GLO G1 G2		GPS L1 L2 Galileo E1 E5b		GPS GLONASS Galileo	
	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP
MAX	9	10.31	5	9	14	13	14	12	19	13
MIN	4	1.09	4	3	4	1	4	1	4	1
MEDIA	6.79	2.17	4.72	3.91	10.12	2.28	9.10	2.70	12.34	2.57
epoche	1950	1950	742	742	2463	2463	2549	2549	2935	2935

Tabella 4.44 Statistiche relative al PDOP e al n° di satelliti per i dati GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

Dalla Tabella 4.44 si nota che il sistema satellitare Galileo presenta un numero medio e massimo di satelliti osservati, sensibilmente minore rispetto a quelli GPS, e con un PDOP medio maggiore.

Il numero medio di satelliti con la combinazione GPS+Galileo è più basso (9.10) rispetto a quello GPS+GLONASS (10.12).

Combinando i diversi GNSS come prevedibile, il numero medio di satelliti aumenta e il PDOP diminuisce.

SKYPLOT SMARTPHONE IN AMBITO URBANO

Dalla Figura 4.99 alla Figura 4.103 sono riportati i grafici degli skyplot per tutte le costellazioni utilizzate:

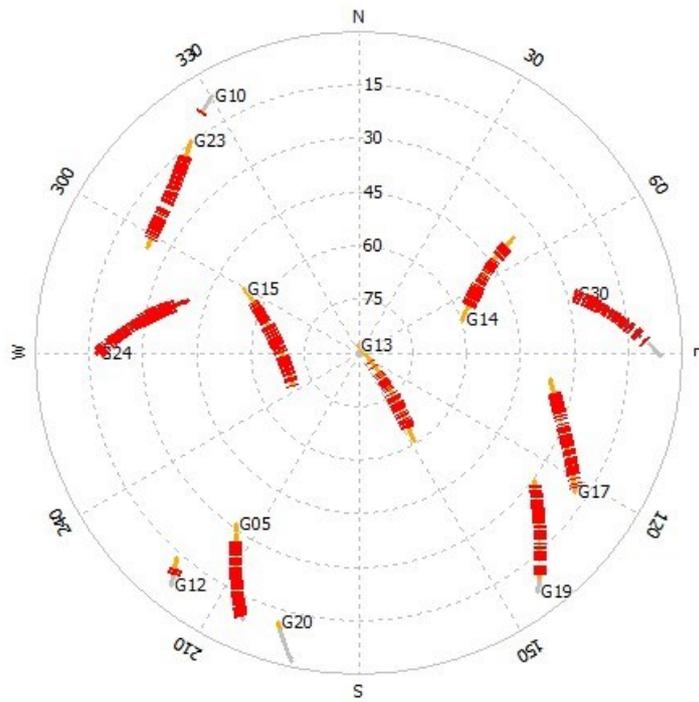


Figura 4.99 Skyplot dei satelliti GPS – Ambito urbano

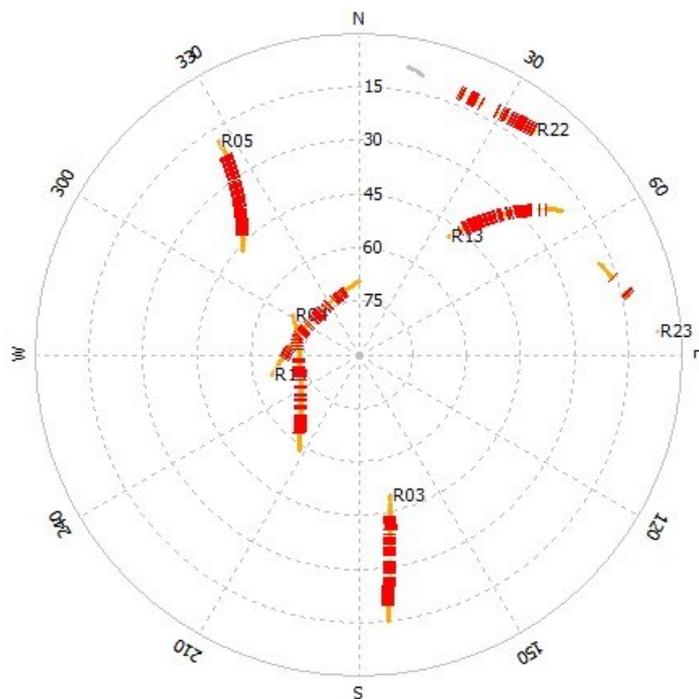


Figura 4.100 Skyplot dei satelliti GLONASS – Ambito urbano

Si noti la mancanza del satellite GLONASS R15 rispetto allo skyplot ottenuto con il ricevitore Septentrio. Non si è trovata una valida motivazione per questa mancanza nei dati dello smartphone.

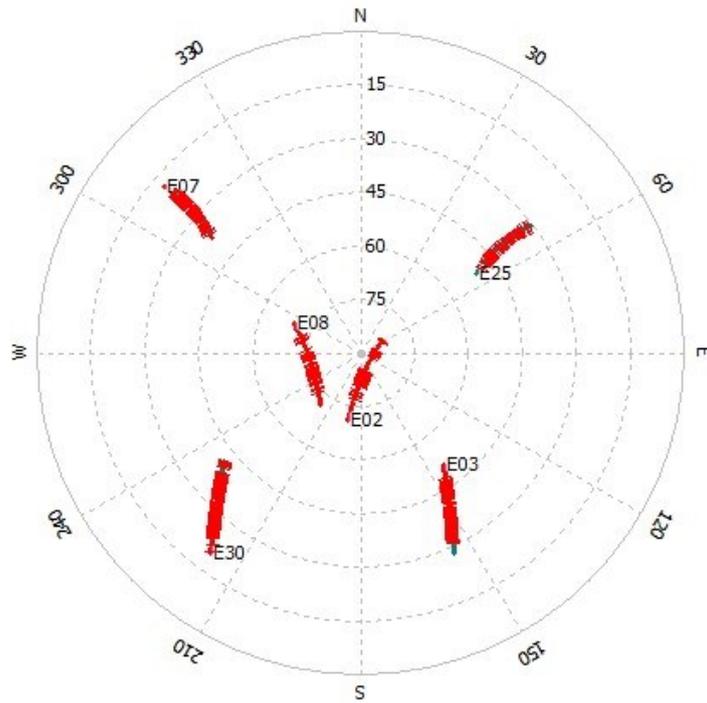


Figura 4.101 Skyplot dei satelliti Galileo – Ambito urbano

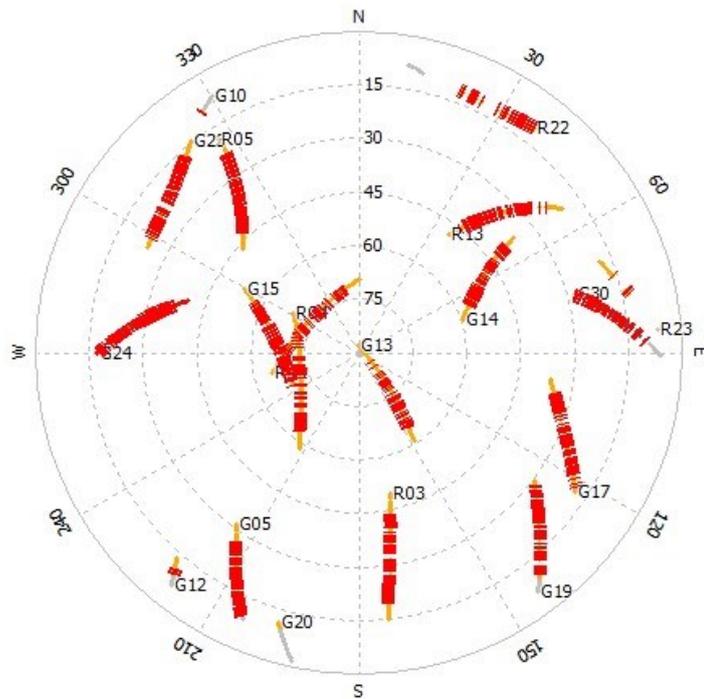


Figura 4.102 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS – Ambito urbano

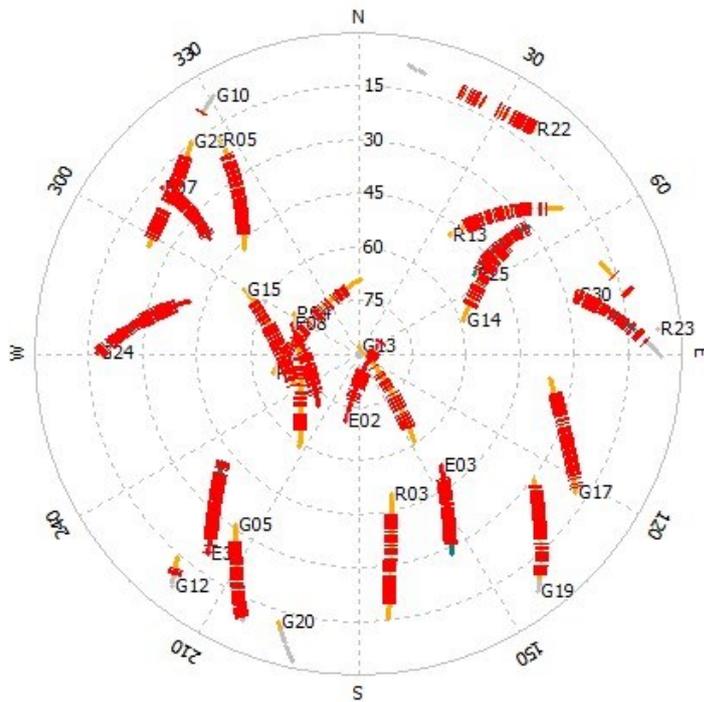


Figura 4.103 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano

GRAFICI RAPPORTO SEGNALE/RUMORE E AMBIGUITÀ IN AMBITO URBANO

Nelle figure seguenti sono presentati alcuni grafici, ottenuti utilizzando il software Novatel GrafNav v.8.90 relativi all'elaborazione dei dati urbani: nel grafico in Figura 4.104 è riportato il rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (per i satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s):

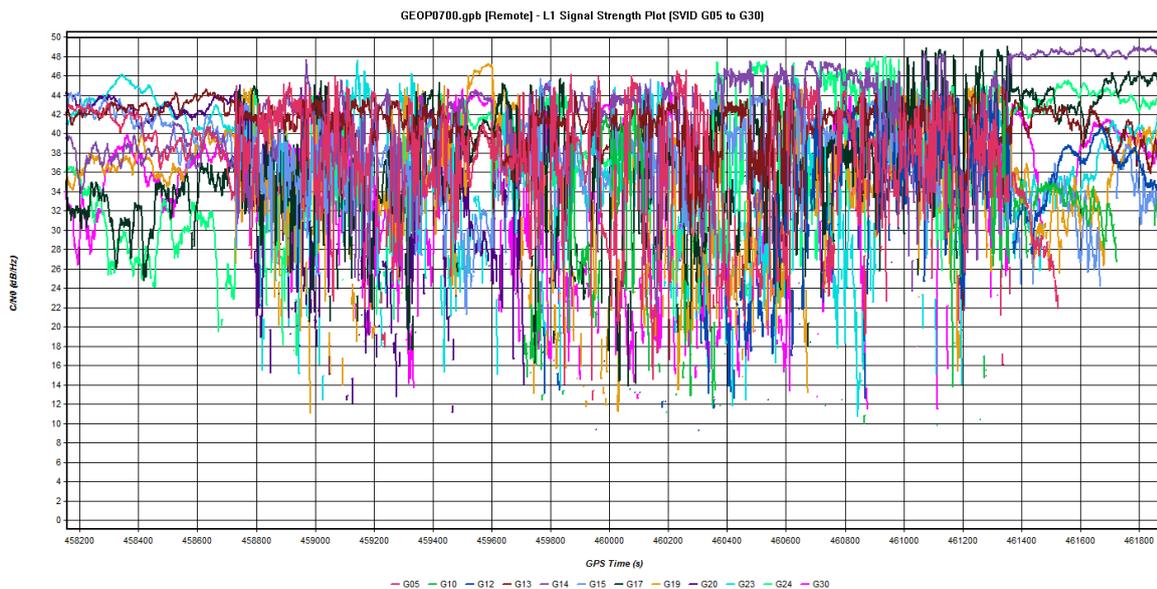


Figura 4.104 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s) – Ambito urbano

Nella Figura 4.105 si riporta il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS L1/L5:

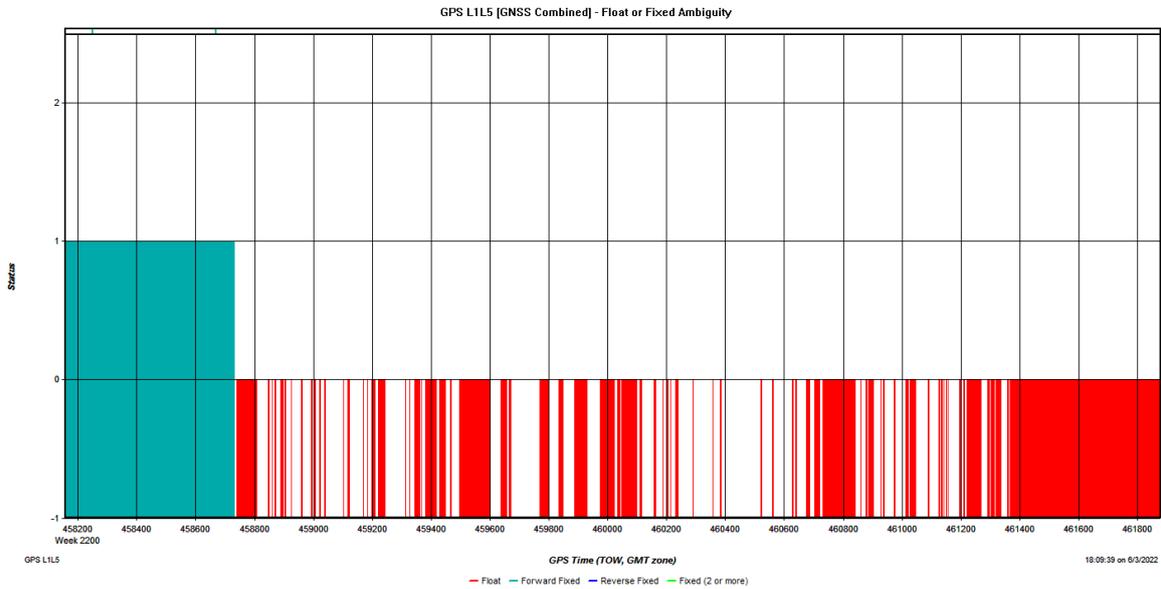


Figura 4.105 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS L1/L5 – Ambito urbano

Nel grafico in Figura 4.106 è riportato il rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (per i satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s):

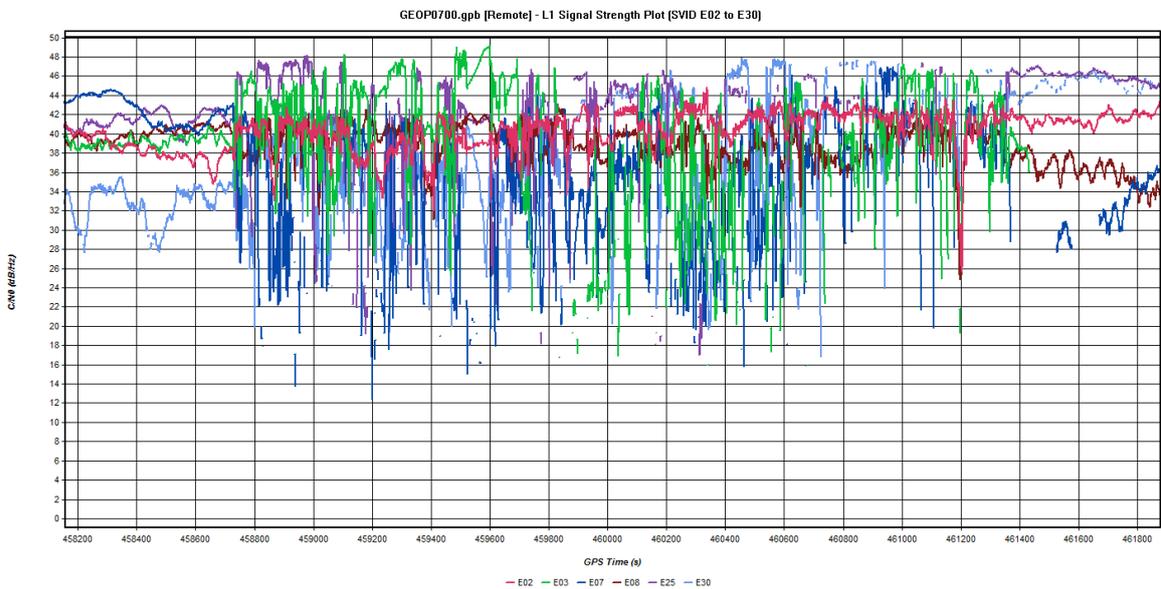


Figura 4.106 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s) – Ambito urbano

Nella Figura 4.107 sottostante si riporta il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati Galileo E1/E5a:

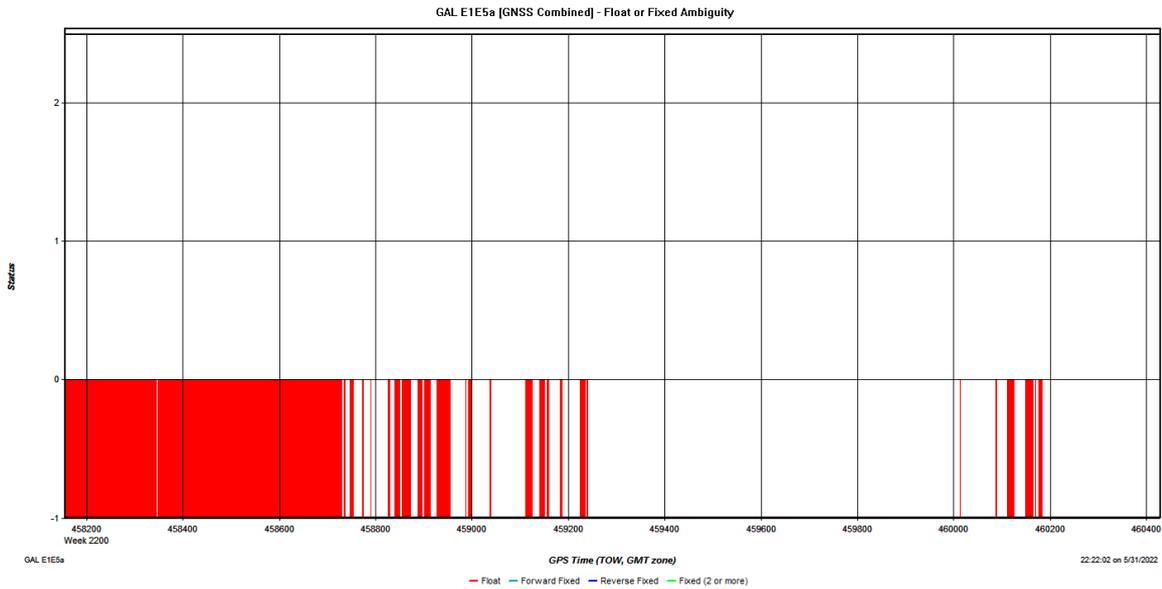


Figura 4.107 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati Galileo E1/E5a – Ambito urbano

Nella Figura 4.108 è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L5, E1/E5a:

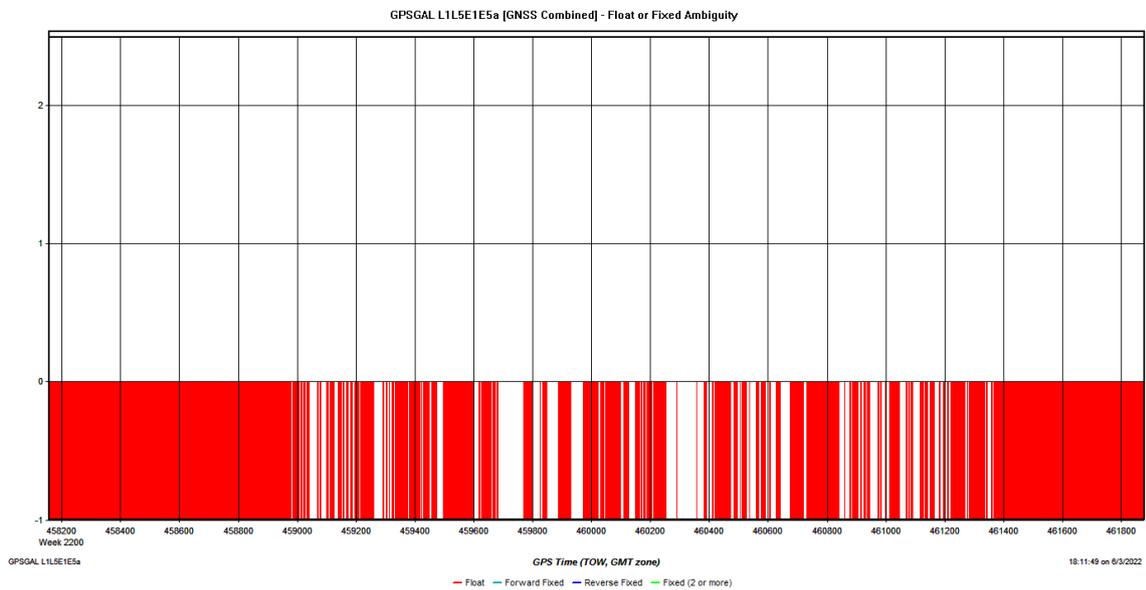


Figura 4.108 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L5, E1/E5a – Ambito urbano

Nella Figura 4.109 sottostante è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L5, G1:

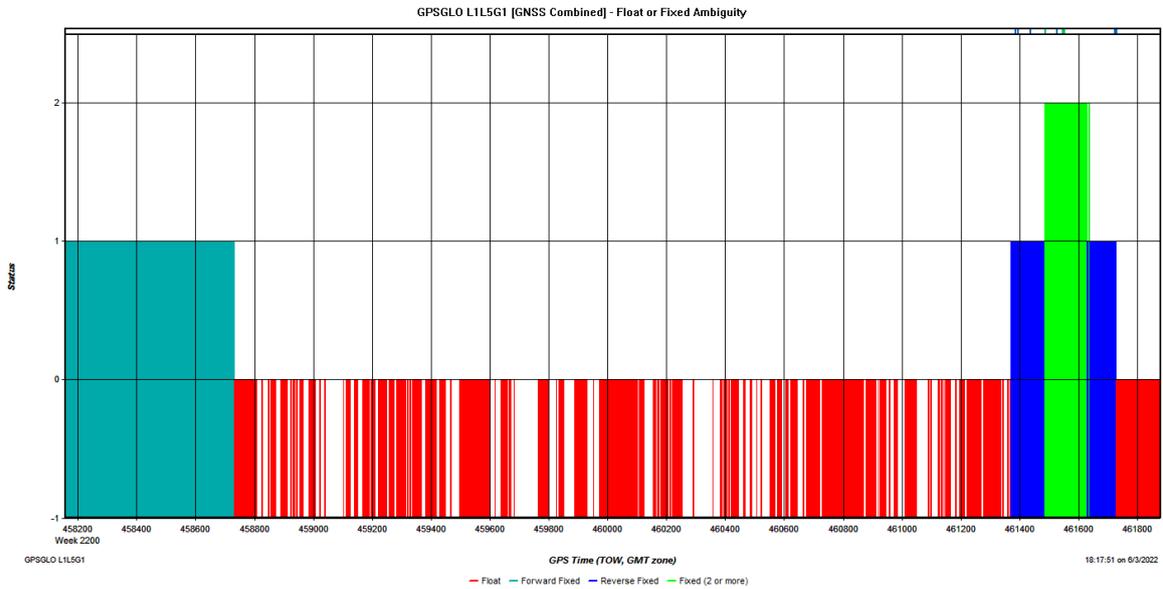


Figura 4.109 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L5, G1 – Ambito urbano

Nella sottostante Figura 4.110 è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L5, G1, E1/E5a:

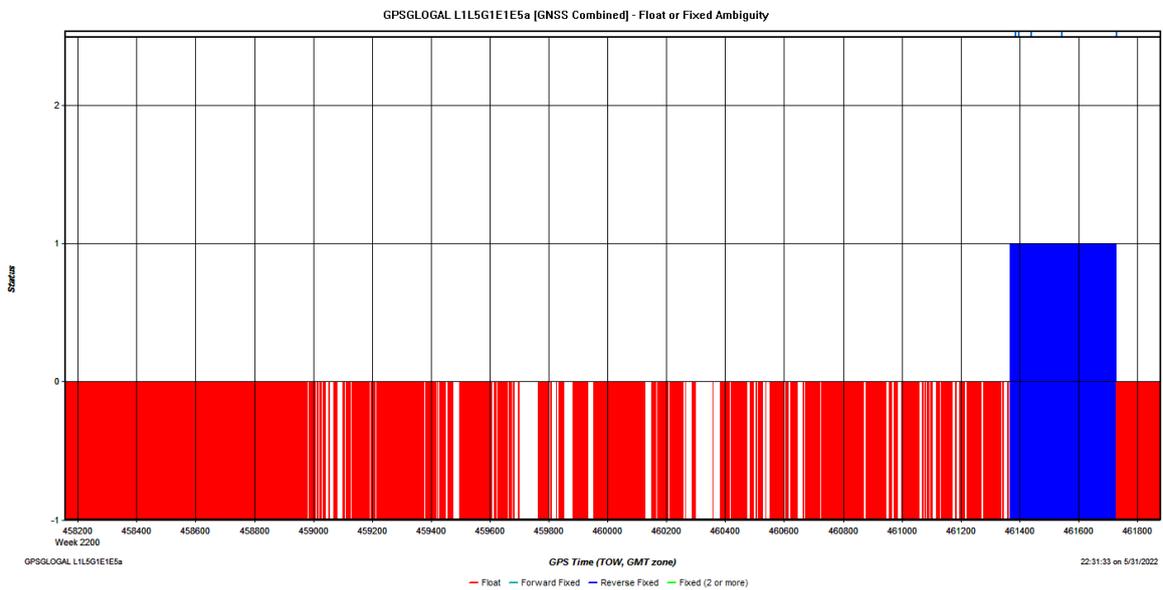


Figura 4.110 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L5, G1, E1/E5a – Ambito urbano

PARTICOLARI DELLA TRAIETTORIA OTTENUTA IN AMBITO URBANO

Nelle figure 3.107 e 3.108, viene presentato un ingrandimento della traiettoria urbana sovrapposta alle immagini satellitari di Google Earth, in cui sono evidenziate la traiettoria GPS (in rosso) e Galileo (in blu) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde):



Figura 4.111 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)

Nella Figura 4.111 soprastante, già illustrata utilizzando i dati raccolti con il ricevitore Septentrio, è evidente come a causa degli ostacoli artificiali (edifici) presenti lungo la traiettoria lo smartphone non sia stato in grado di fornire un posizionamento per la quasi totalità delle epoche visibili in figura.

Si osservano solamente alcune posizioni calcolate utilizzando il sistema satellitare GPS che presentano anche vistose deviazioni dalla traiettoria di riferimento.



Figura 4.112 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)

Nella Figura 4.112 soprastante, anche in questo caso già illustrata utilizzando i dati raccolti con il ricevitore Septentrio, si possono notare alcune soluzioni GPS e Galileo in una tipica situazione di "canyon urbano".

È possibile notare che, come era prevedibile, il numero di soluzioni ottenute utilizzando i dati acquisiti dal dispositivo Xiaomi Mi 8 sia notevolmente minore rispetto a quanto ottenuto con i dati acquisiti dal ricevitore Septentrio, in particolare per quanto riguarda il sistema satellitare Galileo.

Va tenuto conto del fatto che gli smartphone utilizzano antenne di ricezione limitata e maggiormente rumorose rispetto alle antenne geodetiche dei ricevitori GNSS.

4.2.2.3.4. Risultati dell'elaborazione dei dati dello smartphone – Rilievo extraurbano

Dalla Figura 4.113 alla Figura 4.122 sono riportati i grafici relativi alle differenze planimetriche (ΔN , ΔE) e altimetriche (Δh) in (m) tra le traiettorie dello smartphone Xiaomi Mi 8 e quelle MMS, rispetto al tempo (s):

GPS L1 L5 - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

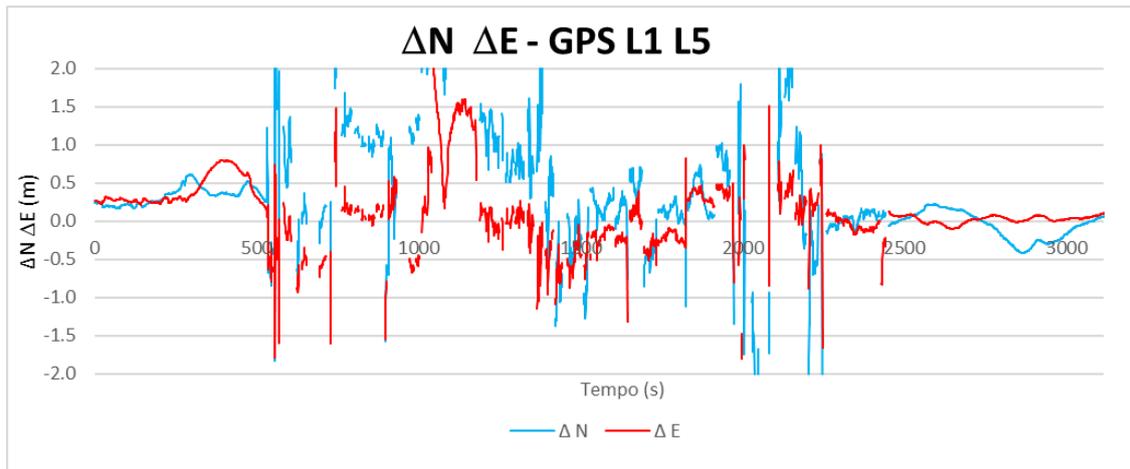


Figura 4.113 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano

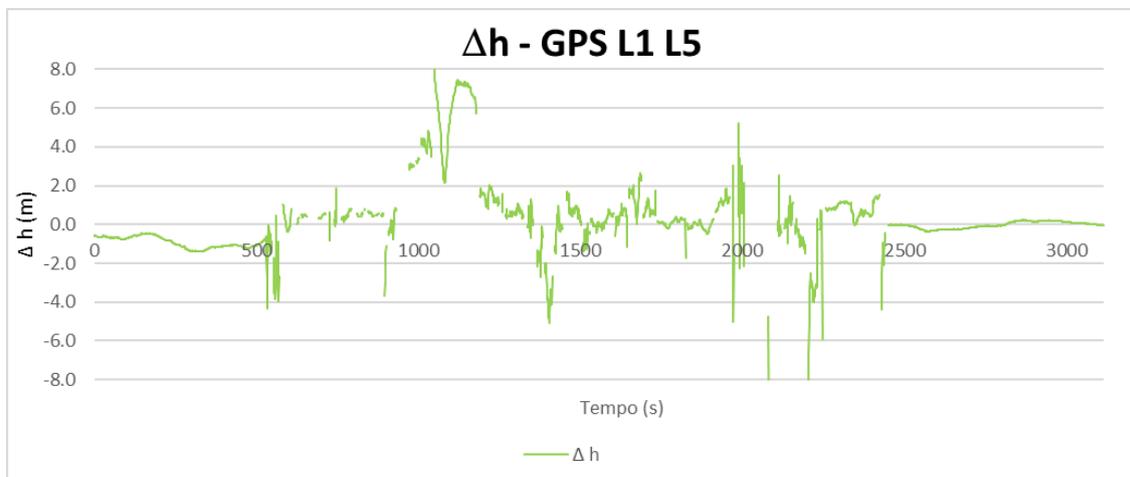


Figura 4.114 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano

Galileo E1 E5a - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

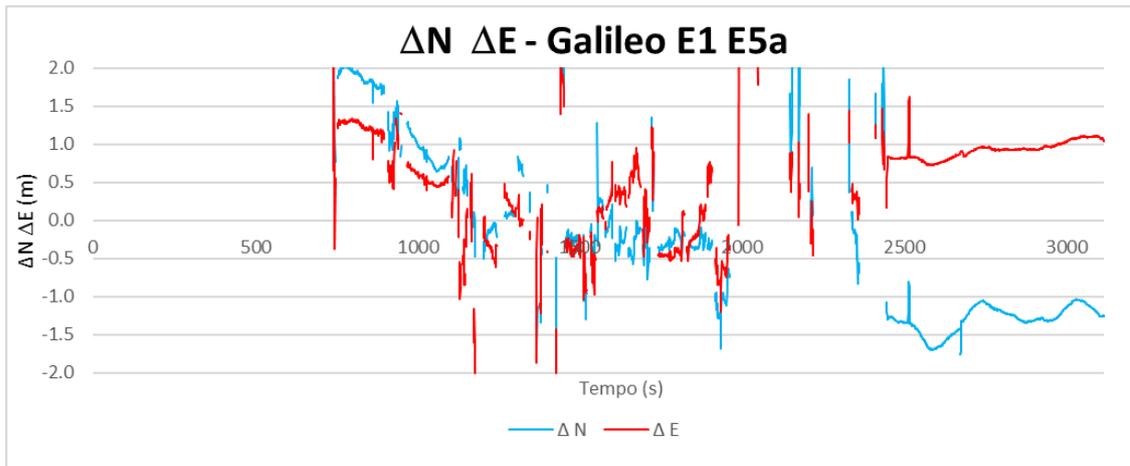


Figura 4.115 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano

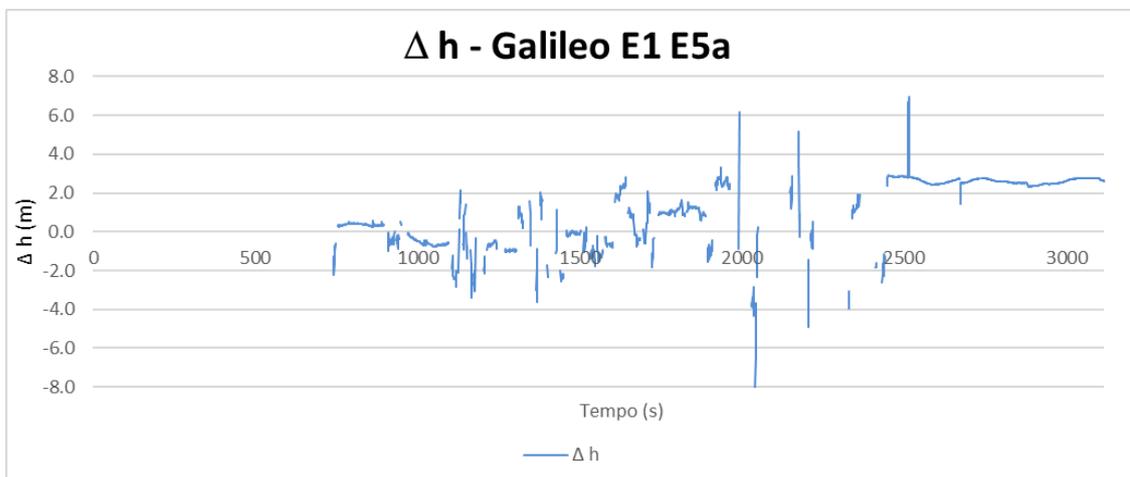


Figura 4.116 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano

GPS+GLONASS L1 L5, G1 - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

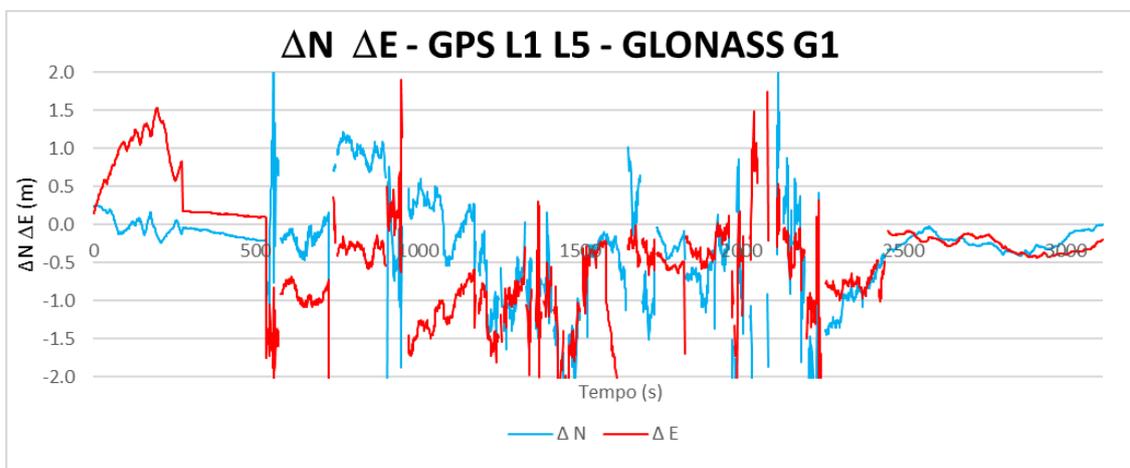


Figura 4.117 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano

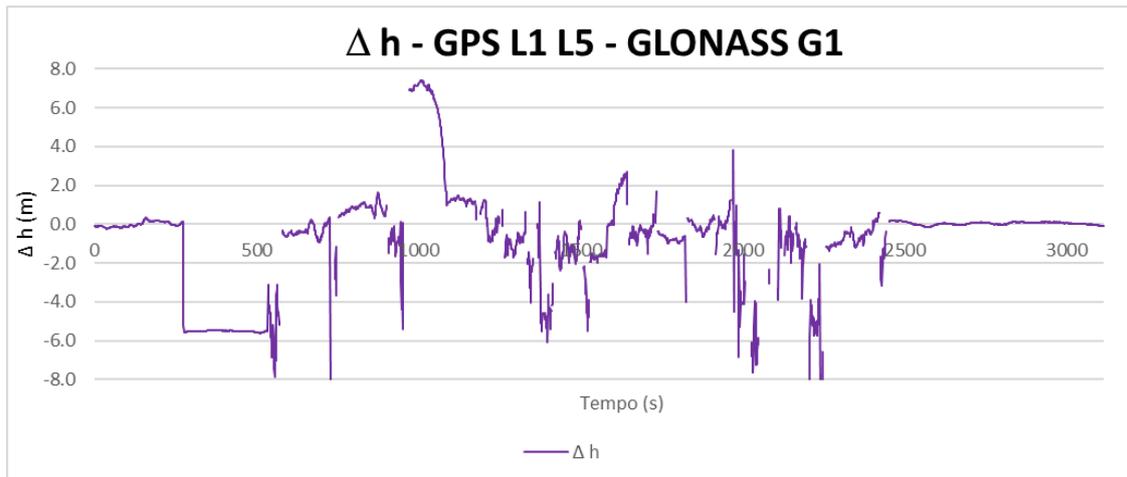


Figura 4.118 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano

GPS+Galileo L1 L5, E1 E5a - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

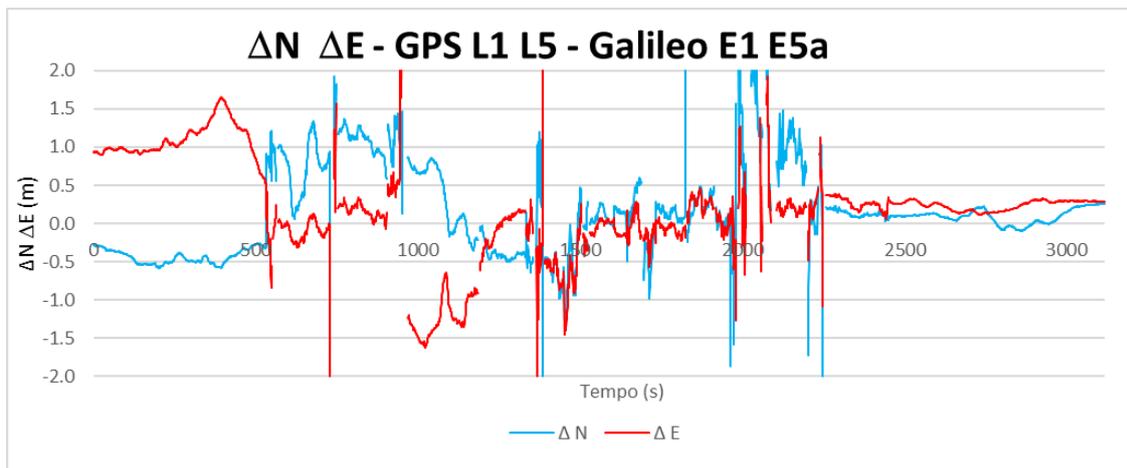


Figura 4.119 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano

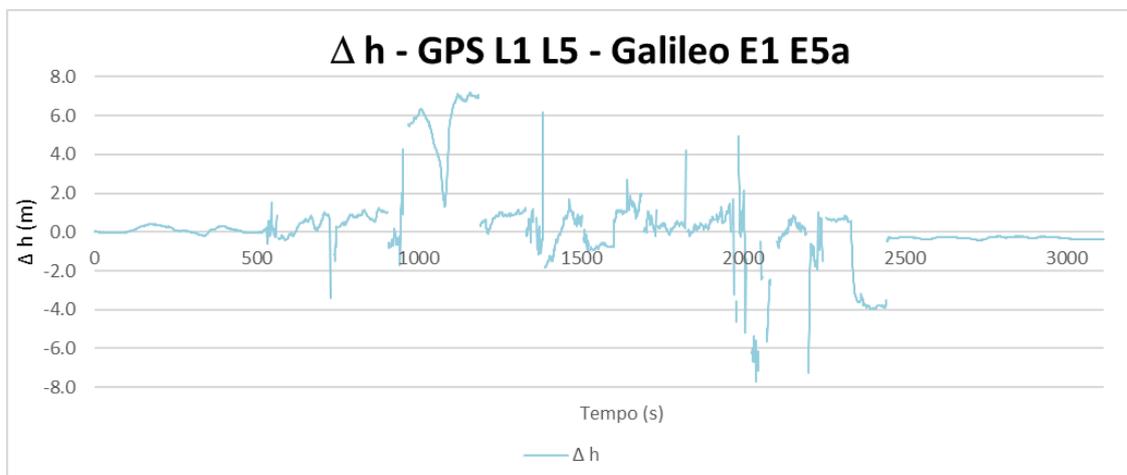


Figura 4.120 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano

GPS+GLONASS+Galileo L1 L5, G1, E1 E5a - elaborazione dati di fase alle differenze doppie

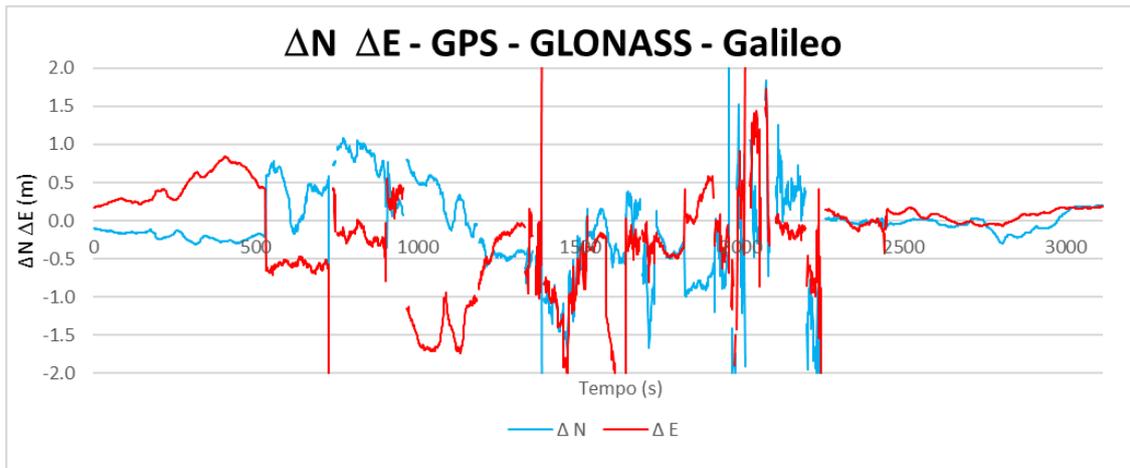


Figura 4.121 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

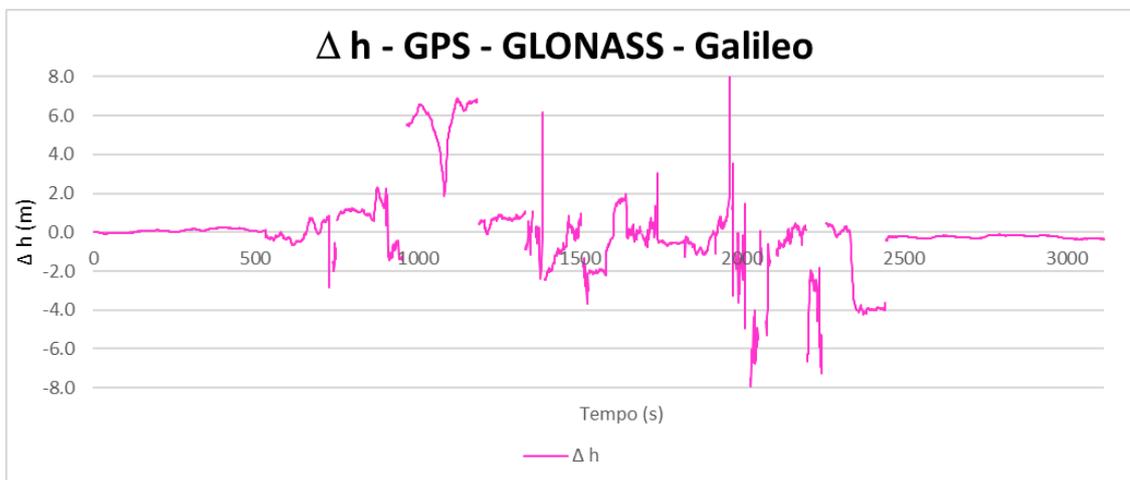


Figura 4.122 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

STATISTICHE ELABORAZIONE TRAIETTORIE SMARTPHONE IN AMBITO EXTRAURBANO

	ΔE (m)				
	GPS L1 L5	Gal E1 E5a	GPS L1 L5 GLO G1	GPS L1 L5 Gal E1 E5a	GPS GLO Gal
MAX ass	4.045	6.786	5.170	4.319	4.184
MIN ass	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MEDIA	0.323	0.773	0.636	0.506	0.452
DEV STD	0.432	0.539	0.516	0.541	0.499
Epoche	2587	1635	2838	2934	2965
Precisione del 95%	1.169	1.300	1.569	1.420	1.625

Tabella 4.45 Differenze planimetriche ΔE (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

	ΔN (m)				
	GPS L1 L5	Gal E1 E5a	GPS L1 L5 GLO G1	GPS L1 L5 Gal E1 E5a	GPS GLO Gal
MAX ass	6.183	8.843	9.353	5.306	5.306
MIN ass	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000
MEDIA	0.638	1.043	0.502	0.423	0.363
DEV STD	0.970	0.823	0.570	0.411	0.398
Epoche	2587	1635	2838	2934	2965
Precisione del 95%	2.936	1.947	1.442	1.213	1.040

Tabella 4.46 Differenze planimetriche ΔN (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

Si evidenzia che per calcolo delle medie, delle deviazioni standard e 95° percentile sono stati utilizzati i valori assoluti delle differenze Est Nord e Quota rispetto alla traiettoria di riferimento.

Osservando i valori in Tabella 4.45 si osserva innanzitutto come utilizzando il solo sistema satellitare Galileo sia stato possibile ottenere un numero di epoche (1635) sensibilmente minore rispetto a quanto sia stato possibile ottenere con il sistema GPS (2587). Inoltre si nota come con la combinazione GPS+Galileo si siano ottenute più epoche con una soluzione (2934) rispetto a quelle ottenute con la combinazione GPS+GLONASS (2838) e che la combinazione di tutti i sistemi abbia portato ad ottenere 2965 epoche con una soluzione. Sia nel caso delle ΔE che delle ΔN medie si osservano valori più alti per le soluzioni ottenute con il sistema satellitare Galileo, rispetto alle soluzioni ottenute con il sistema GPS e le altre combinazioni.

La deviazione standard dei valori ΔE Galileo (0.539 m) risulta essere maggiore di quella GPS (0.432 m) e di quelle ottenute con la combinazione dei vari sistemi GNSS tranne la combinazione GPS+Galileo (0.541 m) con la quale risulta essere comparabile.

La deviazione standard dei valori ΔN Galileo (0.823 m) risulta essere minore di quella GPS (0.970 m) ma maggiore di tutte le altre.

Il 95° percentile relativo al valore medio assoluto ΔE ottenuto con il sistema satellitare Galileo (1.300 m) risulta essere maggiore di quello ottenuto con il sistema GPS (1.169 m) ma minore di quelli ottenuti con tutte le altre combinazioni.

Il 95° percentile relativo al valore medio assoluto ΔN ottenuto con il sistema satellitare Galileo (1.947 m) risulta essere minore di quello ottenuto con il sistema GPS (2.936 m) ma maggiore di quelli ottenuti con tutte le altre combinazioni.

La combinazione GPS+Galileo presenta un numero maggiore di epoche con una soluzione, valori medi dei valori assoluti ΔE e ΔN e i relativi 95ⁱ percentili confrontabili a livello decimetrico con quelli della combinazione GPS+GLONASS.

Alla luce di queste considerazioni si può evincere che per questa campagna di misura in ambito extraurbano, dal punto di vista planimetrico, il sistema satellitare Galileo ha

permesso di ottenere meno soluzioni, con valori più elevati e con una dispersione comparabile di quelli ottenuti con il solo sistema satellitare GPS.

Combinando il sistema satellitare GPS con quello Galileo si sono ottenuti valori planimetrici confrontabili a livello decimetrico e con una dispersione simile a quelli della soluzione GPS+GLONASS.

	Δh (m)				
	GPS L1 L5	Gal E1 E5a	GPS L1 L5 GLO G1	GPS L1 L5 Gal E1 E5a	GPS GLO Gal
MAX ass	11.553	8.122	10.859	9.577	9.593
MIN ass	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000
MEDIA	1.104	1.667	1.510	1.046	1.111
DEV STD	1.744	1.056	2.134	1.670	1.714
Epoche	2587	1635	2838	2934	2965
Precisione del 95%	5.310	2.830	5.731	5.865	5.923

Tabella 4.47 Differenze altimetriche Δh (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

Nel caso delle Δh medie in Tabella 4.47 si osserva un valore medio assoluto per le soluzioni ottenute con il sistema satellitare Galileo (1.667 m), più alto rispetto a quello ottenuto con il sistema GPS (1.104 m), e tutte le altre combinazioni GNSS.

La deviazione standard dei valori Δh Galileo (1.056 m) risulta essere minore di quella GPS (1.744 m) e di quelle ottenute con la combinazione dei vari sistemi GNSS.

Il 95° percentile relativo al valore medio dei valori assoluti Δh ottenuto con il sistema satellitare Galileo risulta essere minore rispetto a quelli ottenuti con il sistema GPS e le combinazioni GPS+GLONASS e GPS+Galileo.

La combinazione GPS+Galileo presenta un numero maggiore di epoche con una soluzione, valore medio dei valori assoluti Δh (1.046 m) minori di quelli ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS (1.510 m) e il relativo 95° percentile maggiore (5.865 m contro 5.731 GPS+GLONASS).

Alla luce di queste considerazioni si può evincere che per questa campagna di misura in ambito extraurbano, dal punto di vista altimetrico, il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere valori maggiori di quelli ottenuti dal solo sistema satellitare GPS e con una dispersione minore di quelli ottenuti con quest'ultimo, ma su un campione di meno epoche e con un 95° percentile più alto. Combinando il sistema satellitare GPS con quello Galileo si sono ottenuti valori planimetrici pienamente confrontabili con quelli ottenuti con la soluzione GPS+GLONASS.

Analogamente a quanto visto per il rilievo in ambito urbano, oltre alle statistiche sopra esposte, sono state calcolate le percentuali di soluzioni di tipo Fixed, Float, Code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni. I risultati sono riportati in Tabella 4.48.

	GPS L1 L5	Gal E1 E5a	GPS L1 L5 GLO G1	GPS L1 L5 Gal E1 E5a	GPS GLO Gal
%Fixed	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
%Float	17.17	3.69	29.59	41.75	42.43
%Code	65.85	48.78	61.49	52.41	52.73
%No data	16.98	47.53	8.92	5.84	4.85

Tabella 4.48 Percentuali di soluzioni di tipo fixed, float, code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni

Dalla Tabella 4.48, si può osservare che il valore delle percentuali Fixed per le costellazioni GPS e Galileo sono entrambe nulle come tutte le percentuali relative alle diverse combinazioni tra GNSS. La quasi totalità delle soluzioni Galileo sono di tipo Code e le restanti No data.

Per quanto riguarda la percentuale di soluzioni float invece, si evidenzia una percentuale molto bassa per le soluzioni Galileo (3.69%) mentre la costellazione GPS raggiunge una percentuale del 17.17%. Le soluzioni multi-costellazione permettono di ottenere una maggior percentuale di soluzioni float. Si evidenzia una percentuale del 41.75% per la soluzione GPS+Galileo, minore di quella ottenuta con la costellazione GPS+GLONASS+Galileo (42.43%) che aveva evidenziato anch'essa una percentuale di soluzioni Fixed nulla.

Le percentuali di soluzioni ottenute con dati di codice sono elevate sia utilizzando i singoli GNSS che con le loro combinazioni (dal 52.41% GPS+Galileo al 65.85% GPS) se si esclude quanto ottenuto con il sistema Galileo (48.78%).

Per quanto riguarda la percentuale di epoche per le quali non è stato possibile calcolare una soluzione, Galileo (47.53%) presenta il valore più elevato di tutte le altre soluzioni analizzate e sensibilmente più alto di quella GPS (16.98%).

La soluzione ottenuta con i dati multi-costellazione GPS+GLONASS+Galileo è quella che presenta la percentuale di epoche senza dati minore evidenziando il vantaggio dell'uso della soluzione multi-costellazione anche su device come smartphone.

In Tabella 4.49 analogamente a quanto è stato fatto per i rilievi svolti in ambito urbano, è riportata la matrice di comparazione in cui sono evidenziate le percentuali di epoche in cui l'utilizzo del sistema GPS e Galileo generano negli stessi istanti le medesime soluzioni Fixed, Float, Code e No data, ma anche la percentuale di epoche in cui la soluzione calcolata con il sistema GPS è di tipo Fixed mentre quella Galileo è rispettivamente Float, Code e No data.

Analoghe matrici di comparazione sono state estrapolate analizzando le percentuali relative a GPS e GPS+GLONASS (Tabella 4.50), GPS e GPS+Galileo (Tabella 4.51), GPS e GPS+GLONASS+Galileo (Tabella 4.52).

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
Galileo	Fixed	0.00	0.00	0.00	0.00
	Float	0.00	0.26	2.95	0.48
	Code	0.00	16.17	29.20	3.40
	No data	0.00	0.74	33.70	13.09

Tabella 4.49 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e Galileo

La matrice in Tabella 4.49 presenta valori sulla diagonale principale e nella sua parte sottostante. Dai valori in tabella si deduce che le elaborazioni eseguite utilizzando il sistema satellitare GPS hanno consentito di ottenere percentuali, relative al tipo di soluzione ottenuta, indicatrici di valori migliori rispetto a quelle Galileo.

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
GPS+ GLONASS	Fixed	0.00	0.00	0.00	0.00
	Float	0.00	14.73	14.70	0.16
	Code	0.00	2.44	51.16	7.89
	No data	0.00	0.00	0.00	8.92

Tabella 4.50 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS

La matrice in Tabella 4.50 presenta percentuali relative alla tipologia di soluzioni qualitativamente migliori per tutte le soluzioni ottenute con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS se confrontate con quelle ottenute con la sola costellazione GPS, come risulta evidente dai confronti in essa riportati.

%		GPS			
		Fixed	Float	Code	No data
GPS+ Galileo	Fixed	0.00	0.00	0.00	0.00
	Float	0.00	16.11	24.13	1.51
	Code	0.00	1.06	41.72	9.63
	No data	0.00	0.00	0.00	5.84

Tabella 4.51 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+Galileo

La matrice in Tabella 4.51 presenta percentuali relative alla tipologia di soluzioni qualitativamente migliori per tutte le soluzioni ottenute con la combinazione GPS+Galileo se confrontate con quelle ottenute con la costellazione GPS.

Il confronto fra la Tabella 4.51 e la Tabella 4.50 evidenzia che la soluzione GPS+Galileo ottiene percentuali migliori rispetto a quella GPS+GLONASS, soprattutto considerando il confronto GPS Code / GPS+Galileo Float e GPS Code / GPS+GLONASS Float.

		%	GPS			
			Fixed	Float	Code	No data
GPS+GLONASS+Galileo	Fixed		0.00	0.00	0.00	0.00
	Float		0.00	14.83	26.67	0.93
	Code		0.00	2.34	39.18	11.20
	No data		0.00	0.00	0.00	4.85

Tabella 4.52 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo

La matrice in Tabella 4.52 evidenzia il contributo della costellazione Galileo in alcuni confronti. Malgrado nel confronto Fixed / Fixed non si abbiano risultati, nei confronti GPS Code / GPS+GLONASS+Galileo Float si ottiene una percentuale del 26.67%, che è più alta rispetto a tutti i confronti effettuati con le precedenti matrici di comparazione. Si noti che il confronto GPS Code / GPS+GLONASS Float, presentava una percentuale dello 14.70%.

Correlata alla tabella sopra descritta, ne è stata redatta un'analogia con le differenze planimetriche e altimetriche medie per il confronto GPS e Galileo (Tabella 4.53), GPS e GPS+GLONASS (Tabella 4.54), GPS e GPS+Galileo (Tabella 4.55), GPS e GPS+GLONASS+Galileo (Tabella 4.56).

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal	GPS	Gal
Galileo	Fixed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Float	-	-	-	-	0.673	1.579	0.584	1.462	1.413	1.012	1.891	0.960	-	1.882	-	1.206
	Code	-	-	-	-	0.242	1.579	0.236	2.472	0.961	1.157	1.307	1.421	-	1.719	-	0.635
	No data	-	-	-	-	1.173	-	1.512	-	0.781	-	1.270	-	-	-	-	-

Tabella 4.53 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e Galileo

Dalla Tabella 4.53, si nota che nel caso delle soluzioni della stessa tipologia, ottenute con il sistema GPS o con il sistema Galileo, come per il caso GPS Float / Galileo Float (che rappresenta solamente lo 0.26% dei confronti quindi poco rappresentativo), i valori medi assoluti sia planimetricamente che altimetricamente sono più elevati per la soluzione Galileo (1.579 m contro 0.673 m GPS in planimetria e 1.462 m contro 0.584 m GPS in altimetria).

Nel confronto Code / Code che rappresenta ben il 29.20% dei confronti, i valori medi assoluti sia planimetricamente che altimetricamente sono più elevati per la soluzione Galileo (1.157 m contro 0.961 m GPS in planimetria e 1.421 m contro 1.307 m GPS in altimetria).

Come già visto in ambito urbano i valori riportati nella parte sottostante la diagonale della tabella, presentano valori medi assoluti migliori per il sistema GPS rispetto ai valori ottenuti con il sistema Galileo (confronto GPS Float / Galileo Code, rappresentatività del 16.17%).

Si nota inoltre che il caso

Per quanto riguarda invece i valori soprastanti la diagonale della tabella, si hanno valori medi assoluti minori per il sistema Galileo (confronto GPS Code / Galileo Float, rappresentatività del 2.95%).

Si tiene inoltre presente che il caso GPS Code / Galileo No data rappresenta ben il 33.70% delle epoche oggetto di confronto.

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.53, tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.49, evidenzia che le elaborazioni eseguite utilizzando il sistema satellitare GPS hanno consentito di ottenere risultati più aderenti alla traiettoria di riferimento MMS rispetto alle soluzioni ottenute con il sistema Galileo.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO	GPS	GPS+GLO
GPS+GLONASS	Fixed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Float	-	-	-	-	0.166	0.350	0.156	0.075	0.609	0.377	0.901	3.316	-	1.117	-	0.853
	Code	-	-	-	-	1.029	1.065	1.142	1.240	0.970	1.127	1.433	1.403	-	1.196	-	1.616
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.54 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS

Dalla Tabella 4.54, si nota che nel caso delle soluzioni della stessa tipologia, ottenute con il sistema GPS o con la combinazione GPS+GLONASS, come per il caso GPS Float / GPS+GLONASS Float (che rappresenta il 14.73% dei confronti), il valore medio assoluto planimetrico è più elevato per la soluzione GPS+GLONASS (0.350 m contro 0.166 m GPS) mentre il valore medio assoluto altimetrico ottenuto con la soluzione GPS+GLONASS è minore di quello GPS (0.075 m contro 0.156 m GPS).

Nel confronto Code / Code che rappresenta ben il 51.16% dei confronti), il valore medio assoluto planimetrico è più elevato per la soluzione GPS+GLONASS (1.127 m contro 0.970 m GPS) mentre il valore medio assoluto altimetrico ottenuto con la soluzione GPS+GLONASS è minore di quello GPS (1.403 m contro 1.433 m GPS).

I valori riportati nella parte sottostante la diagonale della tabella, presentano valori medi assoluti migliori per il sistema GPS rispetto ai valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS (confronto GPS Float / GPS+GLONASS Code, rappresentatività del 2.44%).

Per quanto riguarda invece i valori soprastanti la diagonale della tabella, nel confronto GPS Code / GPS+GLONASS Float, (rappresentatività del 14.70%) si ha un valore medio assoluto planimetrico minore per la combinazione GPS+GLONASS (0.377 m contro 0.609 m GPS).

Altimetricamente invece, nel medesimo confronto, si ha un valore medio assoluto minore con il sistema GPS (0.901 m contro 3.316 m GPS+GLONASS)

Si tiene inoltre presente che il caso GPS No Data / GPS+GLONASS Code rappresenta il 7.89% delle epoche oggetto di confronto.

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.54, tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.50, evidenzia che le elaborazioni eseguite utilizzando il sistema satellitare GPS hanno consentito di ottenere risultati più aderenti alla traiettoria di riferimento MMS rispetto alle soluzioni ottenute con la combinazione GPS+GLONASS.

Dal confronto GPS Code / GPS+GLONASS Code si evince tuttavia che il contributo della costellazione GLONASS nell'ottenere una soluzione è evidente, soprattutto se si osserva il confronto GPS Code / Galileo Code.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal	GPS	GPS+Gal
GPS+Galileo	Fixed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Float	-	-	-	-	0.247	0.333	0.243	0.413	0.591	0.655	0.794	0.672	-	0.995	-	1.092
	Code	-	-	-	-	0.924	0.726	1.110	1.351	1.062	0.852	1.615	1.403	-	1.042	-	1.458
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 4.55 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+Galileo

Dalla Tabella 4.55, si nota che nel caso delle soluzioni della stessa tipologia, ottenute con il sistema GPS o con la combinazione GPS+Galileo nel confronto Float / Float (che rappresenta il 16.11% dei confronti) il sistema GPS ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio più basso (0.247 m) rispetto a quello ottenibile con la combinazione GPS+Galileo (0.333 m). Altimetricamente nel medesimo confronto, il sistema GPS ha permesso di ottenere un valore medio più basso (0.243 m) rispetto al valore ottenuto con la combinazione GPS+Galileo (0.413 m).

Il confronto Code / Code (che rappresenta ben il 41.72% dei confronti) presenta dei valori planimetrici medi più bassi per il sistema GPS+Galileo (0.852 m contro i 1.062 m ottenuti con il sistema GPS). Anche altimetricamente la combinazione GPS+Galileo ha permesso di ottenere valori medi inferiori (1.403 m contro i 1.615 m GPS).

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, ad esclusione dei confronti con GPS No data, e soffermandosi sul confronto GPS Code / GPS+Galileo Float (che rappresenta il 24.13% dei confronti), si osserva che si ha un valore medio assoluto planimetrico più basso per il sistema GPS (0.591 m) rispetto al valore medio assoluto ottenuto con la combinazione GPS+Galileo (0.655 m). Altimetricamente invece, si ha un valore medio assoluto più basso per la combinazione GPS+Galileo (0.672 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema GPS (0.794 m).

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, si ha nel confronto GPS Float / GPS+Galileo Code (rappresentatività 1.06%) un valore planimetrico medio assoluto più basso per la soluzione GPS+Galileo (0.726 m) rispetto a quello ottenuto con il sistema GPS (0.924 m). Altimetricamente invece si ha un valore medio assoluto più basso per la soluzione GPS (1.110 m) rispetto a quello ottenuto con la combinazione GPS+Galileo (1.351 m).

Comparando inoltre i valori del confronto GPS No data / GPS+Galileo Code che rappresenta il 9.63% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+Galileo pari a 1.042 m in planimetria e 1.458 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione

GPS+GLONASS erano maggiori (Tabella 4.54) e con analoga percentuale di rappresentatività (7.89%).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.55 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.51 evidenzia quindi che le elaborazioni eseguite utilizzando la combinazione dei sistemi satellitari GPS+Galileo hanno consentito di ottenere risultati migliori di quelli ottenibili con il sistema GPS e con la combinazione GPS+GLONASS.

		GPS															
		Fixed				Float				Code				No data			
		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)		Δ N-E (m)		Δ h ass (m)	
		GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS	GPS+GLO+Gal
GPS+GLO+Gal	Fixed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Float	-	-	-	-	0.180	0.156	0.180	0.293	0.518	0.427	0.781	0.328	-	0.575	-	0.847
	Code	-	-	-	-	0.977	0.832	1.033	1.505	1.142	0.873	1.677	1.819	-	0.920	-	1.518
	No data	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabella 4.56 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo

Dalla Tabella 4.56, non si osservano confronti GPS Fixed / GPS+GLONASS+Galileo Fixed, analogamente a quanto visto nel confronto GPS / GPS+Galileo.

Per quanto riguarda il confronto Float / Float (che rappresenta il 14.83% dei confronti) la combinazione GPS+GLONASS+Galileo ha permesso di ottenere un valore planimetrico medio assoluto più basso (0.156 m) rispetto a quello ottenibile con il sistema satellitare GPS (0.180 m). Altimetricamente, invece, nel medesimo confronto la combinazione di tre sistemi satellitari ha permesso di ottenere un valore medio più alto (0.293 m) rispetto al valore ottenuto con il sistema GPS (0.180 m).

Il confronto Code / Code (che rappresenta ben il 39.18% dei confronti) presenta un valore medio assoluto planimetrico più basso per il sistema GPS+GLONASS+Galileo (0.873 m contro i 1.142 m ottenuti con il sistema GPS), mentre altimetricamente si ha un valore medio assoluto più basso con il sistema GPS (1.677 m contro 1.819 m GPS+GLONASS+Galileo).

Per quanto riguarda i valori soprastanti la diagonale della tabella, la combinazione GPS+GLONASS+Galileo presenta valori planimetrici e altimetrici medi assoluti sempre migliori rispetto a quelli GPS (confronto GPS Code / GPS+GLONASS+Galileo Float e i confronti con GPS No data).

Nella parte sottostante la diagonale della tabella, nel confronto planimetrico GPS Float / GPS+GLONASS+Galileo Code (rappresentatività 2.34%) si ha un valore medio assoluto

planimetricamente più elevato per il sistema GPS (0.977 m contro i 0.832 m ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo), mentre in altimetria la combinazione GPS+GLONASS+Galileo presenta un valore medio assoluto più elevato (1.505 m contro 1.033 m GPS).

Comparando inoltre i valori del confronto GPS No data / GPS+GLONASS+Galileo Code che rappresenta l'11.20% dei confronti) si hanno valori medi assoluti ottenuti con la soluzione GPS+GLONASS+Galileo pari a 0.575 m in planimetria e 0.847 m in altimetria. I valori ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS erano maggiori (Tabella 4.54) e rappresentativi del 7.89% dei confronti, mentre i risultati ottenuti con la combinazione GPS+Galileo risultano maggiori planimetricamente e minori altimetricamente (Tabella 4.55), e con una rappresentatività simile a quella GPS+GLONASS (9.63%).

L'analisi dei valori presentati in Tabella 4.56 tenendo conto della significatività del campione riportato in Tabella 4.52 fornisce un quadro delle soluzioni ottenute alquanto variabile sia dal punto di vista planimetrico che altimetrico. Dai confronti GPS Code / GPS+GLONASS+Galileo Float e GPS Code / GPS+GLONASS Float si evince tuttavia che il contributo della costellazione Galileo nell'ottenere una soluzione è evidente soprattutto poiché si hanno più soluzioni di tipo float, (26.67%, con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo rispetto a quella GPS+GLONASS 14.70%) con valori assoluti medi planimetrici confrontabili (0.427 m contro 0.377 m GPS+GLONASS) e un valore altimetrico medio assoluto migliore utilizzando la combinazione di tutti i GNSS (0.328 m contro 3.316 m GPS+GLONASS).

PDOP E N° DI SATELLITI ELABORAZIONE TRAIETTORIE SMARTPHONE IN AMBITO EXTRAURBANO

Dalla Figura 4.123 alla Figura 4.127 sono riportati i grafici relativi al PDOP e al numero di satelliti e le relative statistiche dei dati elaborati per tutte le costellazioni utilizzate.

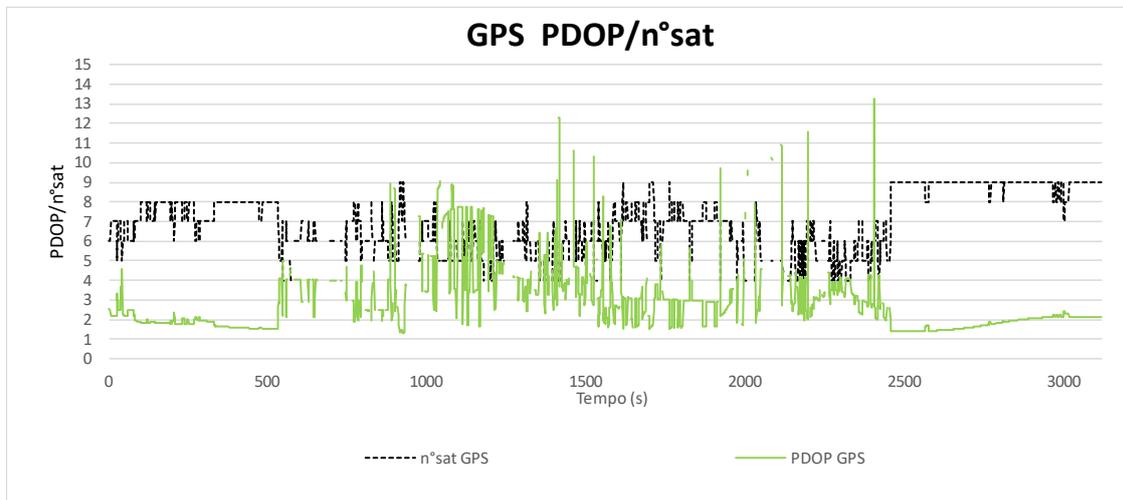


Figura 4.123 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS – Ambito extraurbano

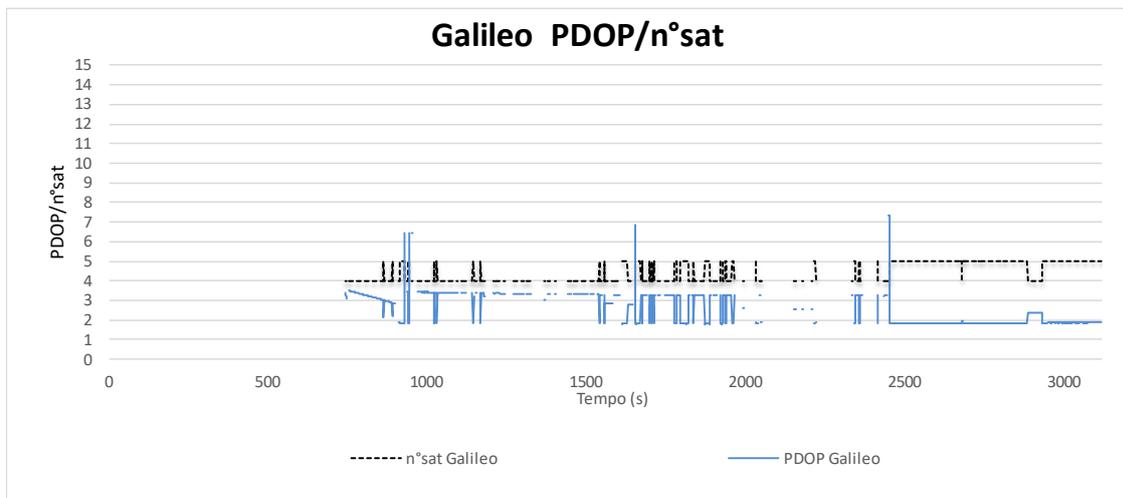


Figura 4.124 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati Galileo – Ambito extraurbano

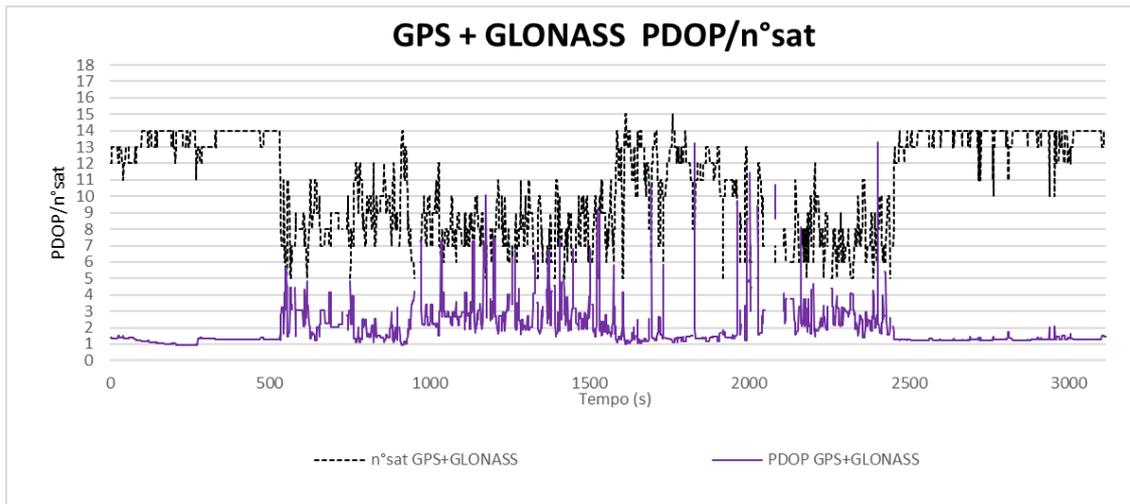


Figura 4.125 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano

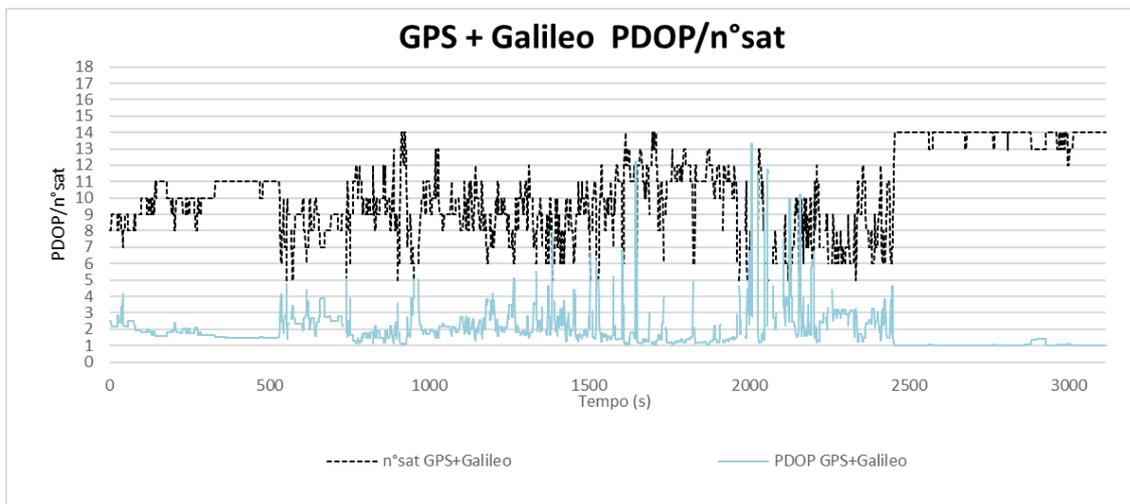


Figura 4.126 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano

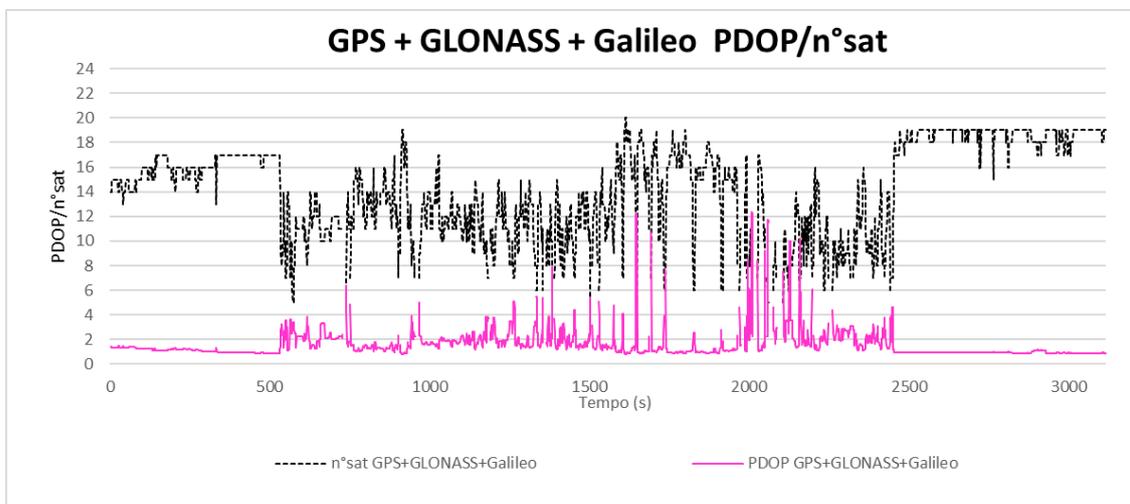


Figura 4.127 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

STATISTICHE PDOP E N° DI SATELLITI IN AMBITO EXTRAURBANO - SMARTPHONE

	GPS L1 L5		Galileo E1 E5a		GPS L1 L5 GLO G1		GPS L1 L5 Galileo E1 E5a		GPS GLONASS Galileo	
	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP	N°sat	PDOP
MAX	9	13.27	5	7	15	13	14	13	20	12
MIN	4	1.29	4	2	4	1	5	1	5	1
MEDIA	7.07	2.82	4.47	2.57	10.85	1.93	10.38	1.90	14.22	1.58
epoche	2587	2587	1635	1635	2838	2838	2934	2934	2965	2965

Tabella 4.57 Statistiche relative al PDOP e al n° di satelliti per i dati GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

Dalla Tabella 4.57 si nota che il sistema satellitare Galileo presenta un numero medio e massimo di satelliti osservati, sensibilmente minore rispetto a quelli GPS, ma con un PDOP medio minore.

Il numero medio di satelliti con la combinazione GPS+Galileo è più basso (10.38) rispetto a quello GPS+GLONASS (10.85).

Combinando i diversi GNSS come prevedibile, il numero medio di satelliti aumenta e il PDOP diminuisce.

SKYPLOT SMARTPHONE IN AMBITO EXTRAURBANO

Dalla Figura 4.128 alla Figura 4.132 sono riportati i grafici degli skyplot per tutte le costellazioni utilizzate:

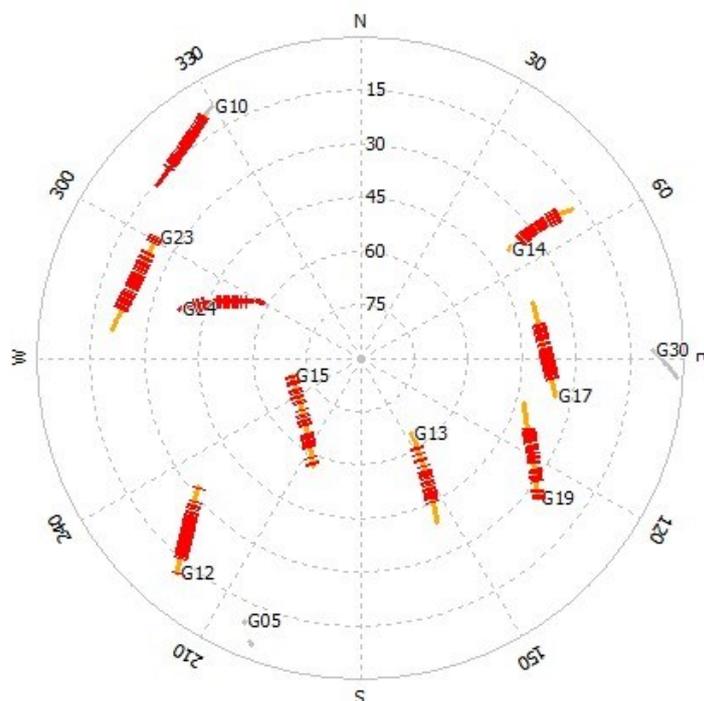


Figura 4.128 Skyplot dei satelliti GPS – Ambito extraurbano

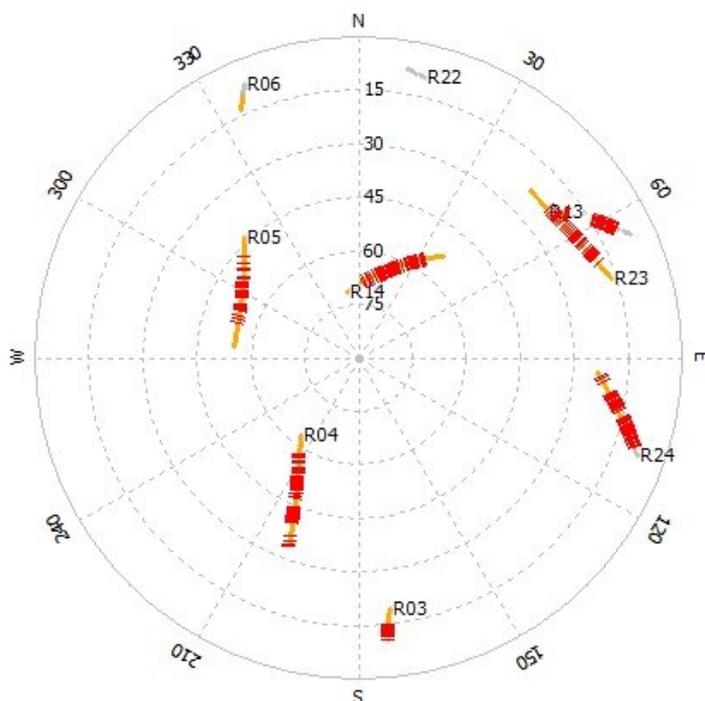


Figura 4.129 Skyplot dei satelliti GLONASS – Ambito extraurbano

Si noti la mancanza del satellite GLONASS R15 rispetto allo skyplot ottenuto con il ricevitore Septentrio. Non si è trovata una valida motivazione per questa mancanza nei dati dello smartphone.

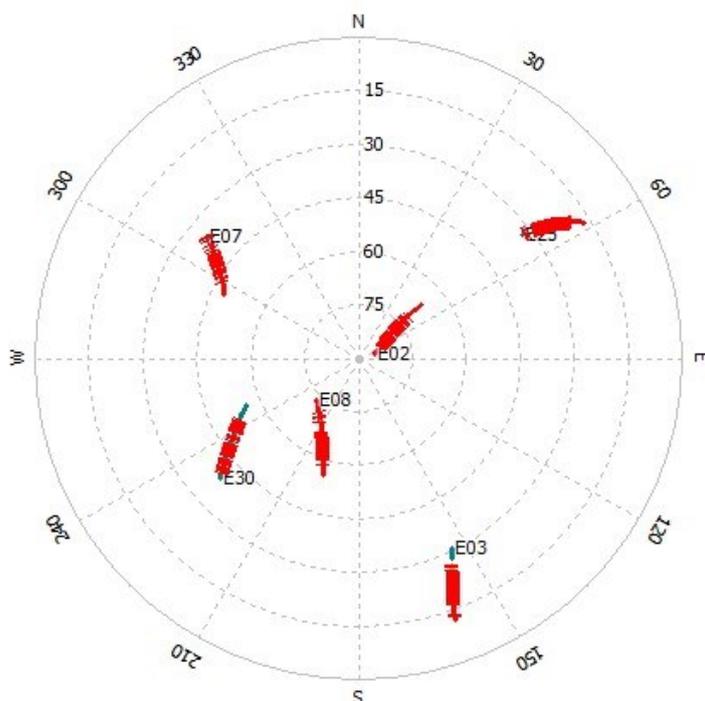


Figura 4.130 Skyplot dei satelliti Galileo – Ambito extraurbano

Si noti la mancanza del satellite Galileo E11 rispetto allo skyplot ottenuto con il ricevitore Septentrio. Ciò è quasi certamente dovuto al rapporto segnale/rumore visibile nella Figura

4.77, ricavato dai dati del ricevitore Septentrio (il satellite E11 è rappresentato dalla linea di colore viola).

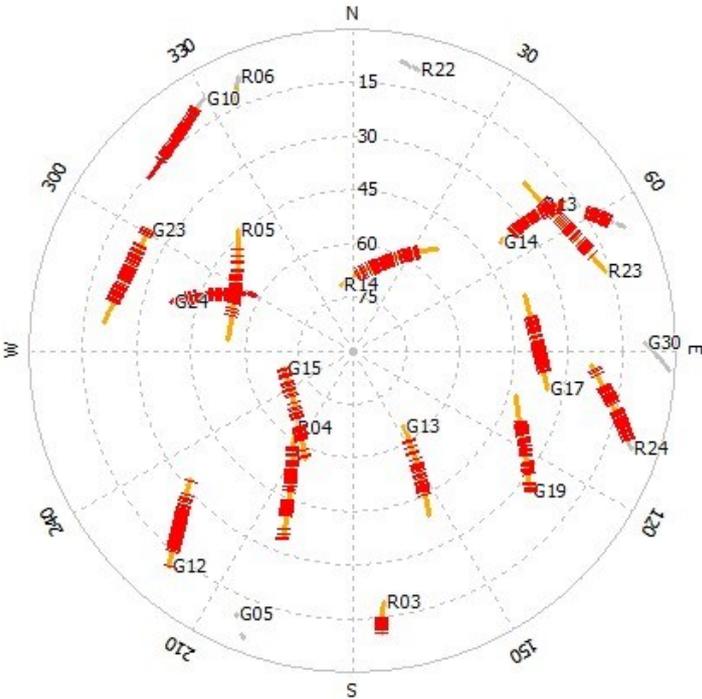


Figura 4.131 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS – Ambito extraurbano

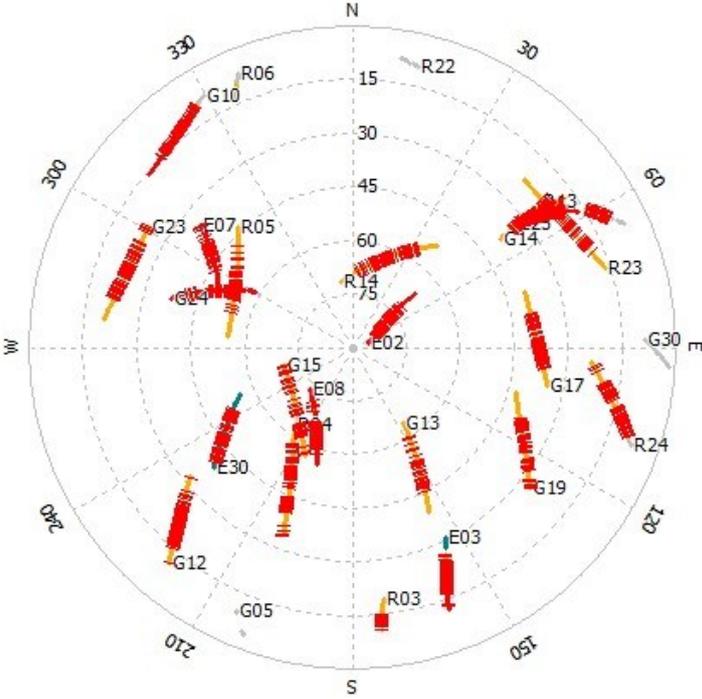


Figura 4.132 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano

GRAFICI RAPPORTO SEGNALE/RUMORE E AMBIGUITÀ IN AMBITO EXTRAURBANO

Nelle figure seguenti sono presentati alcuni grafici, ottenuti utilizzando Novatel GrafNav v.8.90 relativi all'elaborazione dei dati urbani: nel grafico in Figura 4.133 è riportato il rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (per i satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s):

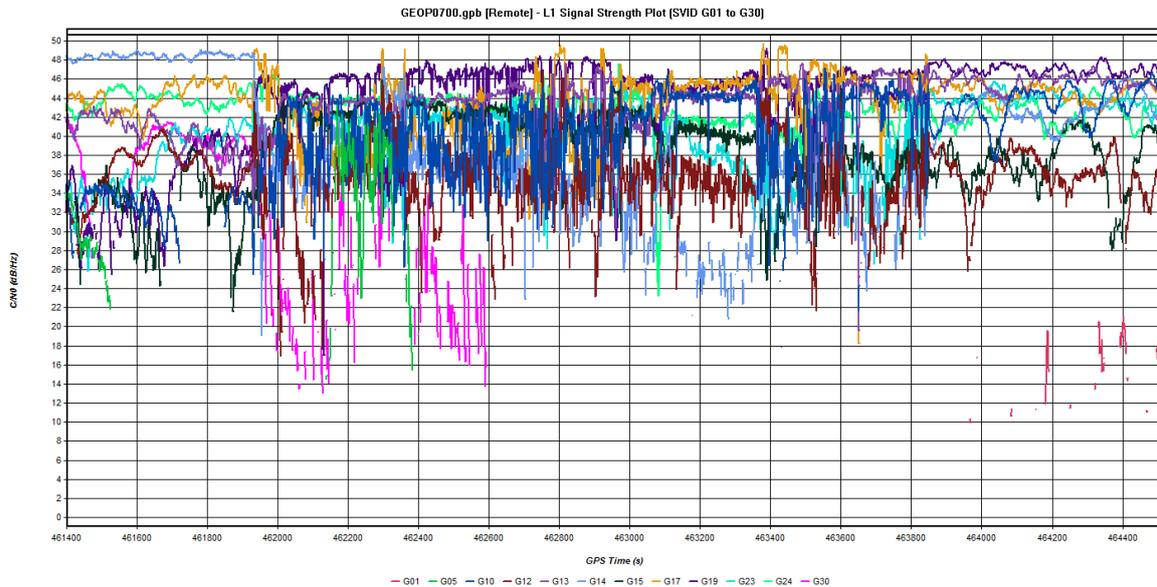


Figura 4.133 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (satelliti da G01 a G30) rispetto al tempo (s) – Ambito extraurbano

Nella Figura 4.134 sottostante si riporta il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS L1/L5:

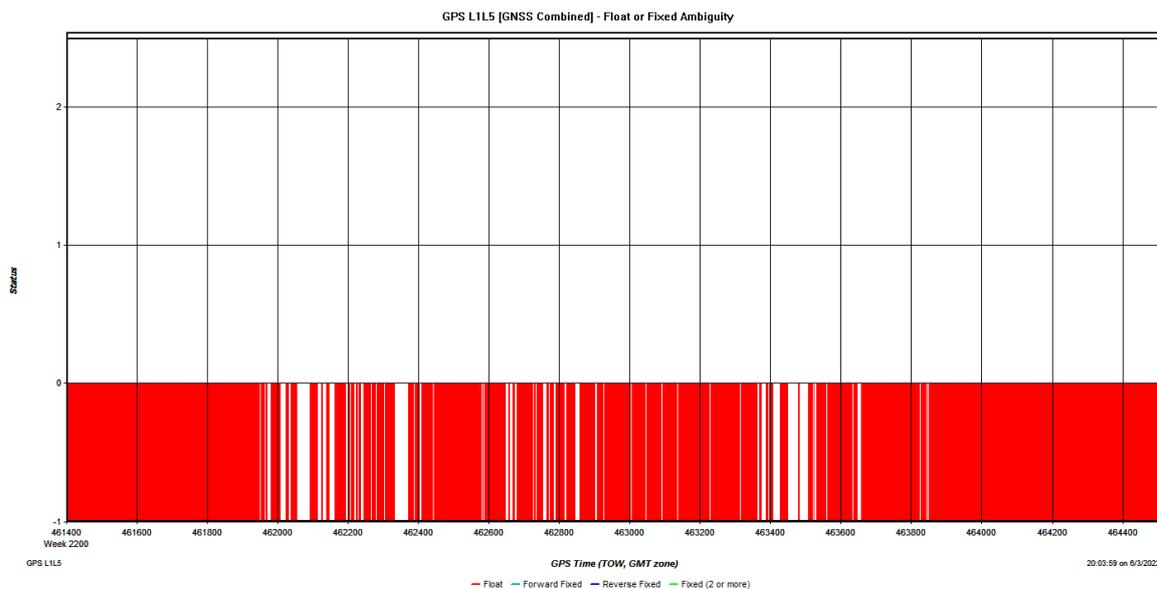


Figura 4.134 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS L1/L5 – Ambito extraurbano

Nel grafico in Figura 4.135 è riportato il rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (per i satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s):

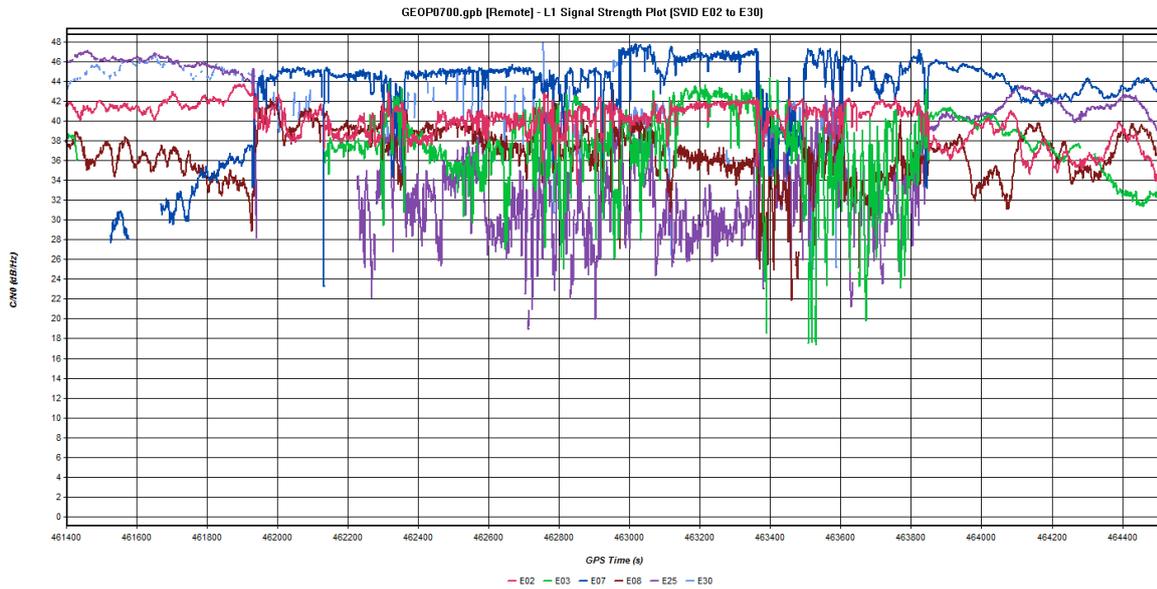


Figura 4.135 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s) – Ambito extraurbano

Nella Figura 4.136 sottostante si riporta il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati Galileo E1/E5a:

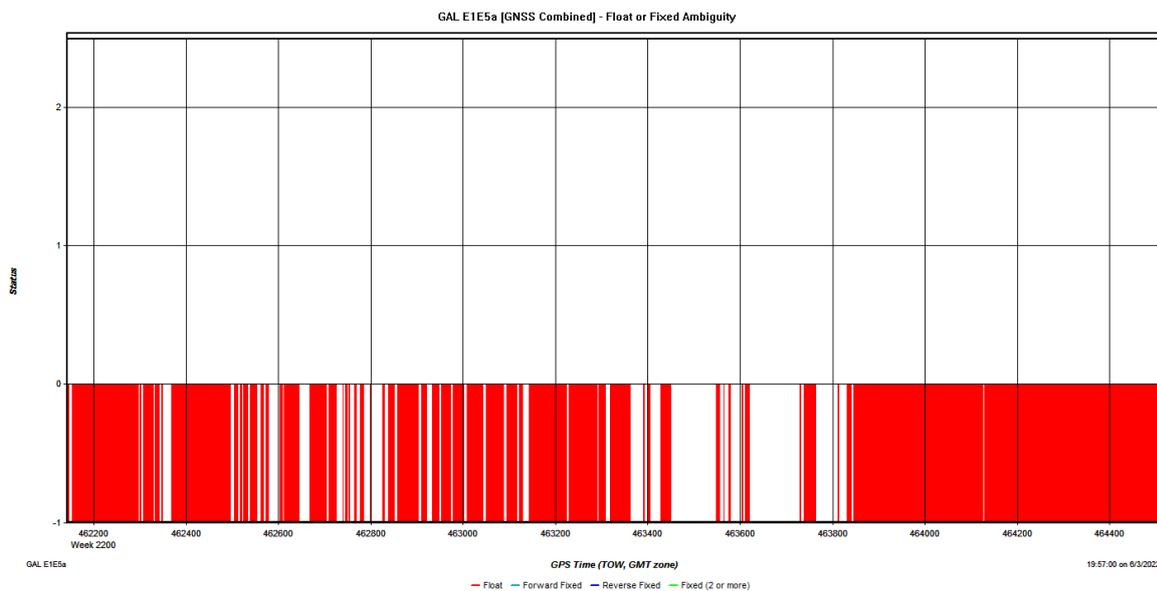


Figura 4.136 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati Galileo E1/E5a – Ambito extraurbano

Nella Figura 4.137 sottostante è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L5, E1/E5a:

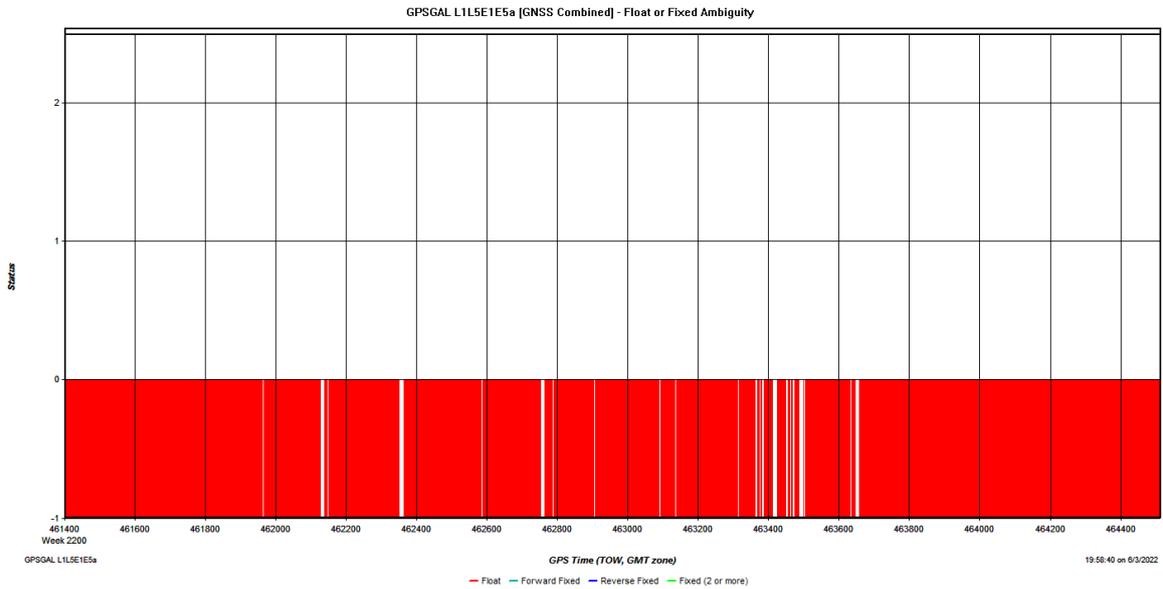


Figura 4.137 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L5, E1/E5a – Ambito extraurbano

Nella Figura 4.138 seguente è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L5, G1:

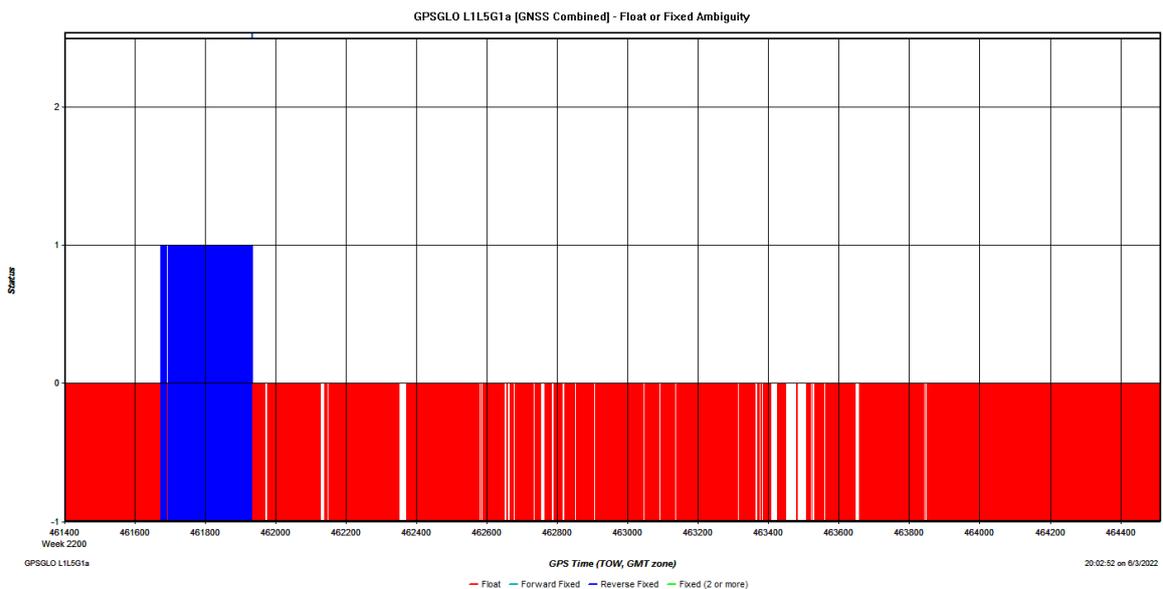


Figura 4.138 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L5, G1 – Ambito extraurbano

Nella Figura 4.139 sottostante è riportato il grafico relativo alle ambiguità (fixed o float) ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L5, G1, E1/E5a:

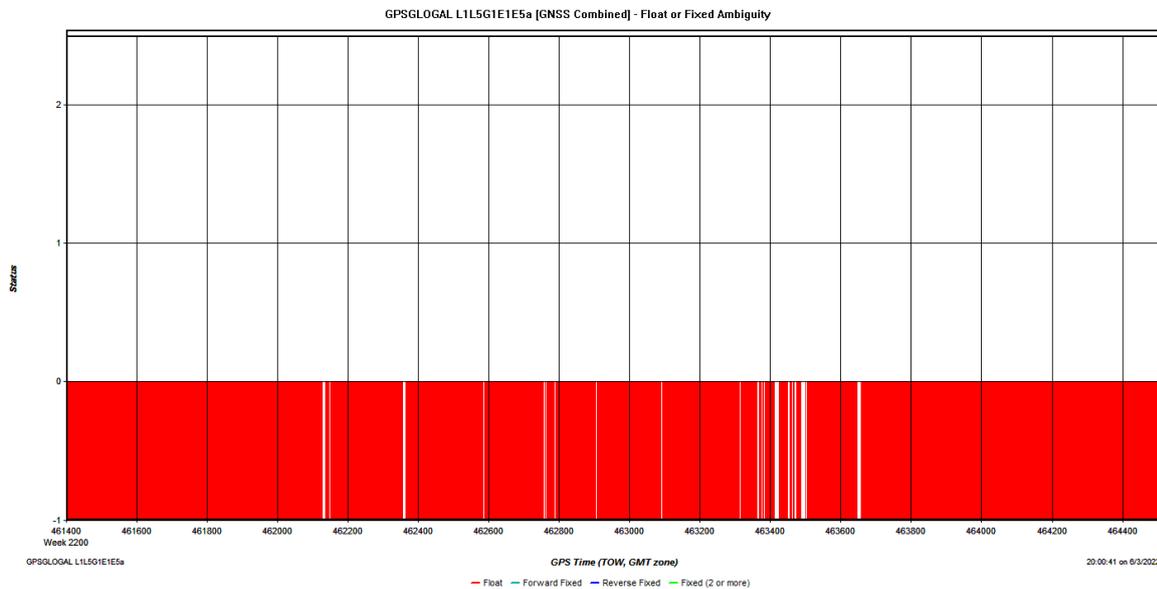


Figura 4.139 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L5, G1, E1/E5a – Ambito extraurbano

PARTICOLARI DELLA TRAIETTORIA OTTENUTA IN AMBITO EXTRAURBANO

Nelle figure 3.136 e 3.137 riportate di seguito, analogamente a quanto visto per i dati relativi al ricevitore Septentrio, viene presentato un ingrandimento della traiettoria extraurbana sovrapposta alle ortofoto ottenute dal server WMS della Regione Friuli Venezia Giulia, in cui sono evidenziate la traiettoria GPS (in rosso) e Galileo (in blu) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde).

In queste due figure, si può notare il passaggio MMS sotto due ponti visti in precedenza. Le posizioni calcolate utilizzando la costellazione Galileo in questo caso evidenziano come il segnale venga riacquisito dal ricevitore molto più lentamente rispetto a quanto avvenga utilizzando il sistema GPS.

Nella Figura 4.140 sottostante, prima del passaggio del ponte, le posizioni GPS sono state calcolate con ambiguità di tipo float.

Nove epoche dopo, è stato possibile calcolare una posizione GPS di tipo float con 4 satelliti e un PDOP di 4.03.

Prima del passaggio sotto al ponte, una posizione Galileo di tipo float è stata calcolata con 4 satelliti e un valore PDOP di 3.24. 29 epoche dopo, è stato possibile calcolare una posizione float (in una posizione distante 7,87 m dalla traiettoria di riferimento) con 4 satelliti e un valore PDOP pari a 2.61.



Figura 4.140 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)

Nella Figura 4.141 sottostante viene mostrato un dettaglio delle traiettorie GPS (in rosso) e Galileo (in blu) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde) in corrispondenza del passaggio sotto un altro ponte.

Prima del passaggio del ponte le posizioni GPS sono state calcolate con ambiguità di tipo float, 6 satelliti e un PDOP di 4.11. Sette epoche dopo il passaggio del ponte, è stato possibile calcolare una posizione GPS di tipo float con 8 satelliti e un PDOP di 2.18.

Prima del passaggio del ponte, una posizione Galileo di tipo float, precedente all'ultima epoca calcolata con il sistema GPS, è stata calcolata con 4 satelliti e un valore PDOP di 3.28. 8 epoche dopo, contemporaneamente al sistema GPS, è stata calcolata una posizione float con 4 satelliti e un valore PDOP pari a 3.27.

È evidente come l'utilizzo di una strumentazione diversa, senza un'antenna dedicata, ma anche l'utilizzo di frequenze diverse, porti a risultati significativamente differenti rispetto a quanto ottenuto con un ricevitore GNSS geodetico.



Figura 4.141 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)

4.3. Confronti dei risultati ottenuti nelle diverse campagne di misura

In questo paragrafo sono stati analizzati i risultati ottenuti nelle diverse campagne di misura che si sono svolte da dicembre 2019 ad agosto 2022.

I risultati ottenuti sono riportati in diversi grafici che permettono di riassumere l'andamento nel tempo dei confronti fra la traiettoria di riferimento e le diverse soluzioni ottenute con il ricevitore GNSS Septentrio.

In modo analogo si sono riportati in grafici che riassumono le deviazioni standard, il numero di epoche, il numero di satelliti e i PDOP medi per ogni campagna.

Per il calcolo delle medie e delle deviazioni standard sono stati utilizzati i valori assoluti delle differenze ΔNE e Δh rispetto alla traiettoria MMS di riferimento.

Si è scelto di rappresentare i grafici relativi ai confronti delle coordinate plano-altimetriche dei rilievi extraurbani utilizzando una scala diversa da quella utilizzata per i grafici relativi ai rilievi urbani in quanto la diversa ampiezza dei valori confrontati avrebbe reso i grafici poco comprensibili.

Non si sono effettuati confronti nel tempo per i dati relativi allo smartphone in quanto quest'ultimo è stato utilizzato solamente nelle ultime due campagne di misura.

4.3.1. Confronti nel tempo in ambito urbano

In questo paragrafo si riporteranno i grafici ottenuti utilizzando i vari sistemi GNSS e le loro combinazioni nelle diverse campagne di misura svolte in ambito urbano.

Ci si soffermerà anche su confronti maggiormente approfonditi fra le soluzioni ottenute con il sistema GPS e con il sistema Galileo.

4.3.1.1. Confronto fra i dati di posizione ottenuti con i sistemi satellitari Galileo e GPS

In questo paragrafo viene svolta una prima analisi dei confronti fra le traiettorie di riferimento GPS/INS e le traiettorie calcolate utilizzando i sistemi GPS e Galileo relative al ricevitore Septentrio.

Successivamente per tutte le campagne di misura effettuate è stato eseguito un confronto diretto dei valori di posizione ottenuti utilizzando i dati delle costellazioni GPS e Galileo, sono stati creati i grafici relativi ai valori medi e di deviazione standard delle differenze in termini di componenti planimetriche e altimetriche, i grafici relativi al numero di soluzioni e ai valori medi del numero di satelliti e del PDOP.

4.3.1.1.1. GPS L1 L2 - Differenze planimetriche tra le traiettorie - Urbano

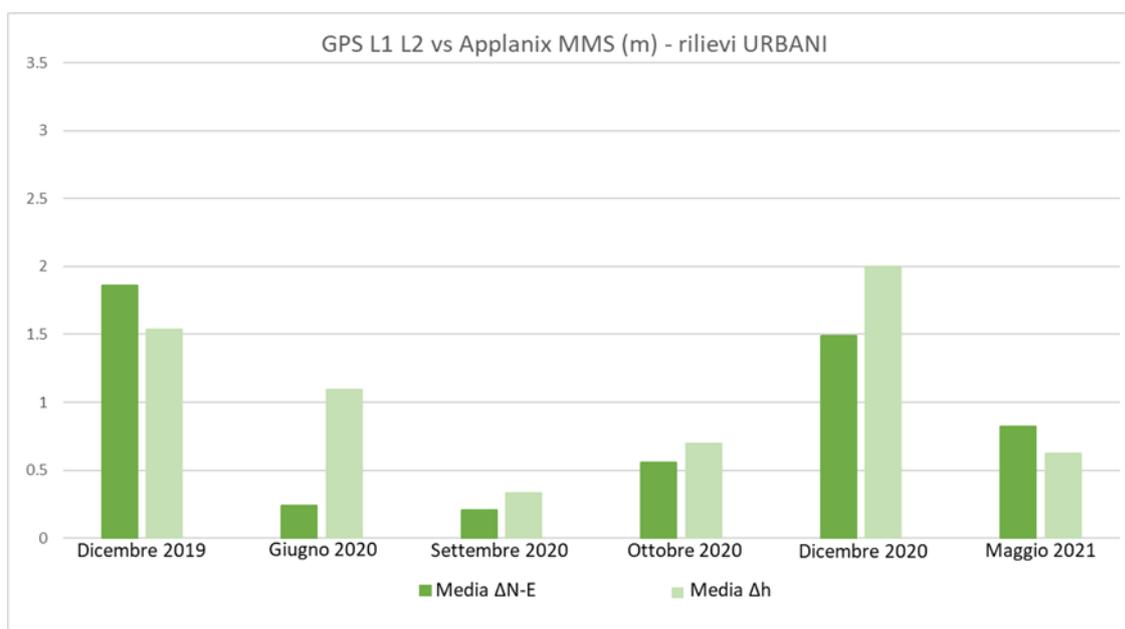


Figura 4.142 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

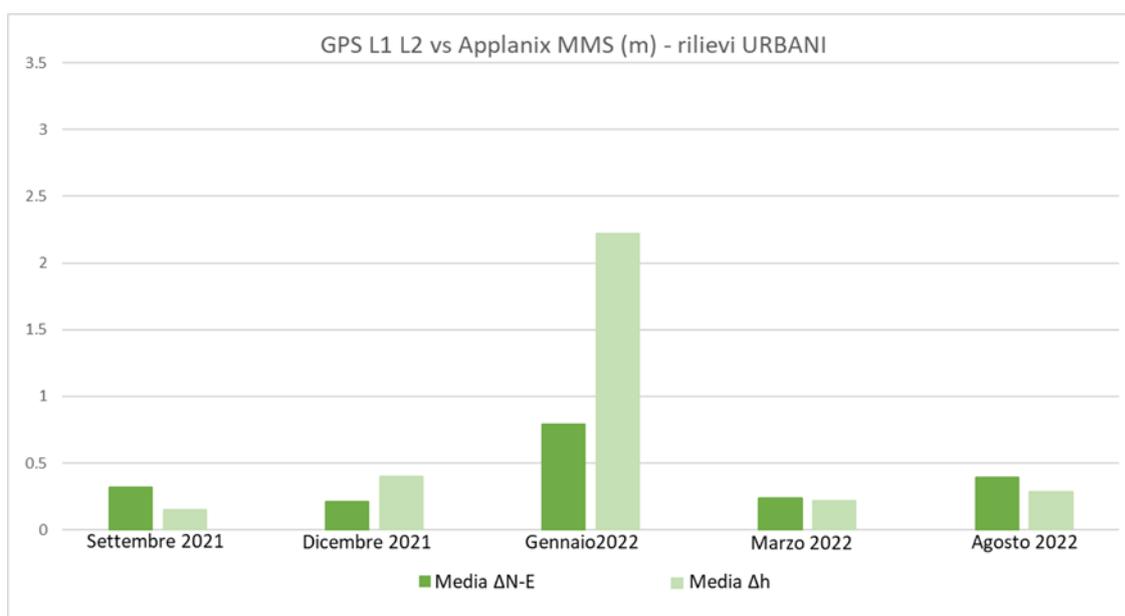


Figura 4.143 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Come si può vedere dai grafici in Figura 4.142 e Figura 4.143, ogni campagna di misura presenta valori anche significativamente differenti rispetto alle altre. Ciò è dovuto principalmente alle differenti condizioni in cui avvengono le misure, come ad esempio la differente disposizione dei satelliti che influisce sulla ricezione del segnale da parte del ricevitore GNSS, ma anche il numero e la durata delle soste statiche causate dal traffico, che variano da campagna a campagna, così come la traiettoria seguita.

4.3.1.1.2. Galileo E1 E5b - Differenze planimetriche tra le traiettorie - Urbano

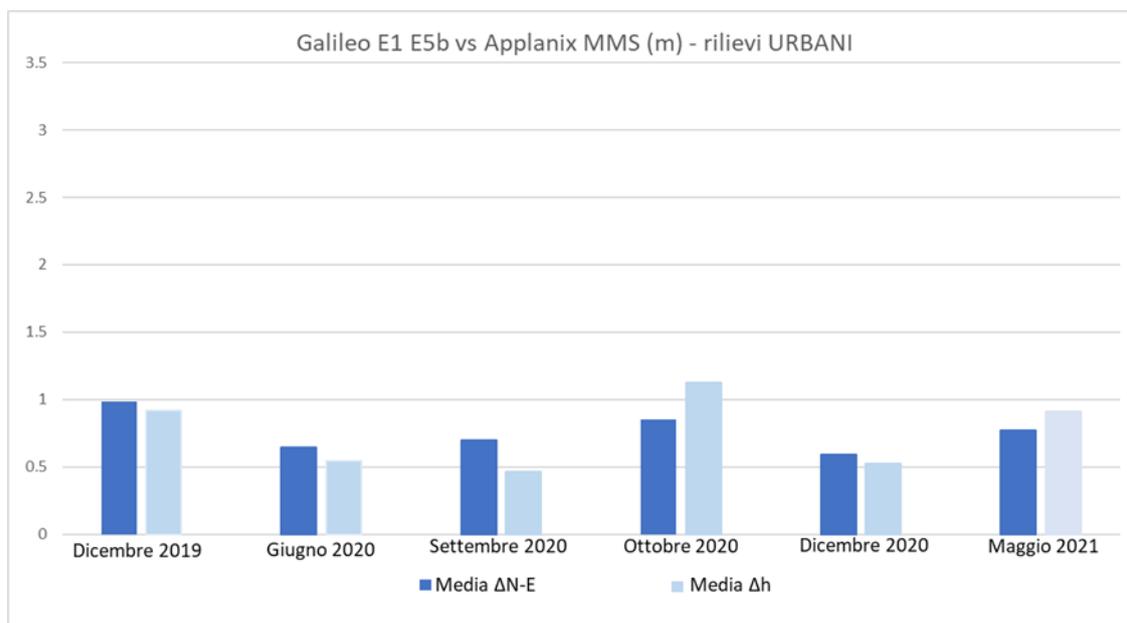


Figura 4.144 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

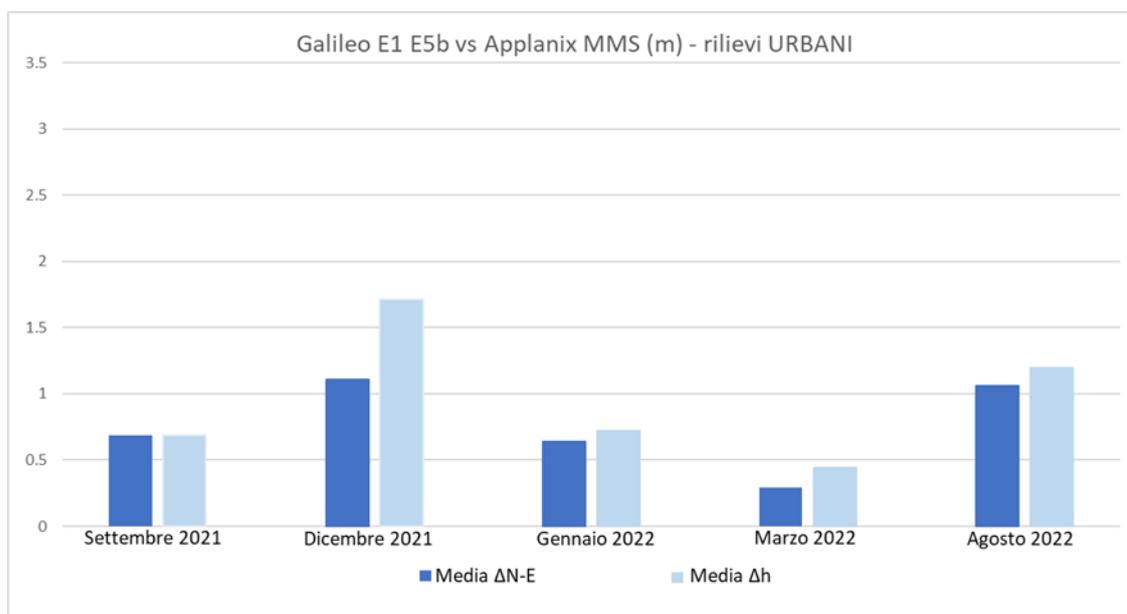


Figura 4.145 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Quanto osservato per il sistema satellitare GPS vale anche per il sistema satellitare Galileo, nei grafici in Figura 4.144 e in Figura 4.145 si osserva che le differenze planimetriche e altimetriche tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento presentano un andamento variabile nel tempo.

4.3.1.1.3. Differenze planimetriche, deviazione standard, numero di epoche, numero medio di satelliti e PDOP – confronto diretto Galileo - GPS

Volendo effettuare un confronto diretto fra il sistema satellitare GPS e quello Galileo, si sono tracciati i grafici riportati da Figura 4.146 a Figura 4.149, che riportano anche la deviazione standard per ogni campagna:

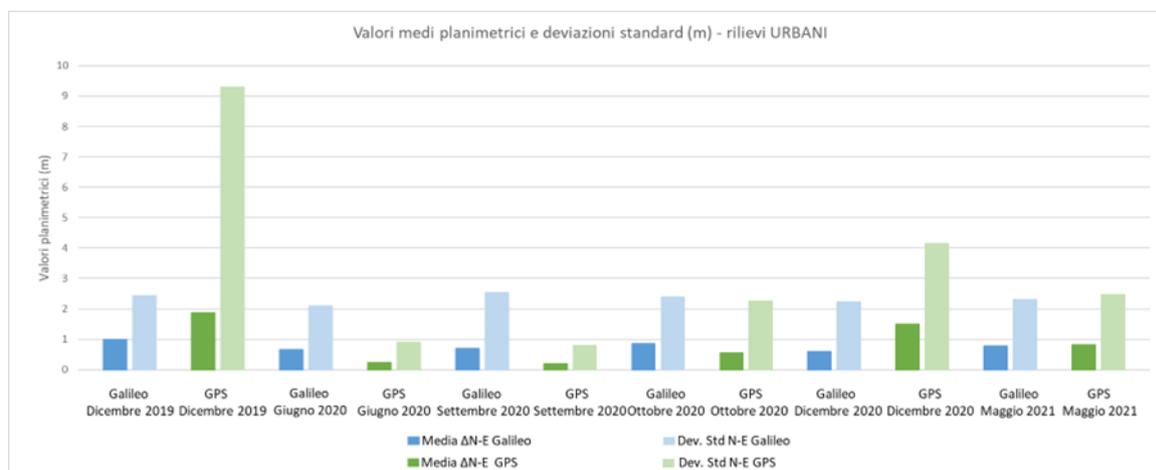


Figura 4.146 Differenze planimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

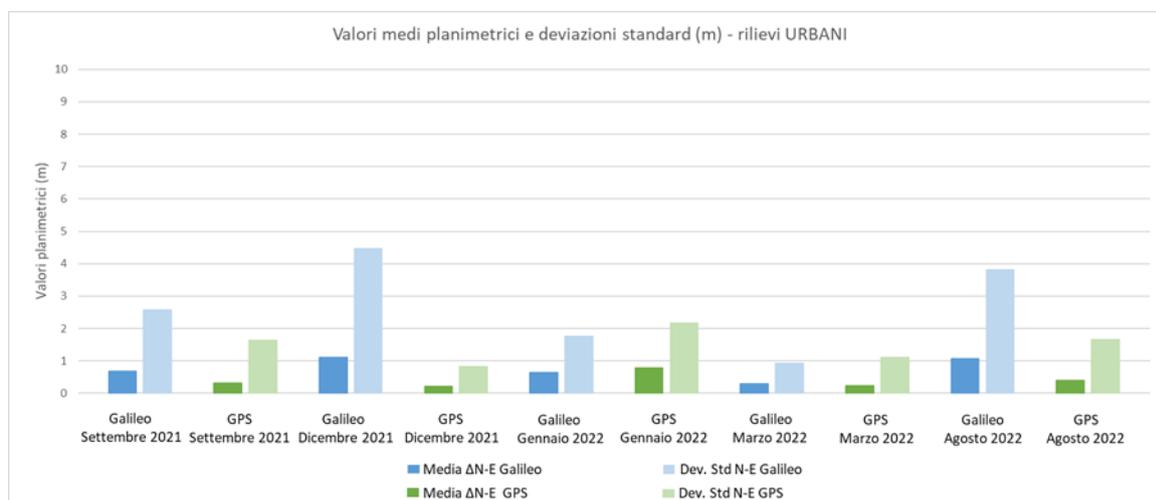


Figura 4.147 Differenze planimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai confronti planimetrici si evince che in quattro campagne su undici (dicembre 2019, dicembre 2020, maggio 2021, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere generalmente prestazioni migliori rispetto al sistema satellitare GPS.

Nella campagna di misura di dicembre 2019 il sistema satellitare GPS manifesta una deviazione standard molto alta rispetto a tutte le altre campagne di misura.

Anche il sistema satellitare Galileo in alcune campagne di misura presenta deviazioni standard più alte rispetto alle altre campagne, come nelle campagne di dicembre 2021 e agosto 2022.

Per quanto riguarda i dati planimetrici, nelle campagne in esame il sistema satellitare Galileo presenta deviazioni standard più basse del sistema GPS in cinque campagne: dicembre 2019, dicembre 2020, maggio 2021, gennaio 2022 e marzo 2022.

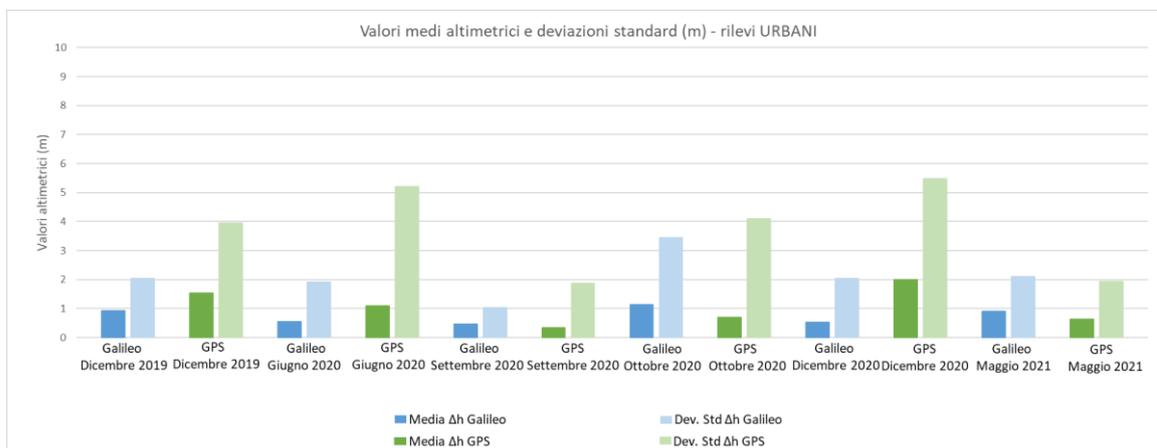


Figura 4.148 Differenze altimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

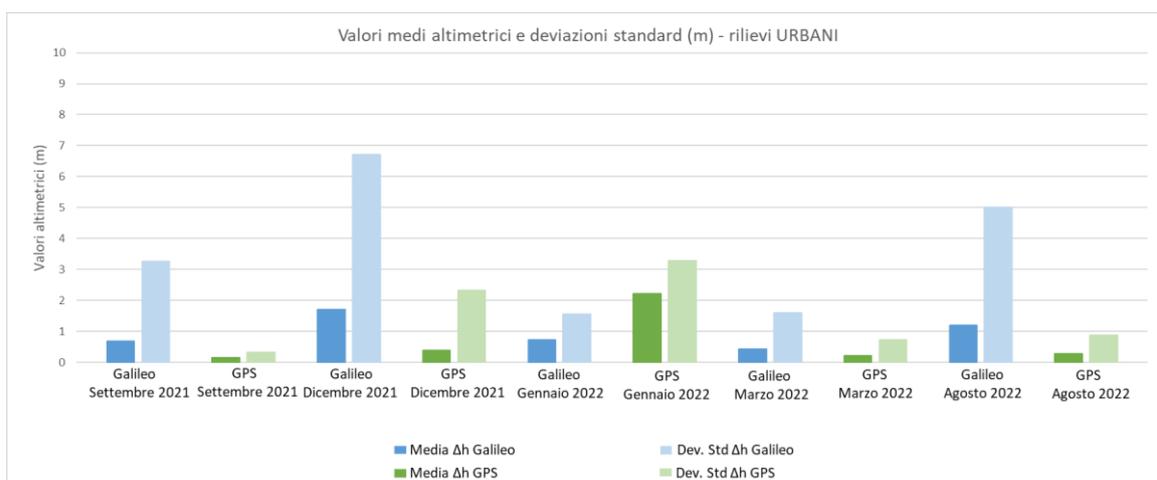


Figura 4.149 Differenze altimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai confronti altimetrici si evince che in quattro campagne su undici (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni migliori rispetto al sistema satellitare GPS.

Per quanto riguarda le deviazioni standard dei dati altimetrici, nelle campagne in esame il sistema satellitare Galileo presenta valori più bassi del sistema GPS in sei campagne: dicembre 2019, giugno 2020, settembre 2020, ottobre 2020, dicembre 2020, gennaio 2022. Tutte queste considerazioni devono tener conto del numero di epoche in cui è stato possibile calcolare una posizione. Per questo motivo si sono tracciati i grafici relativi al

numero di epoche in cui è stato possibile ottenere una soluzione (Figura 4.150 e Figura 4.151).

In sette campagne (dicembre 2019, ottobre 2020, maggio 2021, settembre 2021, dicembre 2021, gennaio 2022, marzo 2022) il numero di epoche per cui è stato possibile calcolare una posizione con il sistema satellitare Galileo è stato maggiore rispetto a quanto ottenuto utilizzando il sistema GPS, come si può vedere nei grafici sottostanti.

Dai grafici si può notare anche che la differenza fra il numero di epoche calcolate utilizzando i due sistemi è in ogni caso non eccessiva sia quando si ha un maggiore numero di epoche calcolate con il sistema GPS che con il sistema Galileo.

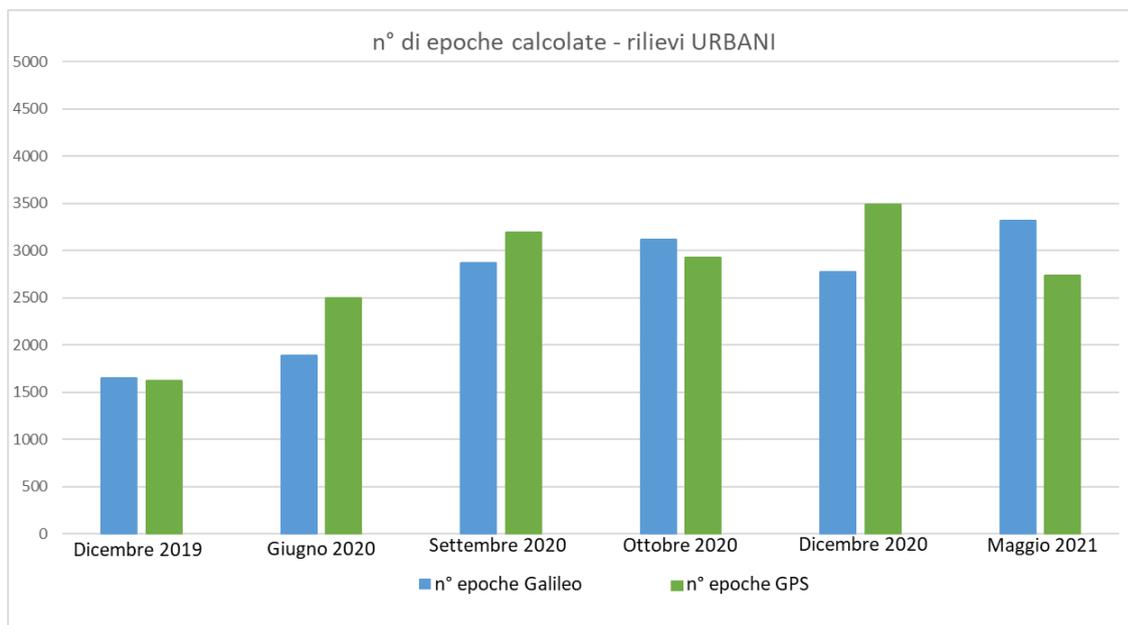


Figura 4.150 n° di epoche calcolate con i dati Galileo e GPS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

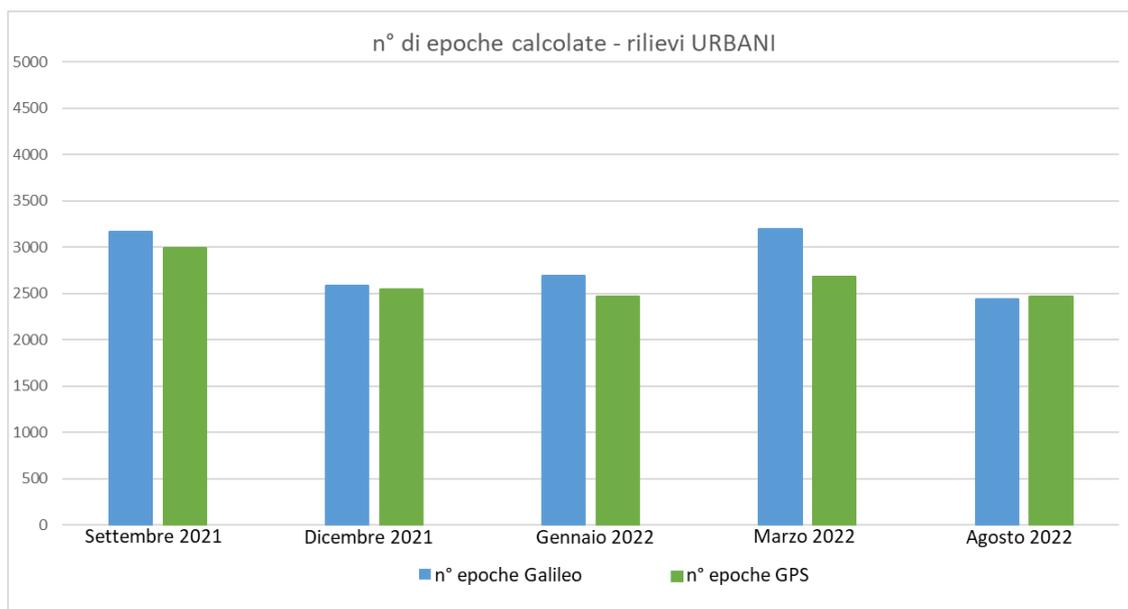


Figura 4.151 n° di epoche calcolate con i dati Galileo e GPS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Nei due grafici riportati in Figura 4.152 e Figura 4.153 sono invece riportati il n° di satelliti e i PDOP medi delle campagne di misura:

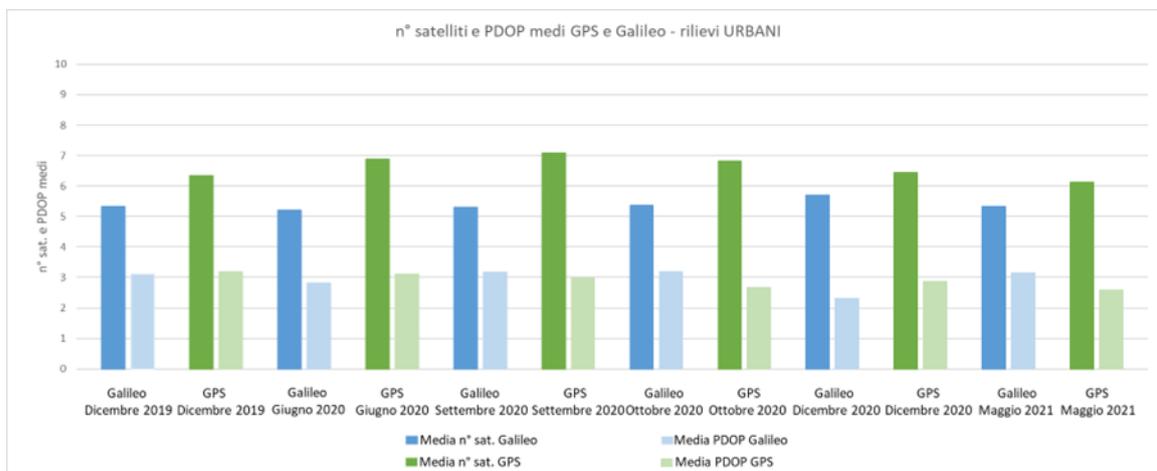


Figura 4.152 n° satelliti e PDOP medi Galileo e GPS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

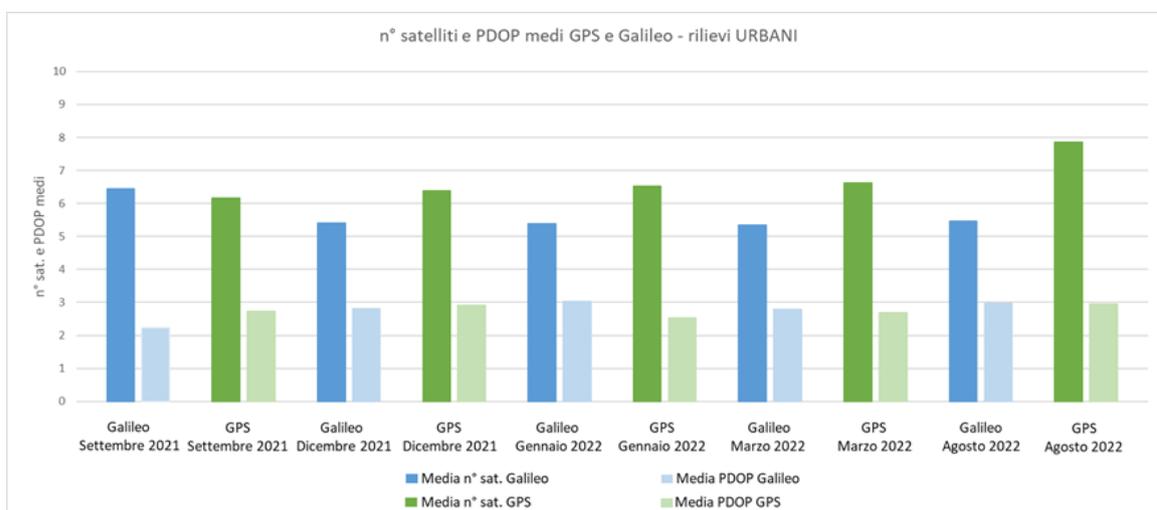


Figura 4.153 n° satelliti e PDOP medi Galileo e GPS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai grafici in Figura 4.152 e Figura 4.153 risulta evidente che il numero medio di satelliti Galileo visibili è sempre minore rispetto a quelli GPS ad esclusione della campagna di settembre 2021. Questi dati rispecchiano la fase di completamento del segmento spaziale attualmente in corso, come illustrato nel paragrafo 2.5.2. Il sistema satellitare GPS presentava in tutte le campagne di misura un numero di satelliti operativi maggiore rispetto a quello del sistema satellitare Galileo (31 satelliti operativi GPS e 23 satelliti operativi Galileo a novembre 2022).

Nonostante ciò per ben cinque campagne (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2020, settembre 2021, dicembre 2021) il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere un PDOP medio più basso.

4.3.1.2. GPS L1 L2 + GLONASS G1 G2 Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Urbano

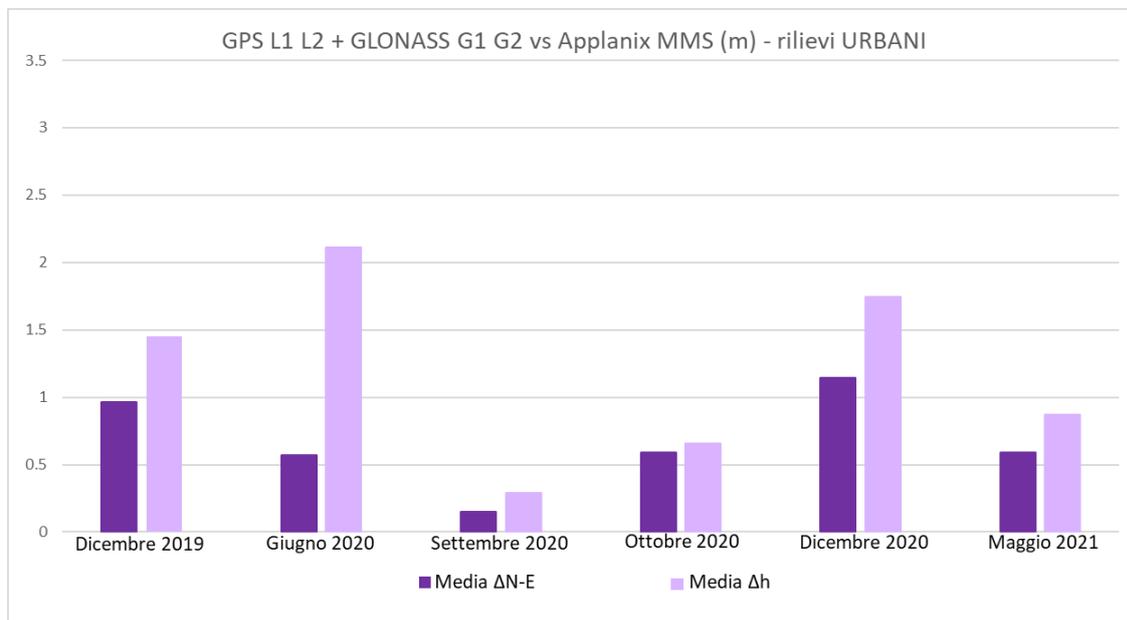


Figura 4.154 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrion e MMS per i dati GPS + GLONASS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

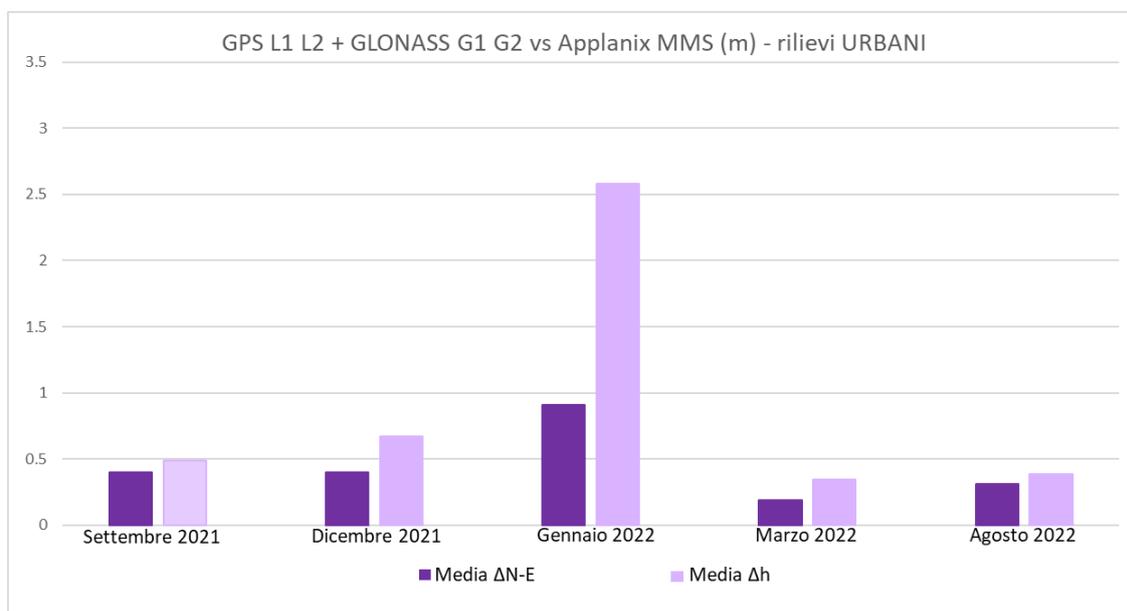


Figura 4.155 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrion e MMS per i dati GPS + GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

Come osservato per il sistema satellitare GPS e Galileo, le differenze altimetriche e planimetriche tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento presentano un andamento variabile nel tempo. In particolare si nota come questo andamento riprenda quello ottenuto con il solo sistema GPS (Figura 4.142 e Figura 4.143).

Confrontando i dati planimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS si osserva che in due campagne (dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per

cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni migliori rispetto alla combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS.

Confrontando i dati altimetrici Galileo con quelli della combinazione GPS+GLONASS si osserva che in quattro campagne (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni migliori.

Si sono quindi tracciati i grafici relativi alle deviazioni standard relative ai confronti planimetrici ed altimetrici (Figura 4.156 e Figura 4.157):

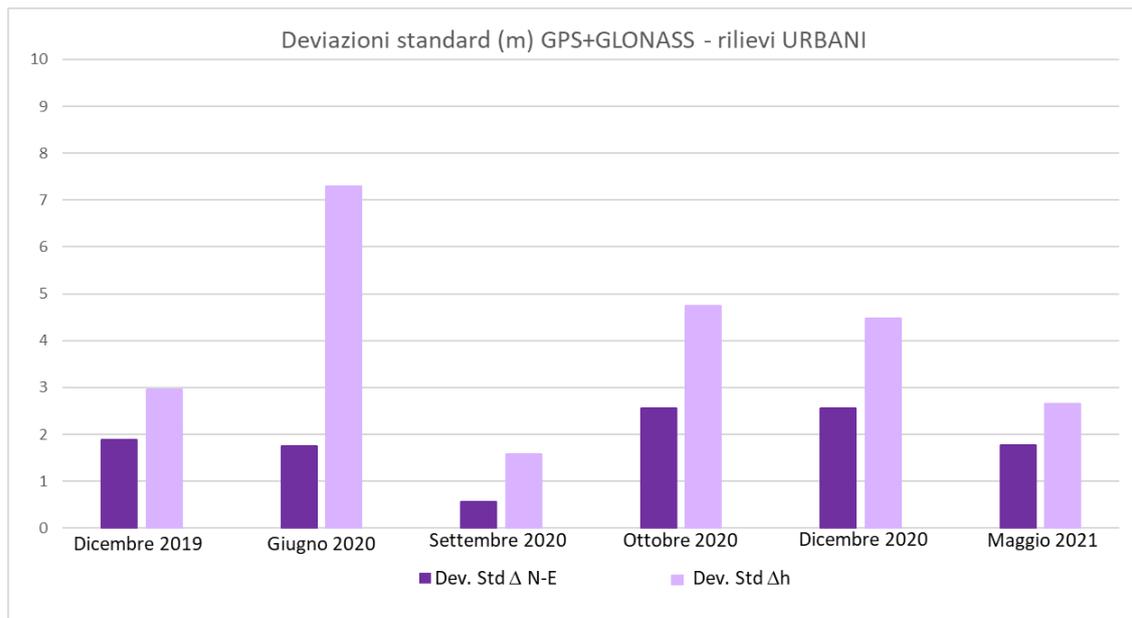


Figura 4.156 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano – Dicembre 2021 - Maggio 2021

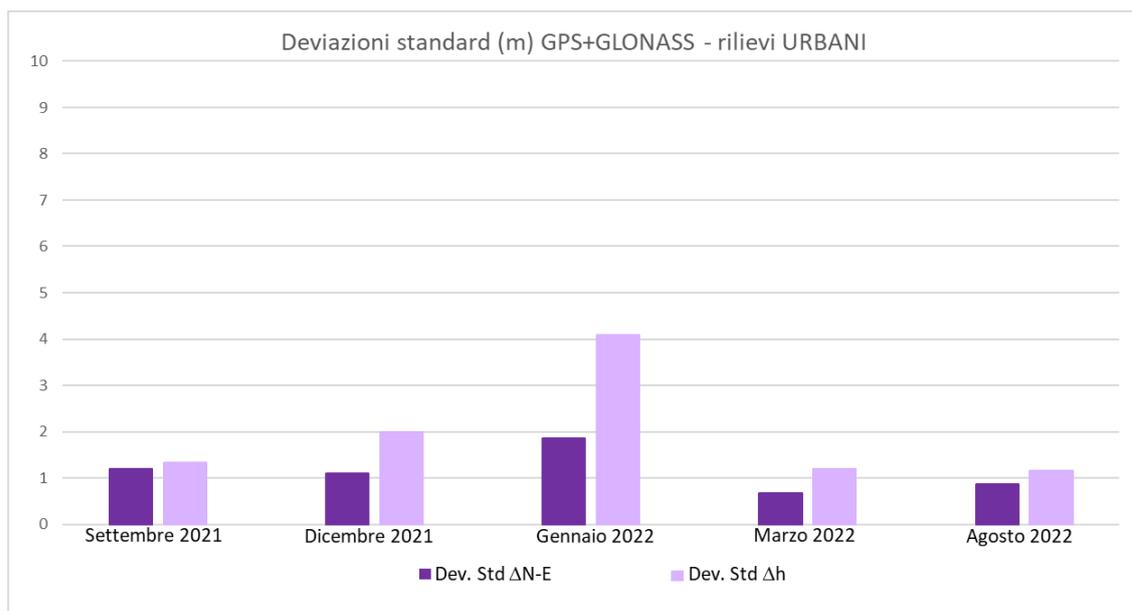


Figura 4.157 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai grafici sopra riportati (Figura 4.156 e Figura 4.157) è possibile notare che in tre campagne (ottobre 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere deviazioni standard planimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS. In sette campagne (dicembre 2019, giugno, settembre, ottobre, dicembre 2020, maggio 2021, gennaio 2022), il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere deviazioni standard altimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS.

Si riportano ora i grafici relativi al numero di epoche in cui è stato possibile calcolare una posizione (Figura 4.158 e Figura 4.159):

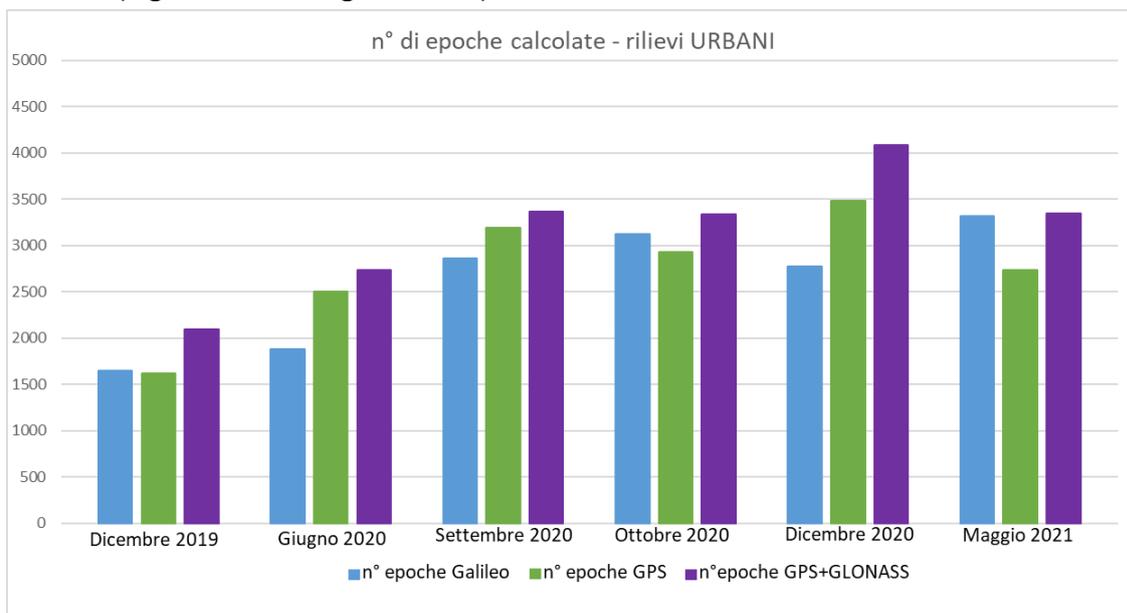


Figura 4.158 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

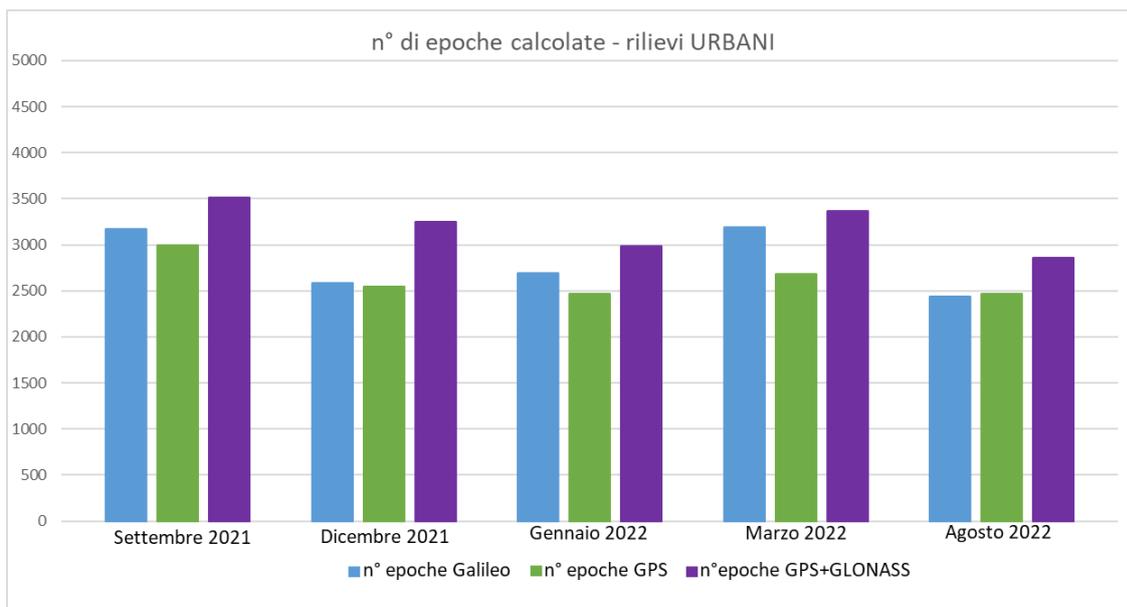


Figura 4.159 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Come si può vedere nei grafici soprastanti, il numero di epoche per cui è stato possibile calcolare una posizione utilizzando congiuntamente i sistemi satellitari GPS e GLONASS è risultato essere maggiore rispetto a quanto ottenuto utilizzando sia il solo sistema GPS che il solo sistema Galileo per tutte le campagne.

Dai grafici si può notare anche che la differenza fra il numero di epoche calcolate utilizzando la combinazione GPS+GLONASS e il numero di epoche calcolate con il sistema Galileo è per la maggior parte delle campagne non elevata.

Nei due grafici seguenti (Figura 4.160 e Figura 4.161) sono invece riportati il n° di satelliti e i PDOP medi delle campagne di misura ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS:

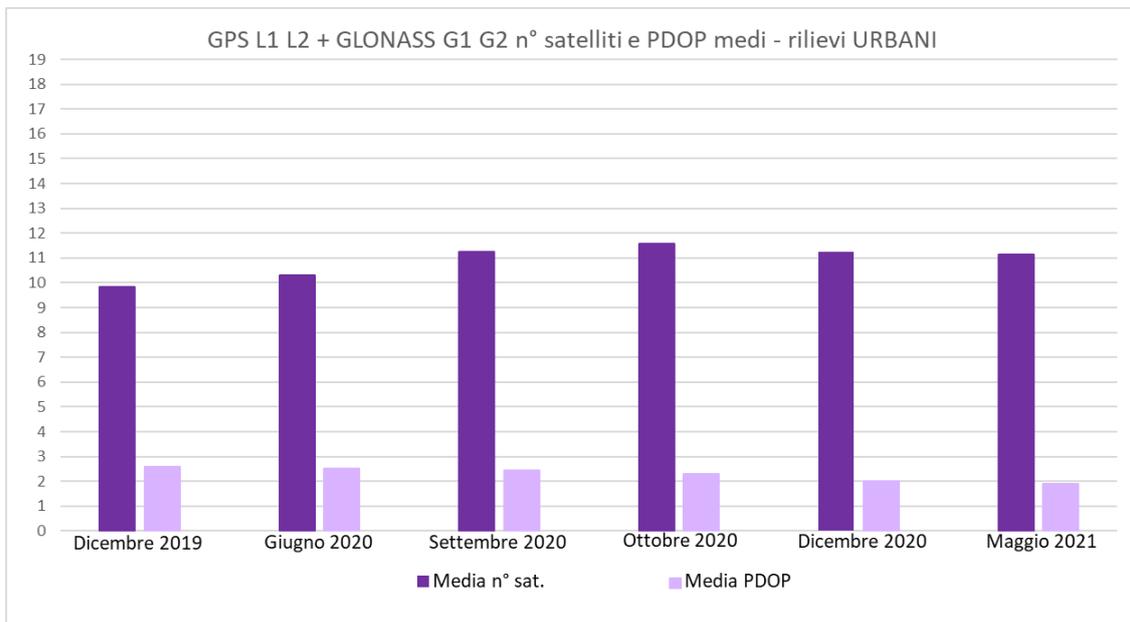


Figura 4.160 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

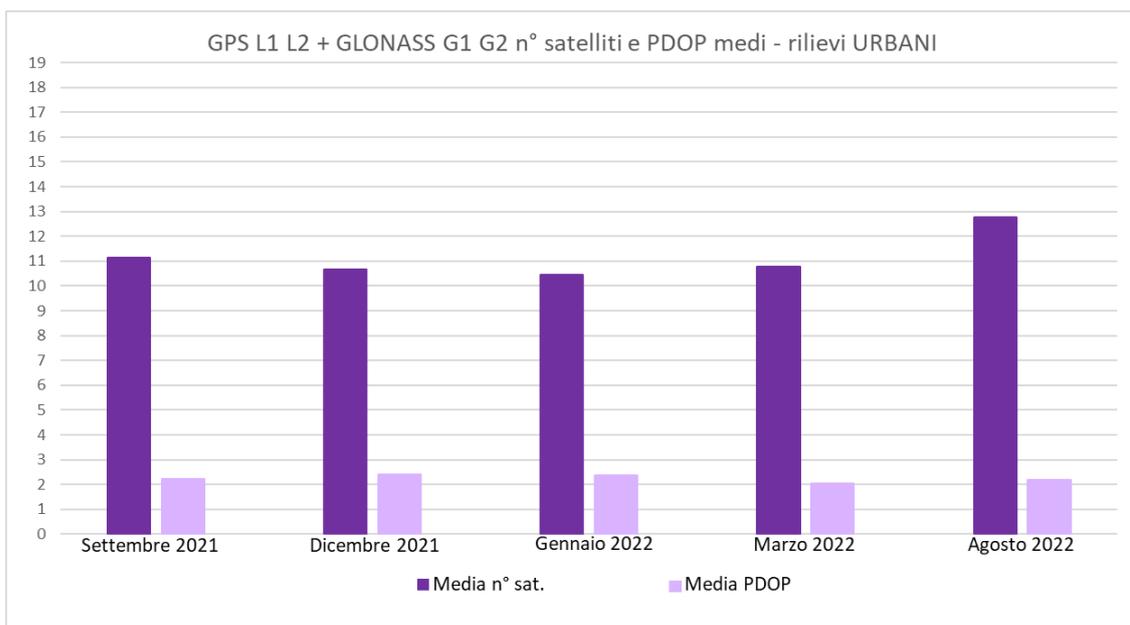


Figura 4.161 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

Utilizzando congiuntamente i dati dei sistemi satellitari GPS e GLONASS il numero di satelliti medio è prevedibilmente sempre maggiore rispetto al numero di satelliti medio Galileo. Ciononostante i valori medi dei PDOP ottenuti con il sistema satellitare Galileo non si discostano di molto rispetto ai PDOP ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS.

4.3.1.3. GPS L1 L2 + Galileo E1 E5b Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Urbano

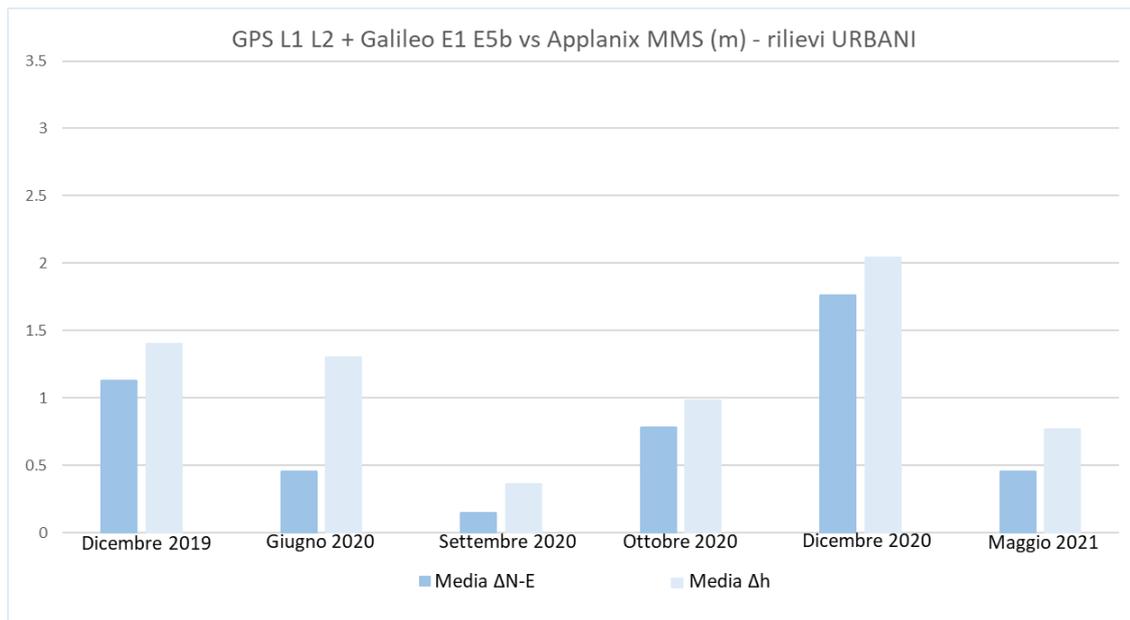


Figura 4.162 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

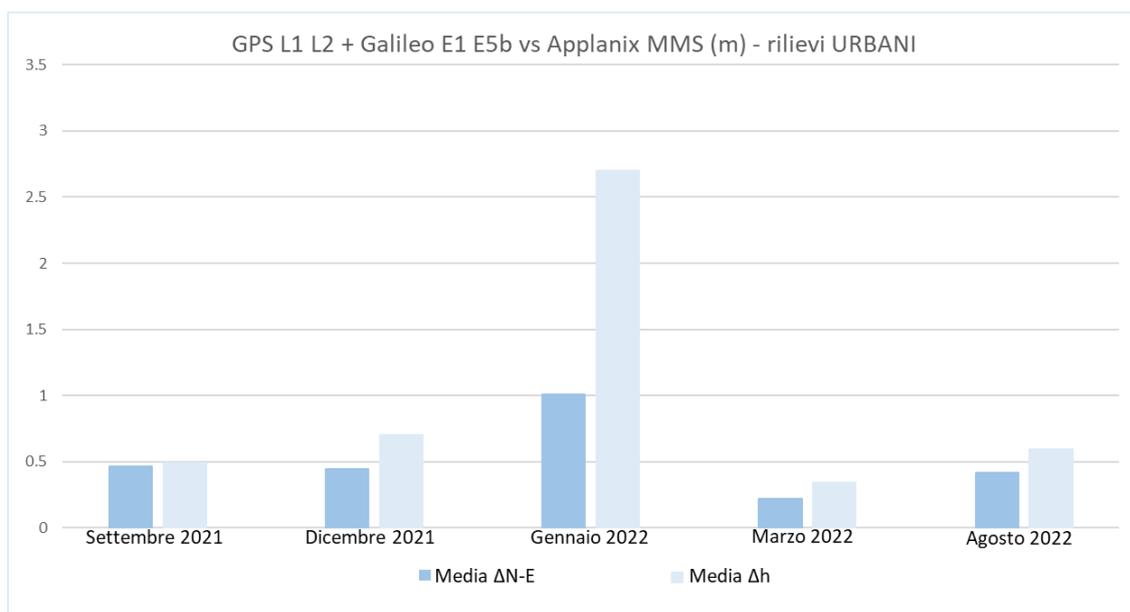


Figura 4.163 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

Come già osservato per il sistema satellitare GPS+GLONASS, le differenze altimetriche e planimetriche tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento presentano un andamento variabile nel tempo che riprende quello ottenuto con il solo sistema GPS (Figura 4.142 e Figura 4.143).

Confrontando i dati planimetrici Galileo con quelli della combinazione GPS+Galileo si osserva che in tre campagne (dicembre 2019, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni migliori.

Confrontando i dati altimetrici Galileo con quelli GPS+Galileo si osserva che in quattro campagne (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni migliori.

Si sono quindi tracciati i grafici relativi alle deviazioni standard relative ai confronti planimetrici ed altimetrici.

Dai grafici riportati di seguito (Figura 4.164 e Figura 4.165) è possibile notare che in tre campagne (ottobre 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere deviazioni standard planimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+Galileo.

In sei campagne (dicembre 2019, giugno, settembre, ottobre, dicembre 2020, gennaio 2022), le deviazioni standard altimetriche ottenute con i dati Galileo risultano minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+Galileo.

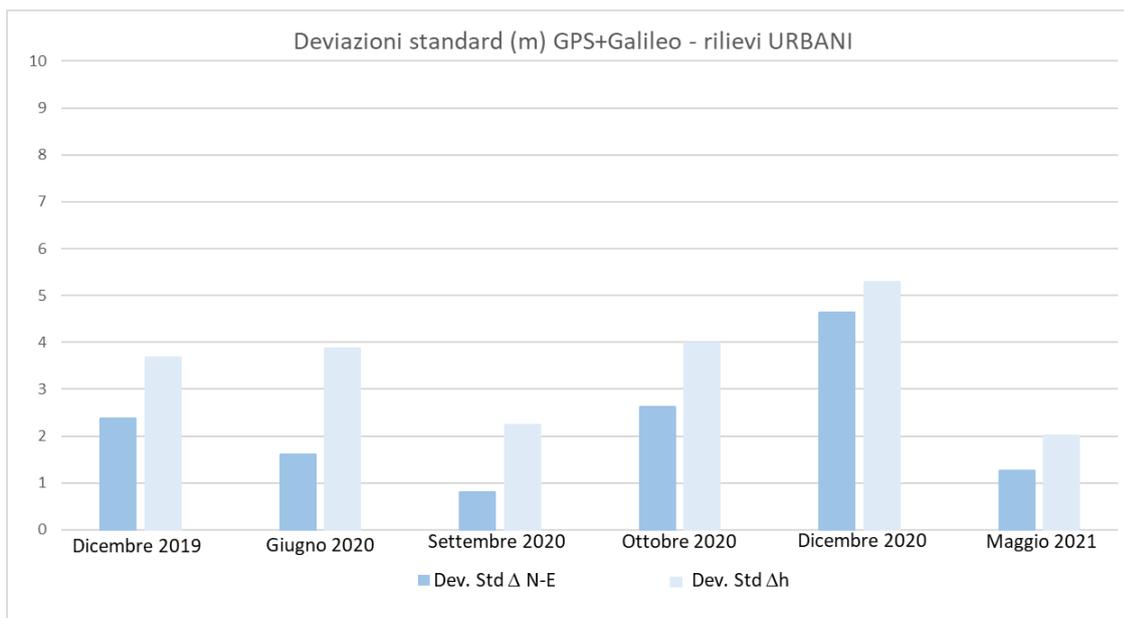


Figura 4.164 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2021 - Maggio 2021

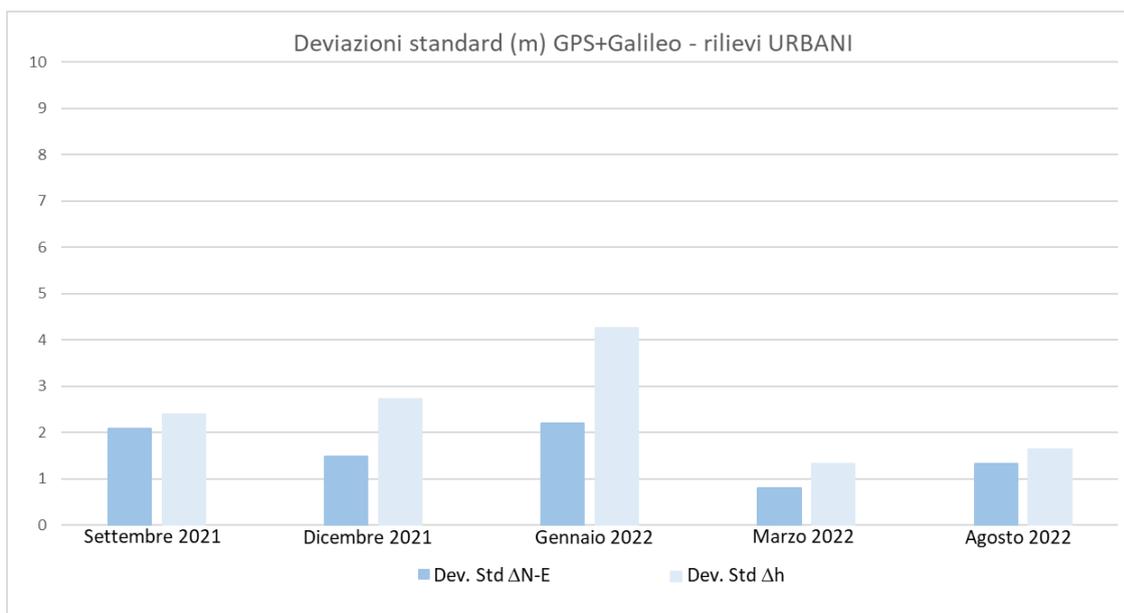


Figura 4.165 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Si sono quindi tracciati i grafici relativi al numero di epoche in cui è stato possibile calcolare una posizione.

Come si può vedere nei grafici sottostanti (Figura 4.166 e Figura 4.167), il numero di epoche per cui è stato possibile calcolare una posizione utilizzando congiuntamente i sistemi satellitari GPS e Galileo è risultato essere maggiore rispetto a quanto ottenuto utilizzando sia il solo sistema GPS che il solo sistema Galileo, ma anche rispetto alla combinazione GPS+GLONASS per tutte le campagne.

Dai grafici si può notare anche che la differenza fra il numero di epoche calcolate utilizzando la combinazione GPS+Galileo e il numero di epoche calcolate con il sistema Galileo è apprezzabile per la maggior parte delle campagne.

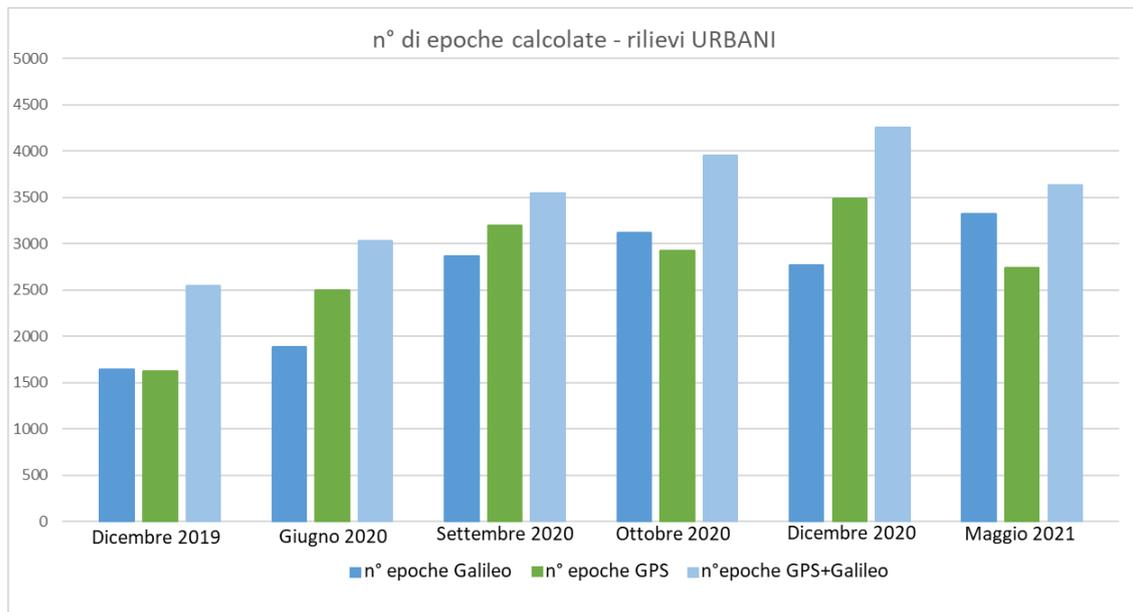


Figura 4.166 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

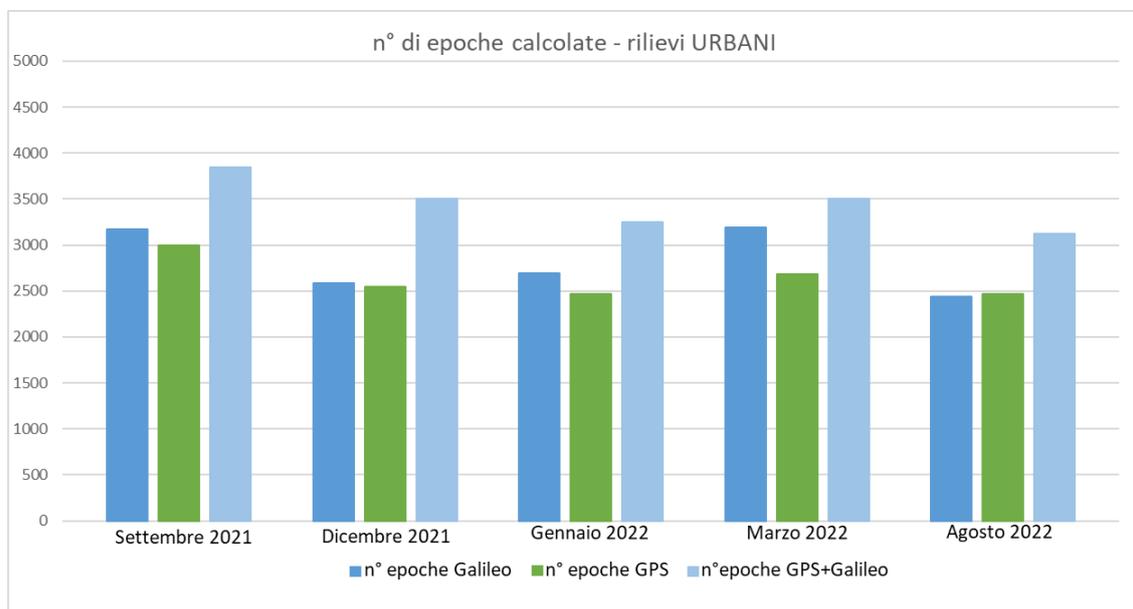


Figura 4.167 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Nei due grafici seguenti (Figura 4.168 e Figura 4.169) sono invece riportati il n° di satelliti e i PDOP medi delle campagne di misura ottenuti con la combinazione GPS+Galileo. Analogamente a quanto visto con la combinazione GPS+GLONASS, i valori medi dei PDOP ottenuti con il sistema satellitare Galileo non si discostano di molto rispetto ai PDOP ottenuti con la combinazione GPS+Galileo.

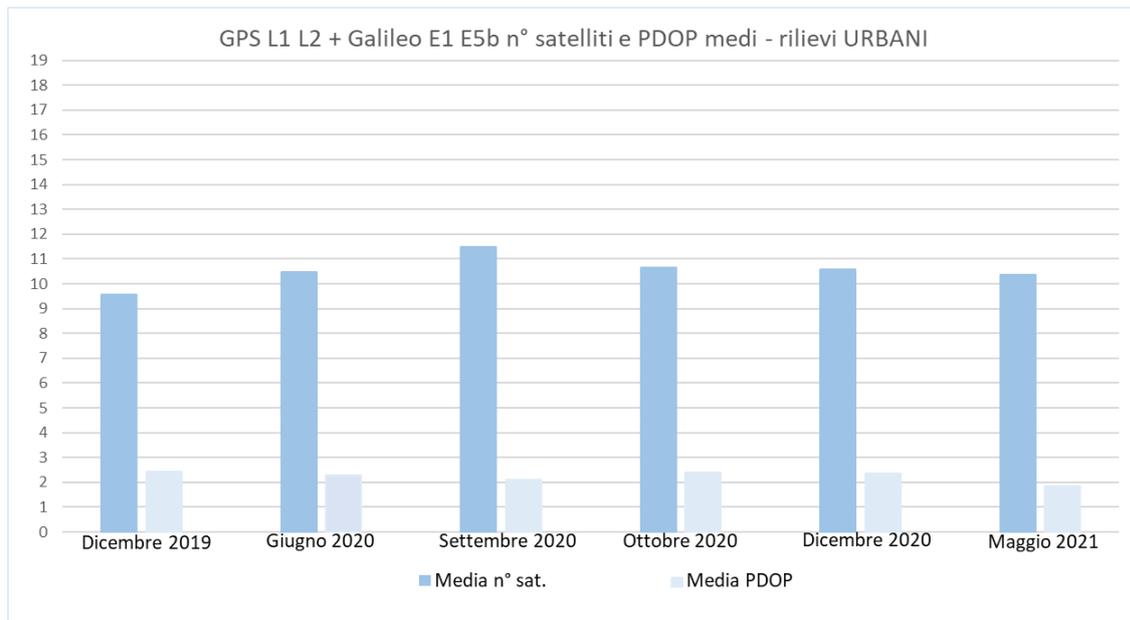


Figura 4.168 n° satelliti e PDOP medi GPS + Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

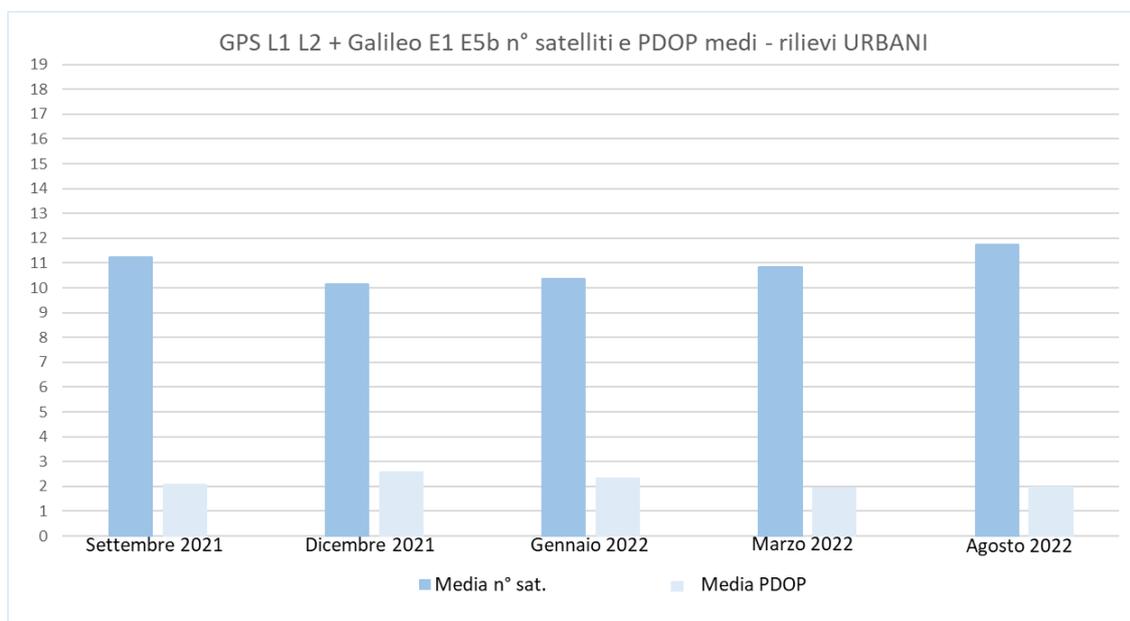


Figura 4.169 n° satelliti e PDOP medi GPS + Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

4.3.1.4. GPS L1 L2 + GLONASS G1 G2 + Galileo E1 E5b Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Urbano

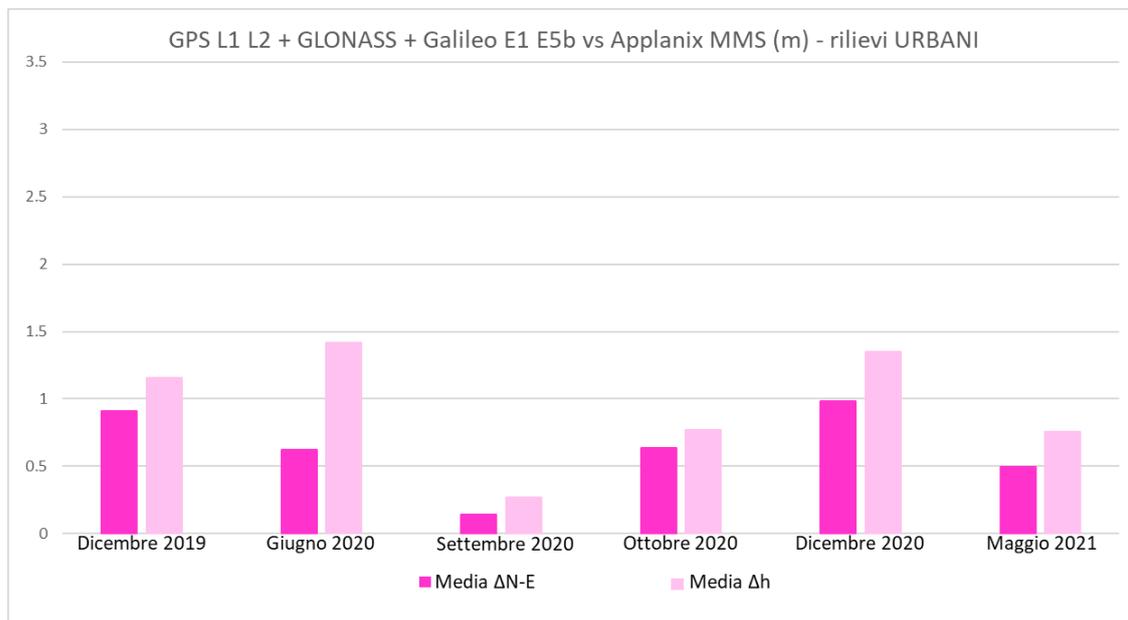


Figura 4.170 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS + Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

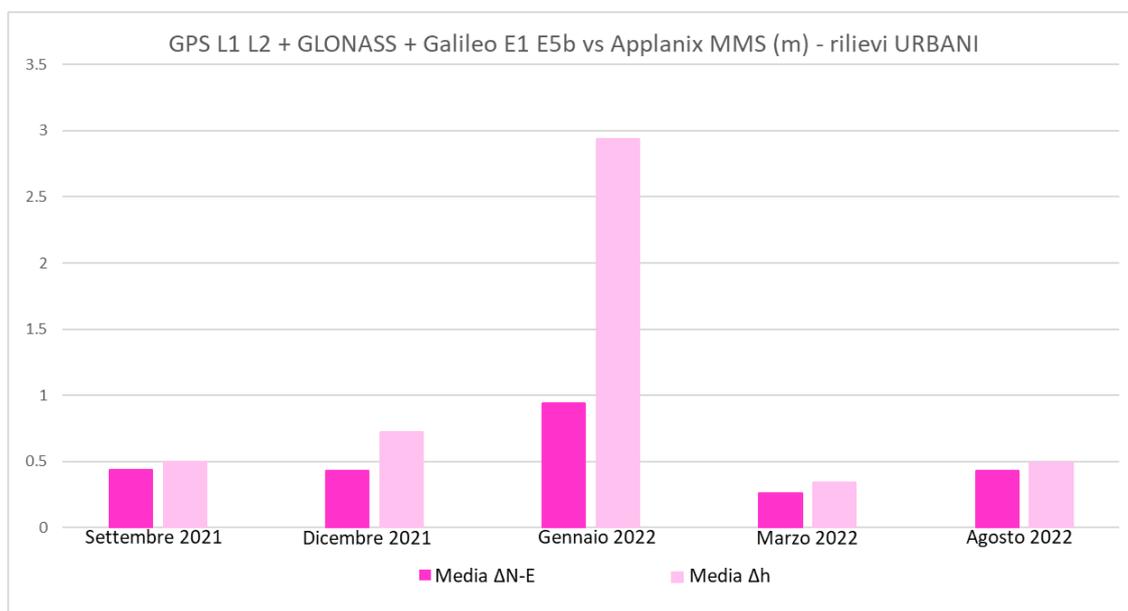


Figura 4.171 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche medie (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS + Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

Come già osservato per il sistema satellitare GPS+GLONASS e GPS+Galileo, le differenze altimetriche e planimetriche tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento presentano un andamento variabile nel tempo che riprende quello ottenuto con il solo sistema GPS (Figura 4.142 e Figura 4.143).

Confrontando i dati planimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS+Galileo si osserva che in due campagne (dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, ha permesso di ottenere valori medi più contenuti.

Confrontando i dati altimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS+Galileo si osserva che in quattro campagne (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere valori medi più bassi.

Si sono quindi tracciati i grafici relativi alle deviazioni standard relative ai confronti planimetrici ed altimetrici (Figura 4.172 e Figura 4.173).

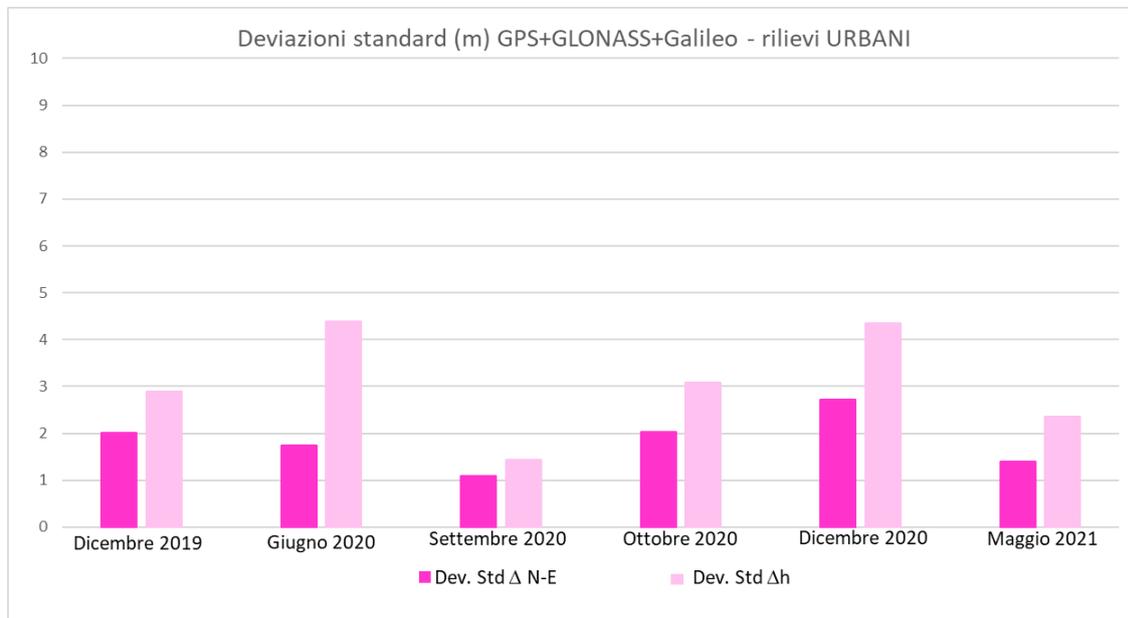


Figura 4.172 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

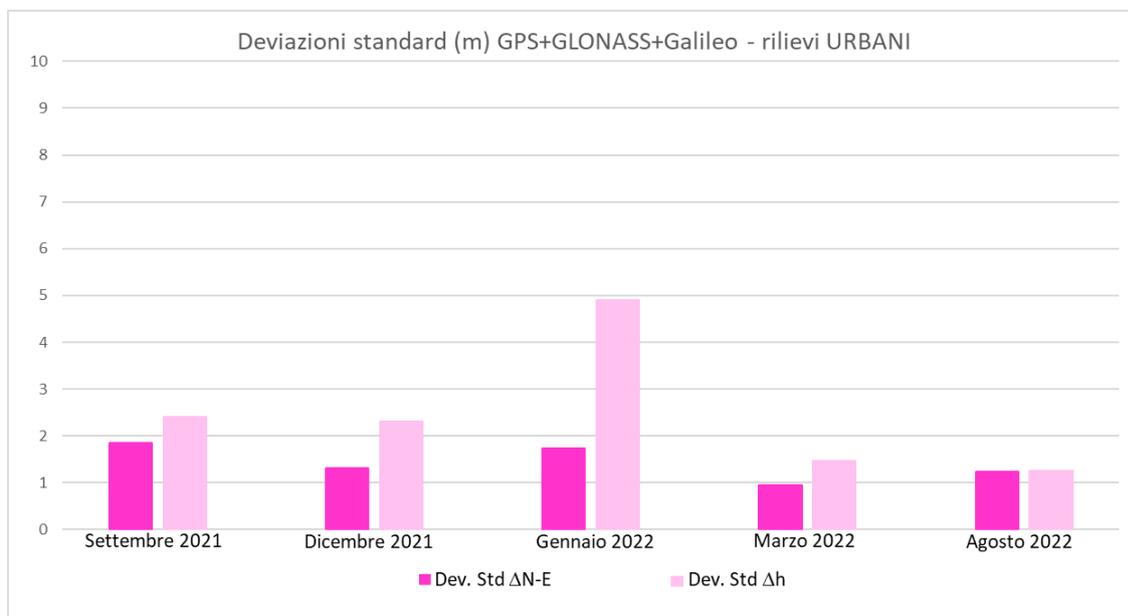


Figura 4.173 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai grafici sopra riportati (Figura 4.172 e Figura 4.173) è possibile notare che in due campagne (dicembre 2020, marzo 2022) il sistema satellitare Galileo, ha permesso di ottenere deviazioni standard planimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la

combinazione GPS+GLONASS+Galileo. In sei campagne (dicembre 2019, giugno, settembre, dicembre 2020, maggio 2021, gennaio 2022), Galileo ha permesso di ottenere deviazioni standard altimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo.

Sono stati quindi tracciati i grafici relativi al numero complessivo di soluzioni GPS, Galileo e GPS+GLONASS+Galileo ottenute per ciascuna campagna di misura (Figura 4.174 e Figura 4.175):

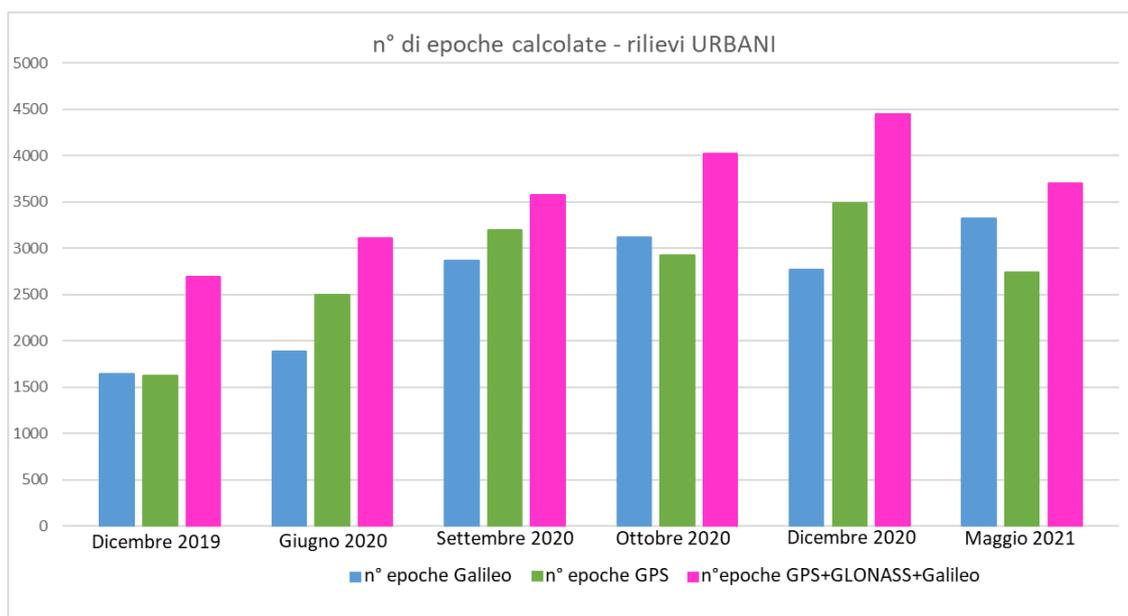


Figura 4.174 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

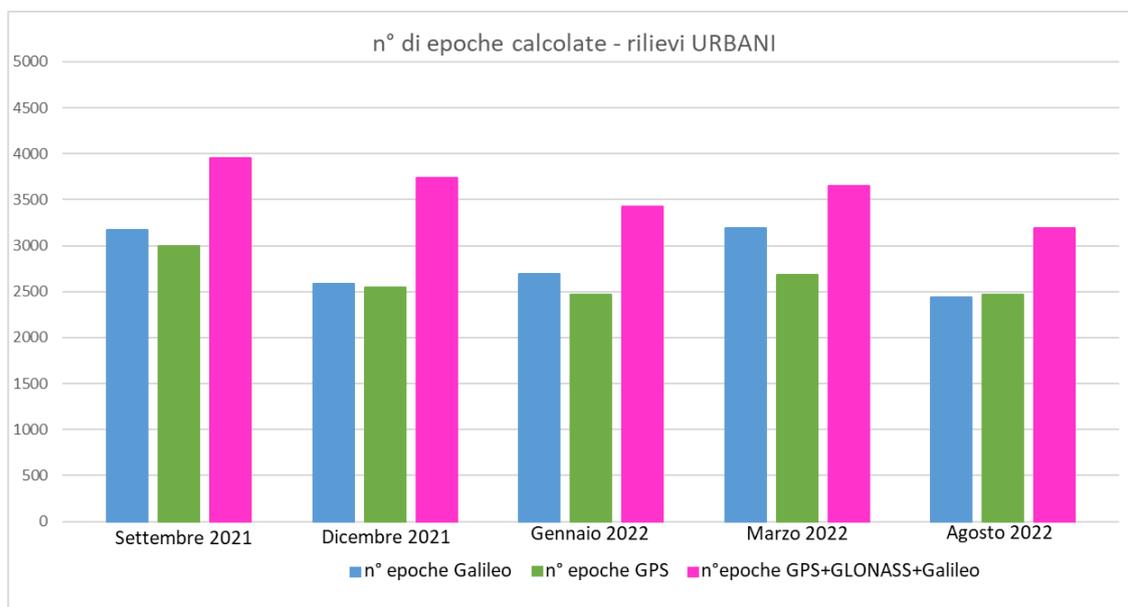


Figura 4.175 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Come si può vedere nei grafici sopra esposti (Figura 4.174 e Figura 4.175), il numero complessivo di soluzioni GPS+GLONASS+Galileo è risultato essere maggiore rispetto a

quelle solo GPS e solo Galileo, e anche rispetto alle combinazioni GPS+GLONASS e GPS+Galileo per tutte le campagne. Dai grafici si può notare anche che la differenza fra il numero di soluzioni GPS+GLONASS+Galileo e quelle solo Galileo è apprezzabile per la maggior parte delle campagne.

Nei due grafici in Figura 4.176 e Figura 4.177 sono invece riportati il n° di satelliti e i PDOP medi delle campagne di misura ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo. I valori medi dei PDOP ottenuti con il sistema satellitare Galileo come prevedibile risultano essere più elevati rispetto ai PDOP ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo.

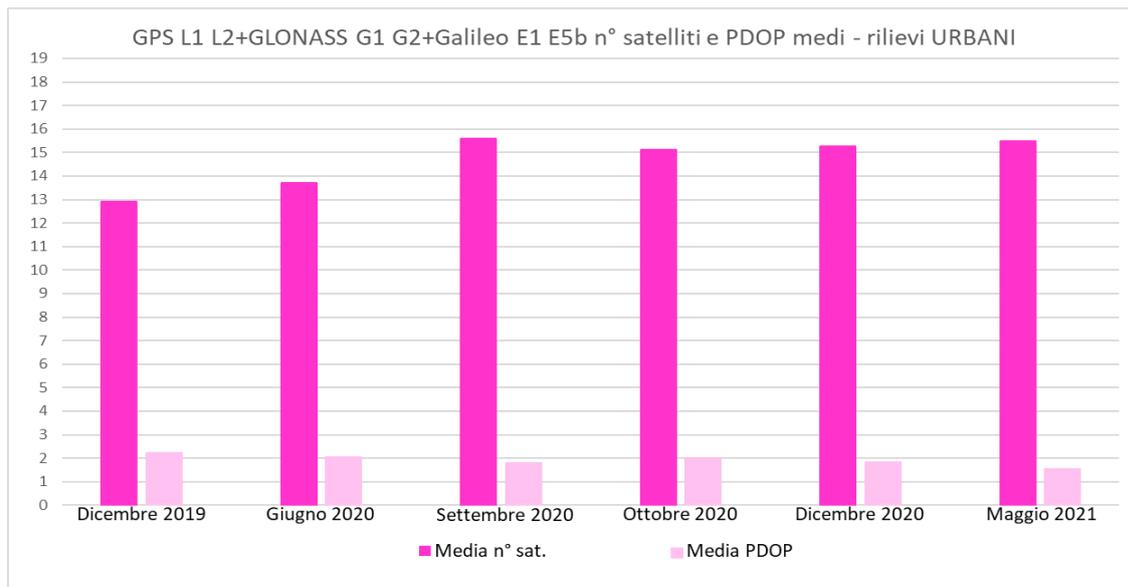


Figura 4.176 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS + Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

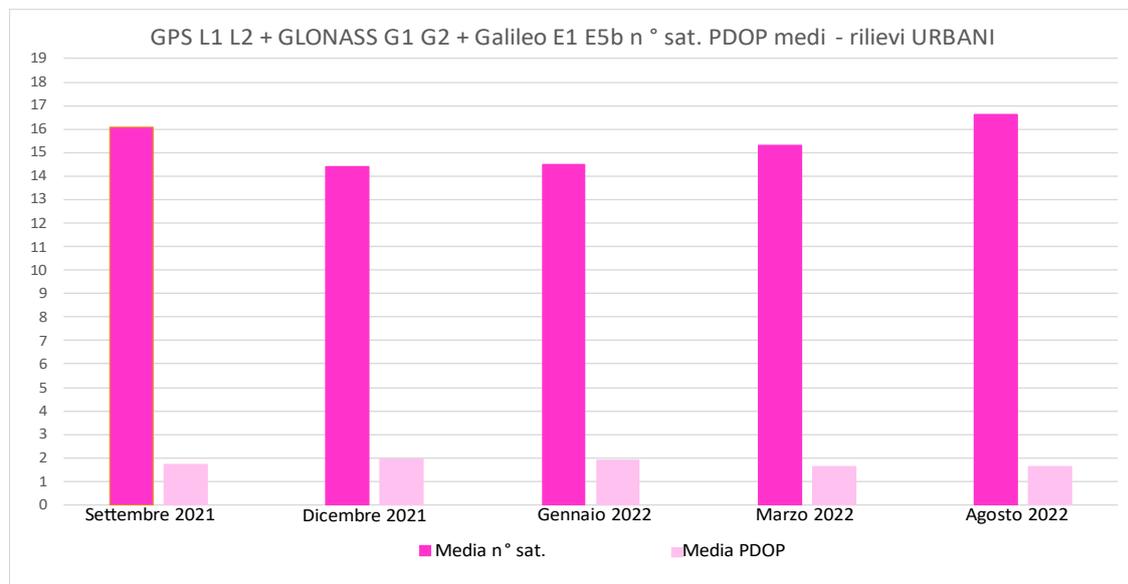


Figura 4.177 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS + Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

4.3.2. Confronti nel tempo in ambito extraurbano

In questo paragrafo si riportano i grafici ottenuti utilizzando i diversi sistemi GNSS e le loro combinazioni nelle diverse campagne di misura svolte in ambito extraurbano.

Ci si soffermerà, come già fatto per i rilievi urbani, anche su confronti maggiormente approfonditi fra le soluzioni ottenute con il sistema GPS e con il sistema Galileo.

4.3.2.1. Confronto fra i dati di posizione ottenuti con i sistemi satellitari Galileo e GPS

Analogamente a quanto svolto per i rilievi urbani, in questo paragrafo viene eseguita una prima analisi dei confronti fra le traiettorie di riferimento GPS/INS e le traiettorie calcolate utilizzando i sistemi GPS e Galileo relative al ricevitore Septentrio.

Successivamente per tutte le campagne di misura effettuate è stato eseguito un confronto diretto dei valori di posizione ottenuti utilizzando i dati delle costellazioni GPS e Galileo, sono stati creati i grafici relativi ai valori medi e di deviazione standard delle differenze in termini di componenti planimetriche e altimetriche, i grafici relativi al numero complessivo di soluzioni ottenute e ai valori medi del numero di satelliti e del PDOP.

4.3.2.1.1. GPS L1 L2 - Differenze planimetriche tra le traiettorie - Extraurbano

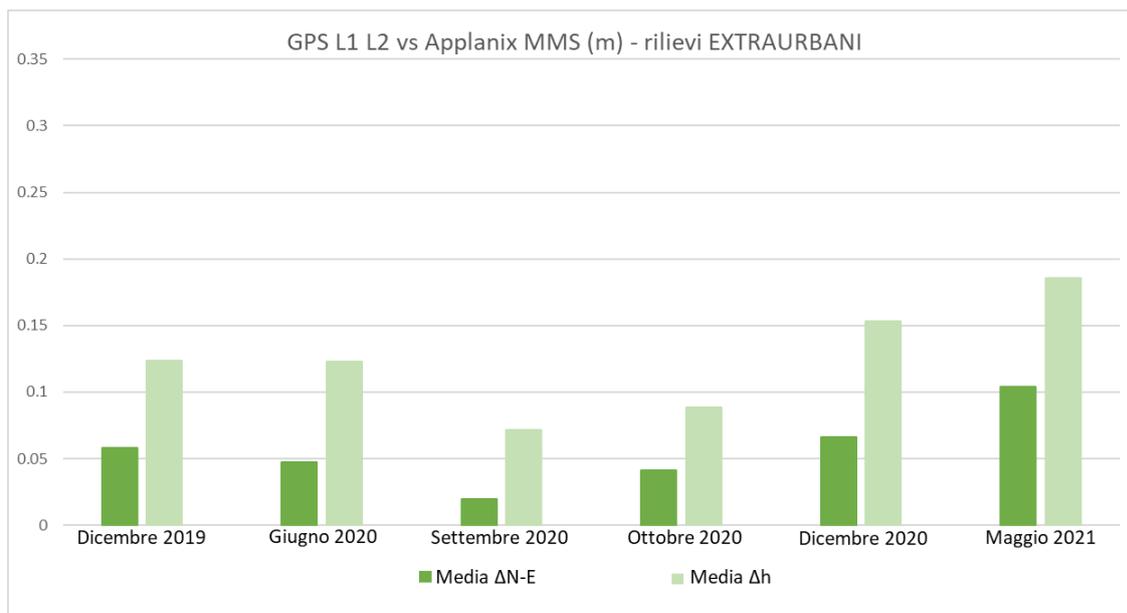


Figura 4.178 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

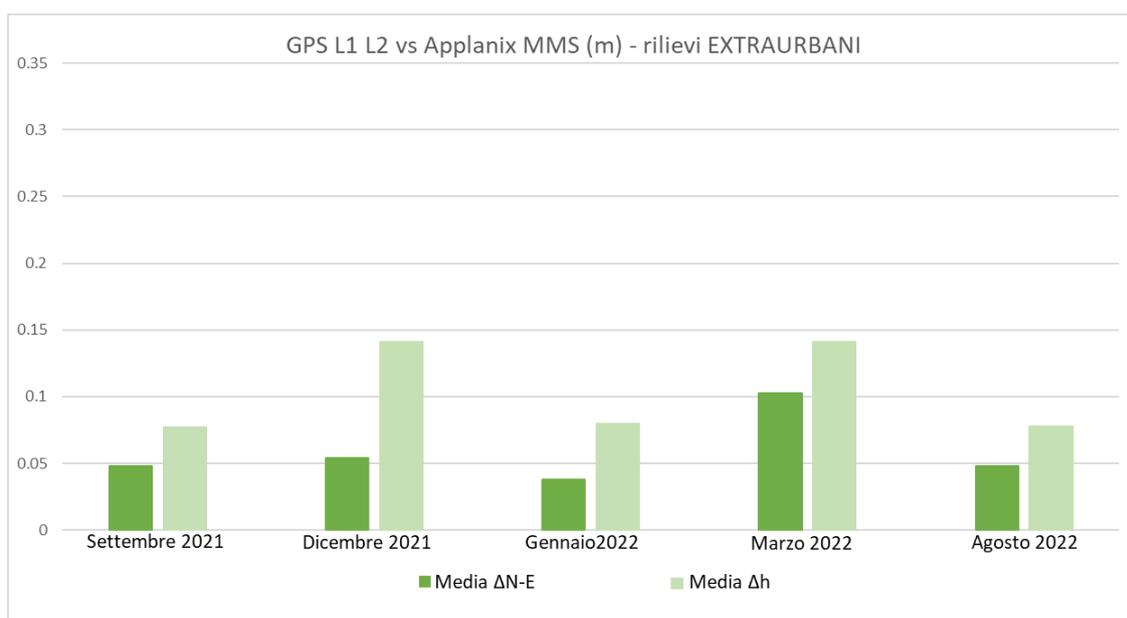


Figura 4.179 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Analogamente a quanto visto nelle campagne urbane, nei grafici riportati in Figura 4.178 e Figura 4.179 si può osservare che ogni campagna di misura presenta valori anche significativamente differenti rispetto alle altre. Le motivazioni sono le stesse dei rilievi urbani, ma con una minore influenza delle soste statiche dovute al traffico, molto meno frequenti. Si osserva che l'andamento nelle diverse campagne dei valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche medie, non segue quello ottenuto nelle campagne in ambito urbano.

4.3.2.1.2. Galileo E1 E5b - Differenze planimetriche tra le traiettorie - Urbano

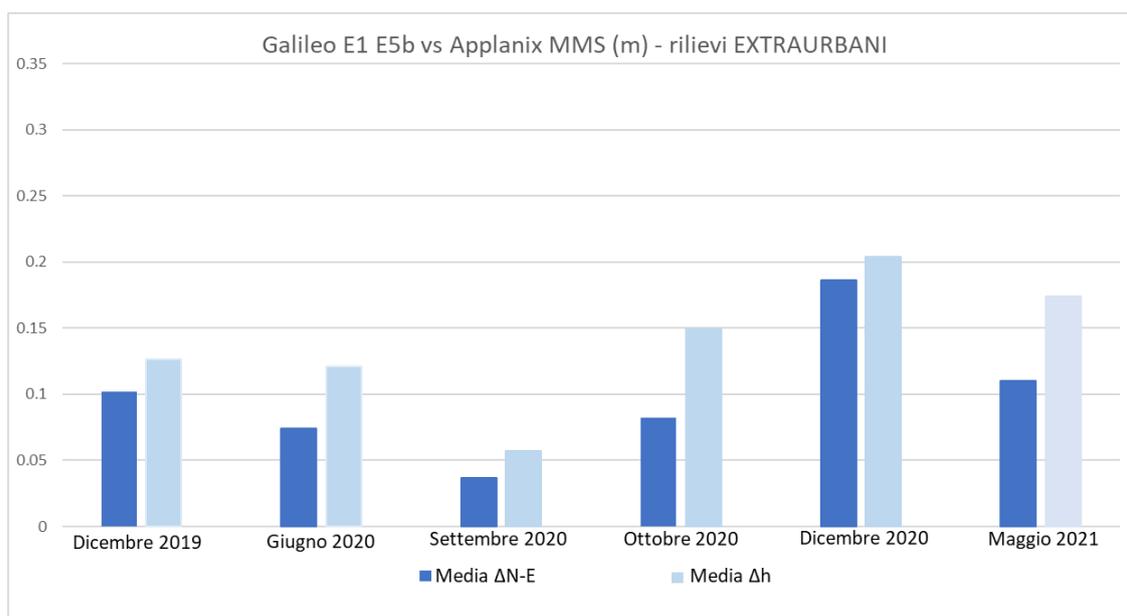


Figura 4.180 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

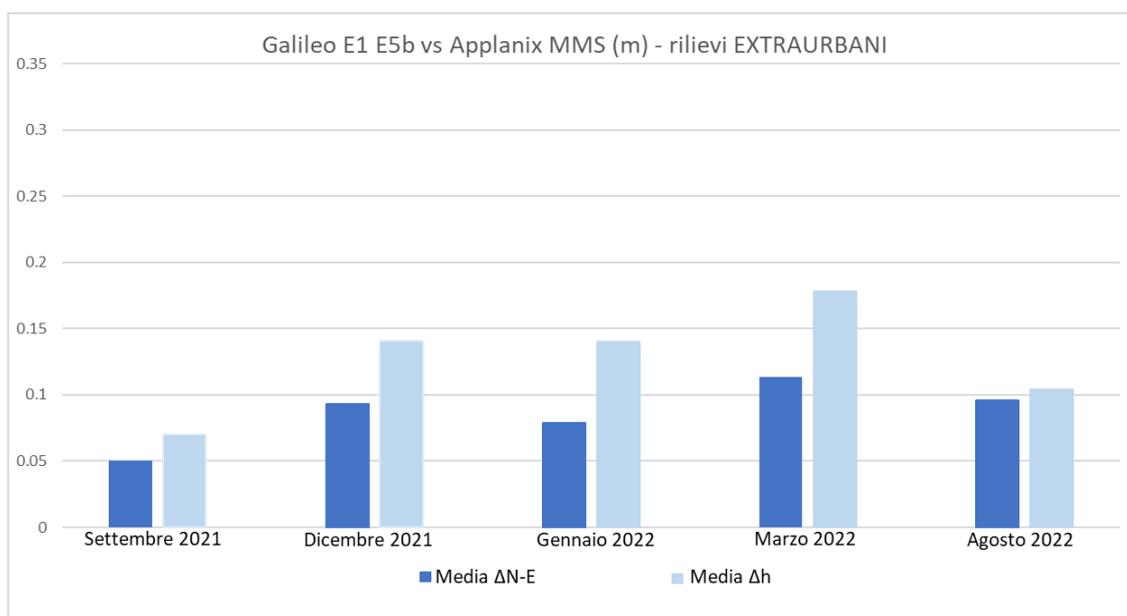


Figura 4.181 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Quanto osservato per il sistema satellitare GPS vale anche per il sistema satellitare Galileo, nei grafici in Figura 4.180 e Figura 4.181 si osserva che le differenze altimetriche e planimetriche tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento presentano un andamento variabile nel tempo. Questo andamento, come atteso, non riprende quello ottenuto utilizzando il solo sistema satellitare GPS.

4.3.2.1.3. Differenze planimetriche, deviazione standard, numero di epoche, numero medio di satelliti e PDOP – confronto diretto Galileo - GPS

Volendo effettuare un confronto diretto fra il sistema satellitare GPS e quello Galileo, si sono tracciati i seguenti grafici, riportati da Figura 4.182 a Figura 4.185 che riportano anche la deviazione standard per ogni campagna:

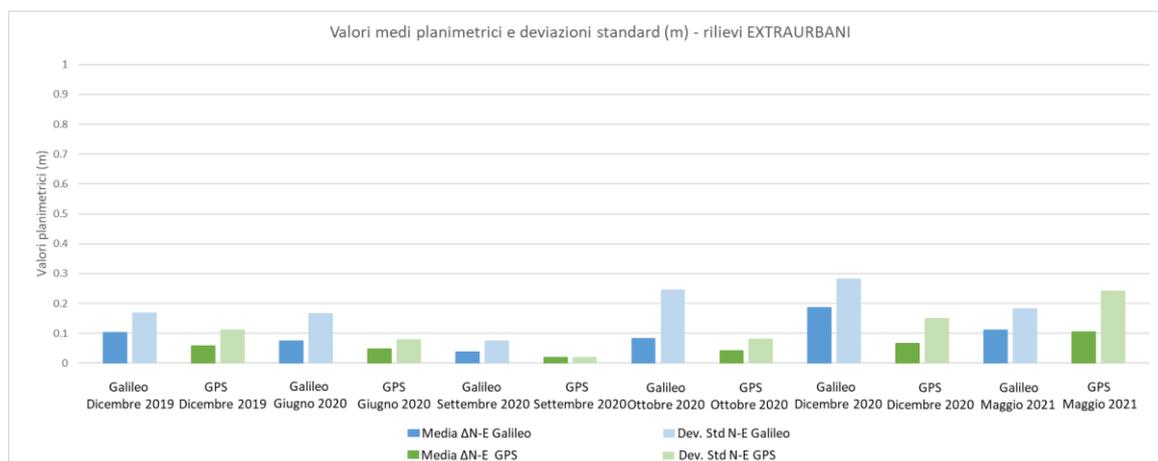


Figura 4.182 Differenze planimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

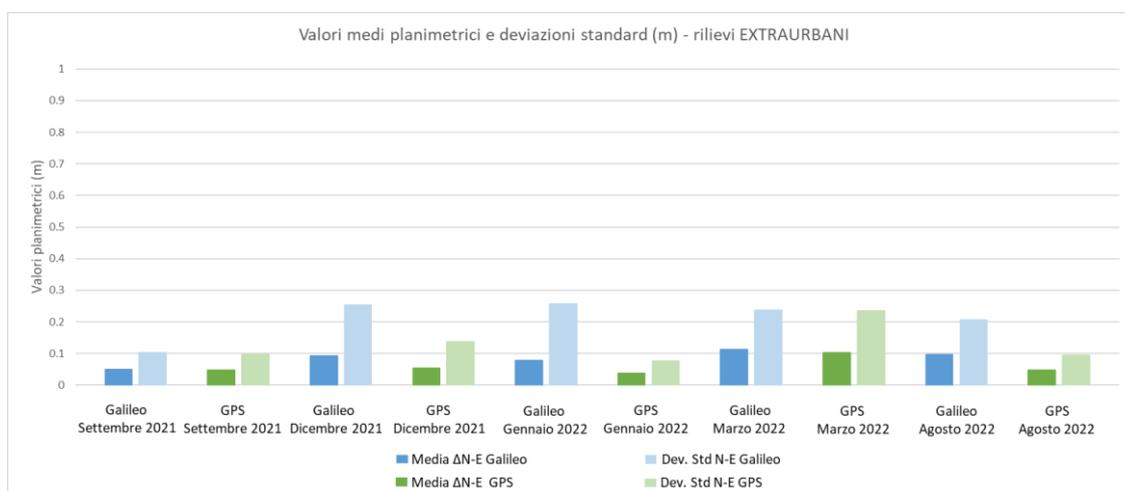


Figura 4.183 Differenze planimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai confronti planimetrici riportati nei grafici in Figura 4.182 e Figura 4.183 si evince che nelle campagne di giugno e settembre 2020, maggio e settembre 2021 e marzo 2022 il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di raggiungere prestazioni simili al sistema satellitare GPS.

Il sistema satellitare Galileo in alcune campagne di misura presenta deviazioni standard più alte rispetto alle altre campagne, come nelle campagne di ottobre 2020, dicembre 2020, dicembre 2021, gennaio 2022, marzo 2022 e agosto 2022.

Nella campagna di maggio 2021, il sistema satellitare Galileo presenta una deviazione standard relativa alle differenze planimetriche minore di quella ottenuta con l'utilizzo del sistema GPS.

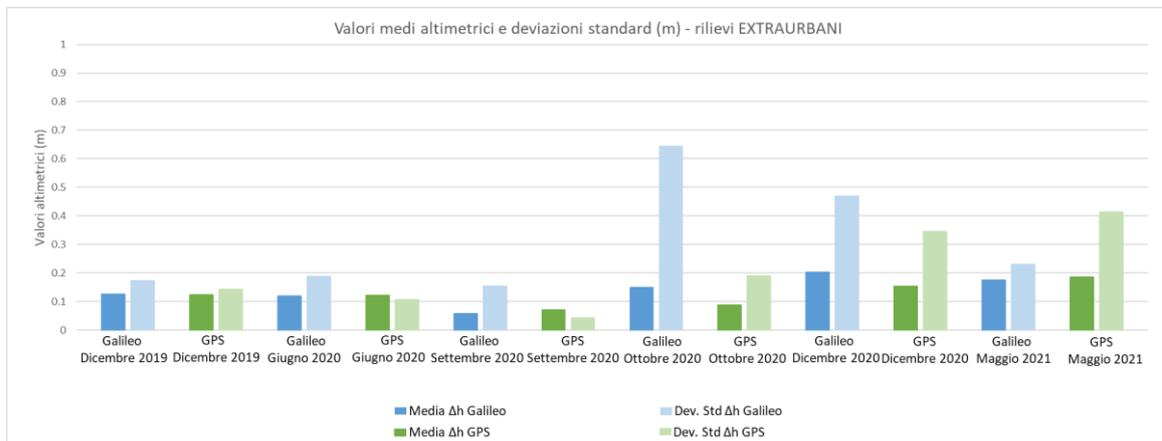


Figura 4.184 Differenze altimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

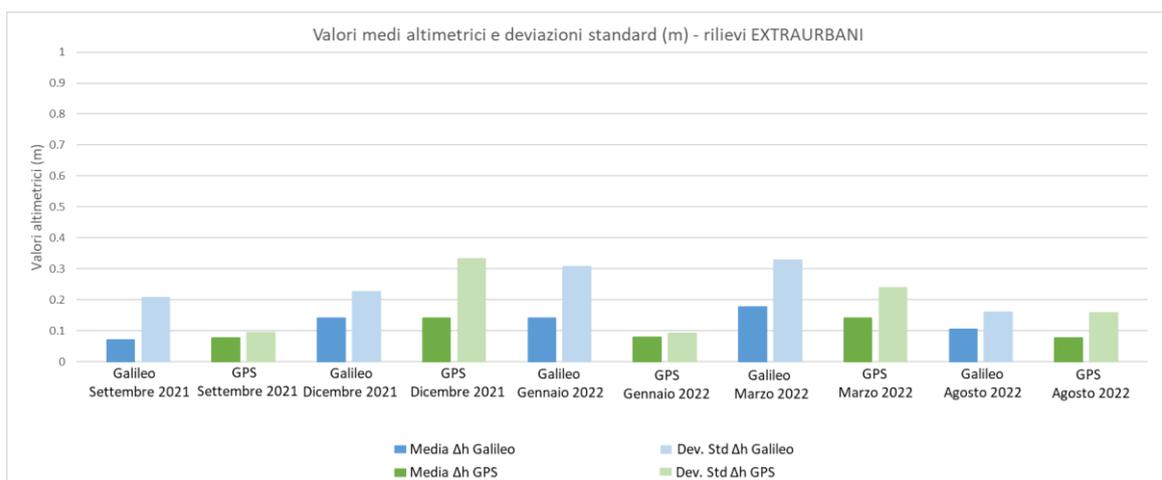


Figura 4.185 Differenze altimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai confronti altimetrici riportati nei grafici in Figura 4.184 e Figura 4.185 si evince che in quattro campagne (giugno 2020, settembre 2020, maggio 2021, dicembre 2021) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni migliori rispetto al sistema satellitare GPS, considerando i valori medi delle differenze altimetriche.

Per quanto riguarda le deviazioni standard dei dati altimetrici, nelle campagne in esame il sistema satellitare Galileo presenta valori più bassi del sistema GPS in due campagne: maggio 2021 e dicembre 2021.

Come per i rilievi urbani, tutte queste considerazioni devono tener conto del numero di epoche in cui è stato possibile calcolare una soluzione. Si sono tracciati quindi i grafici relativi al numero di epoche in cui è stato possibile ottenere una soluzione (Figura 4.186 e Figura 4.187).

In tutte le campagne il numero di epoche per cui è stato possibile calcolare una posizione con il sistema satellitare Galileo è stato maggiore rispetto a quanto ottenuto utilizzando il sistema GPS, come si può vedere nei grafici sottostanti.

La differenza fra il numero di epoche calcolate utilizzando i due sistemi non è mai particolarmente alta, ad eccezione della campagna di maggio 2021 in cui la differenza fra le epoche calcolate con il sistema Galileo e le epoche calcolate con il sistema GPS era di 511 epoche.

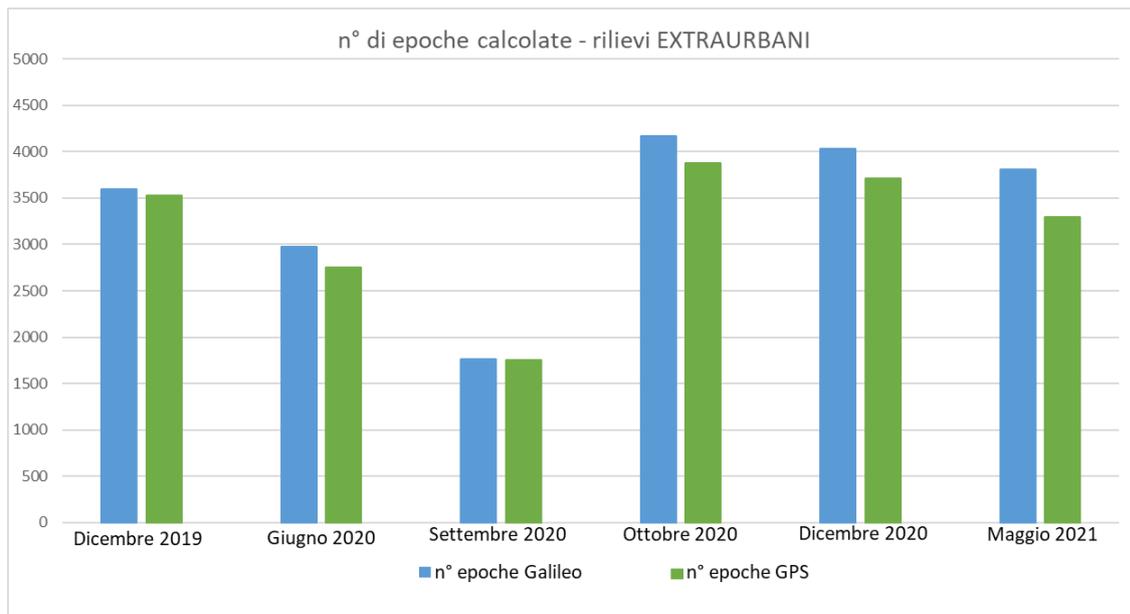


Figura 4.186 n° di epoche calcolate con i dati Galileo e GPS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

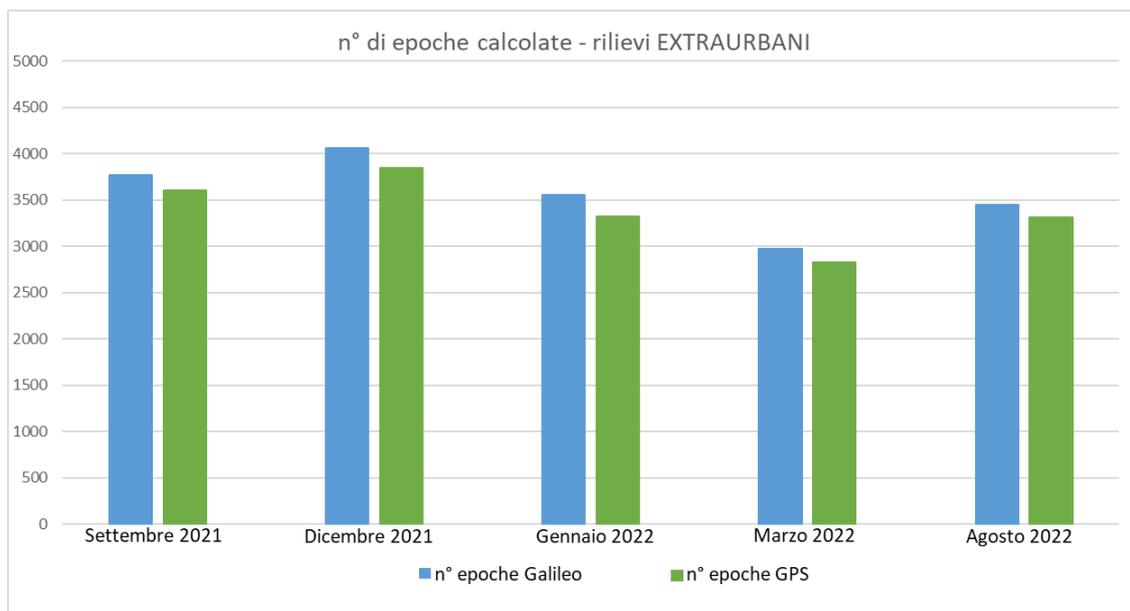


Figura 4.187 n° di epoche calcolate con i dati Galileo e GPS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Nei due grafici seguenti riportati in Figura 4.188 e Figura 4.189 sono invece riportati il n° di satelliti e i PDOP medi delle campagne di misura:

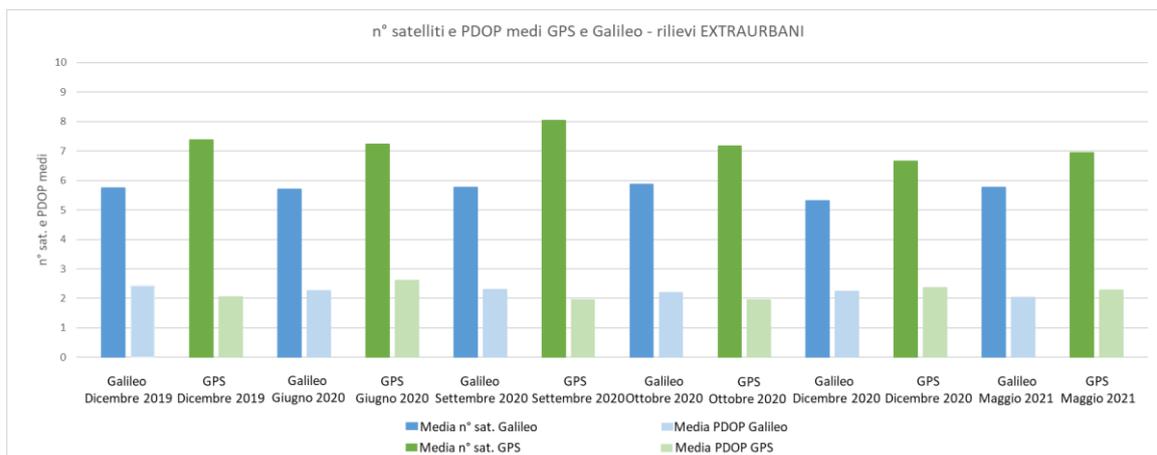


Figura 4.188 n° satelliti e PDOP medi Galileo e GPS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

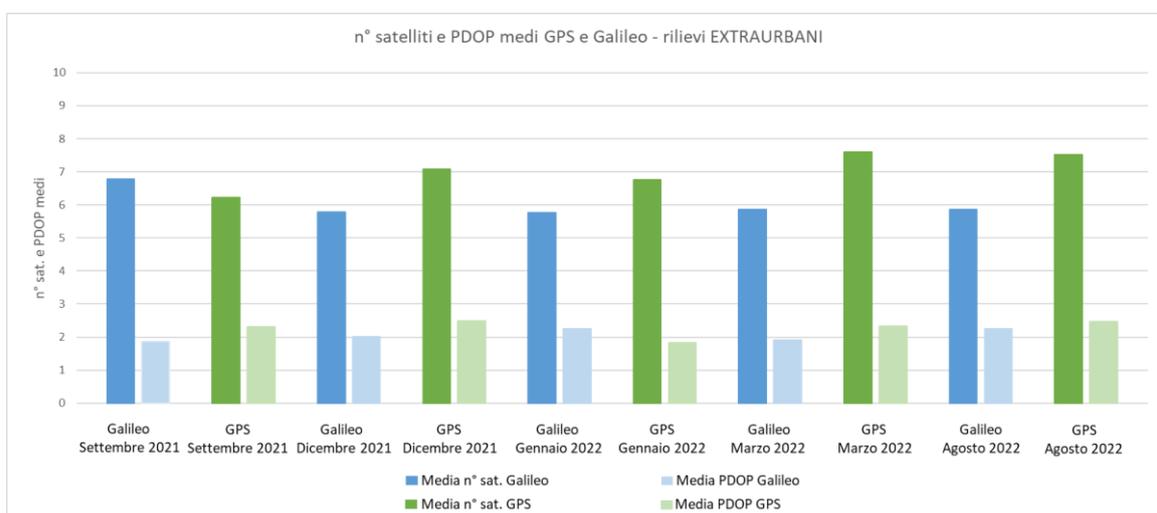


Figura 4.189 n° satelliti e PDOP medi Galileo e GPS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai grafici soprastanti (Figura 4.188 e Figura 4.189) risulta evidente che il numero medio di satelliti Galileo visibili sia sempre minore di quelli GPS ad esclusione della campagna di settembre 2021, come visto nelle campagne urbane.

Nonostante il numero di satelliti GPS operativi sia maggiore rispetto a quello del sistema satellitare Galileo, per ben sette campagne (giugno 2020, dicembre 2020, maggio 2021, settembre 2021, dicembre 2021, marzo 2022, Agosto 2022) il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere un PDOP medio più basso.

4.3.2.2. GPS L1 L2 + GLONASS G1 G2 Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Extraurbano

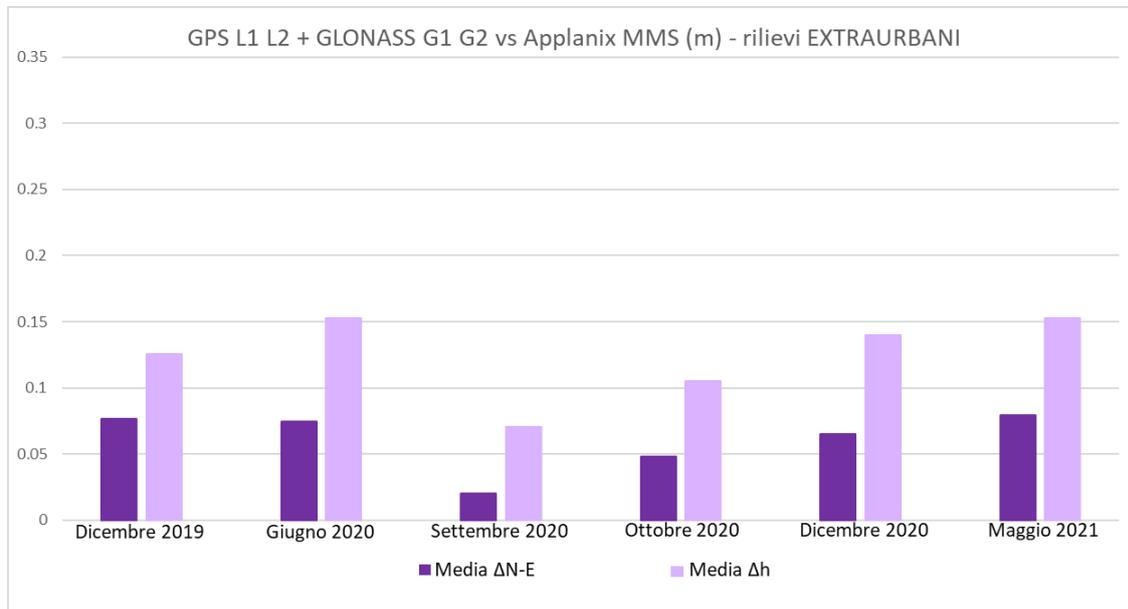


Figura 4.190 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

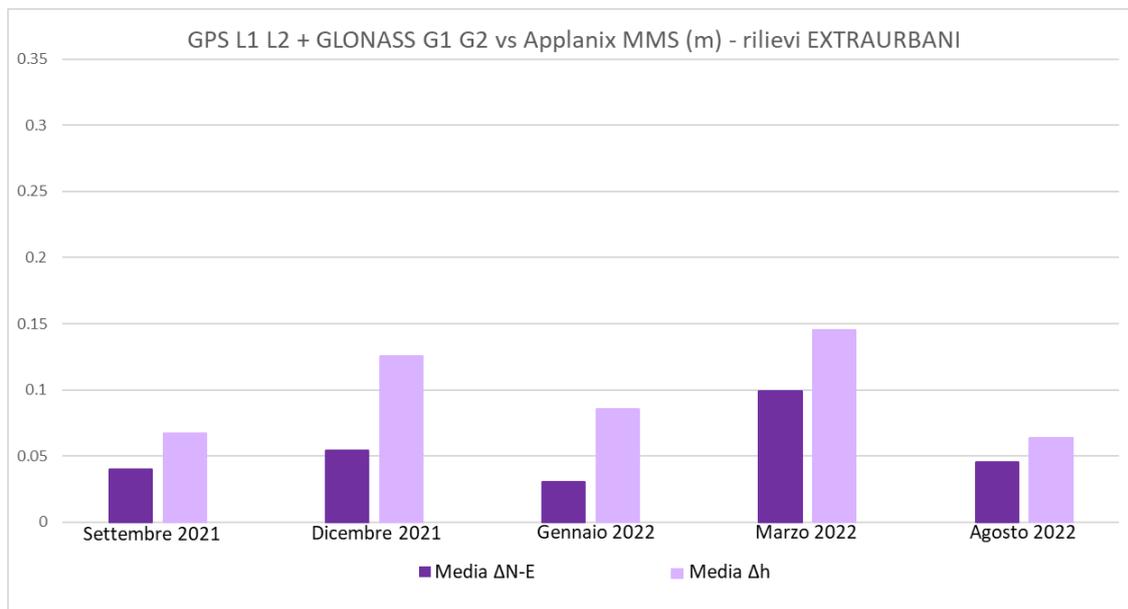


Figura 4.191 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

Come osservato per il sistema satellitare GPS e Galileo sia nelle campagne urbane che extraurbane, le differenze altimetriche e planimetriche tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento presentano un andamento variabile nel tempo (Figura 4.190 e Figura 4.191). In particolare si nota come questo andamento riprenda quello ottenuto con il solo sistema GPS (Figura 4.178 e Figura 4.179).

Confrontando i dati planimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS si osserva che ad esclusione di due campagne (dicembre 2020, agosto 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni confrontabili.

Confrontando i dati altimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS si osserva che in due campagne (giugno 2020, settembre 2020) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni migliori. Si sono quindi tracciati i grafici relativi alle deviazioni standard relative ai confronti planimetrici ed altimetrici (Figura 4.192 e Figura 4.193):

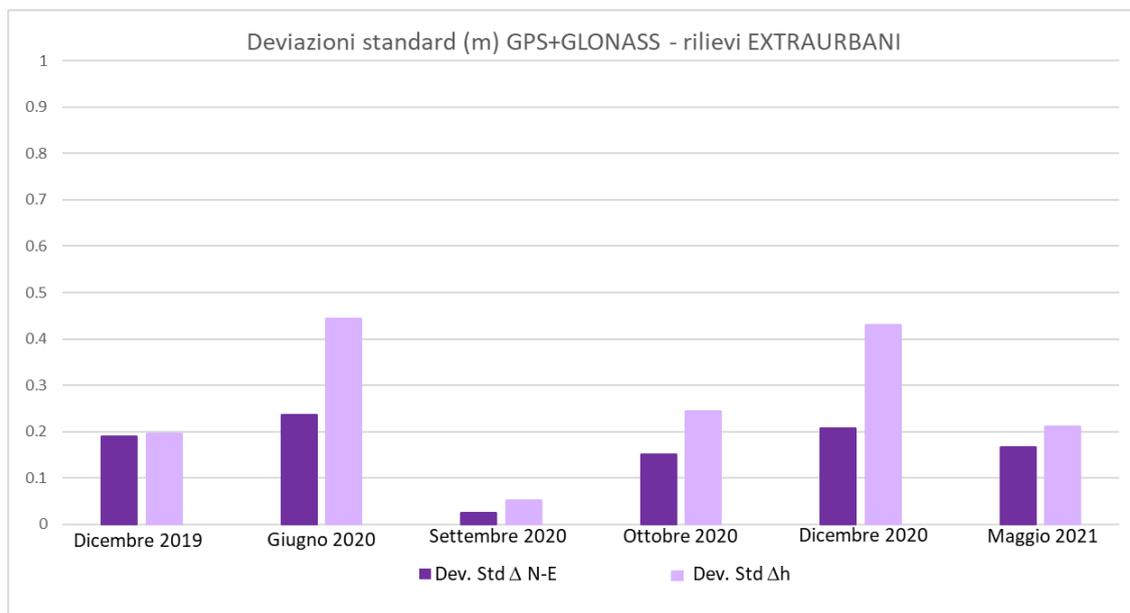


Figura 4.192 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano – Dicembre 2021 - Maggio 2021

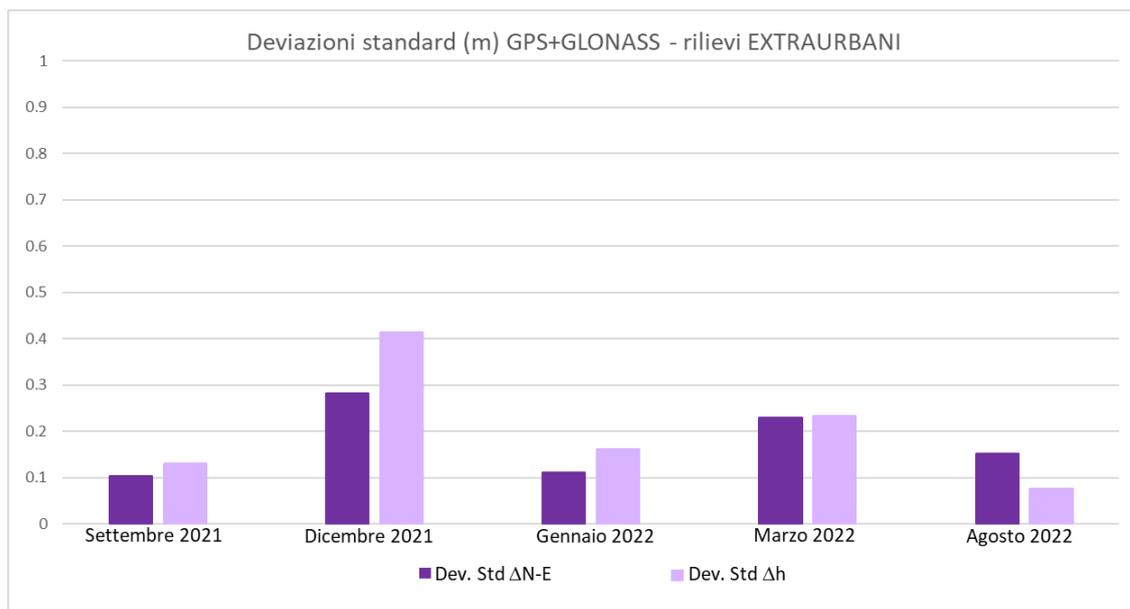


Figura 4.193 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Dai grafici sopra riportati (Figura 4.192 e Figura 4.193) è possibile notare che in quattro campagne (dicembre 2019, giugno 2020, settembre 2021, dicembre 2021) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere deviazioni standard planimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS.

In tre campagne (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2021), il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere deviazioni standard altimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS.

Si riportano ora i grafici relativi al numero di epoche in cui è stato possibile calcolare una posizione (Figura 4.194 e Figura 4.195):

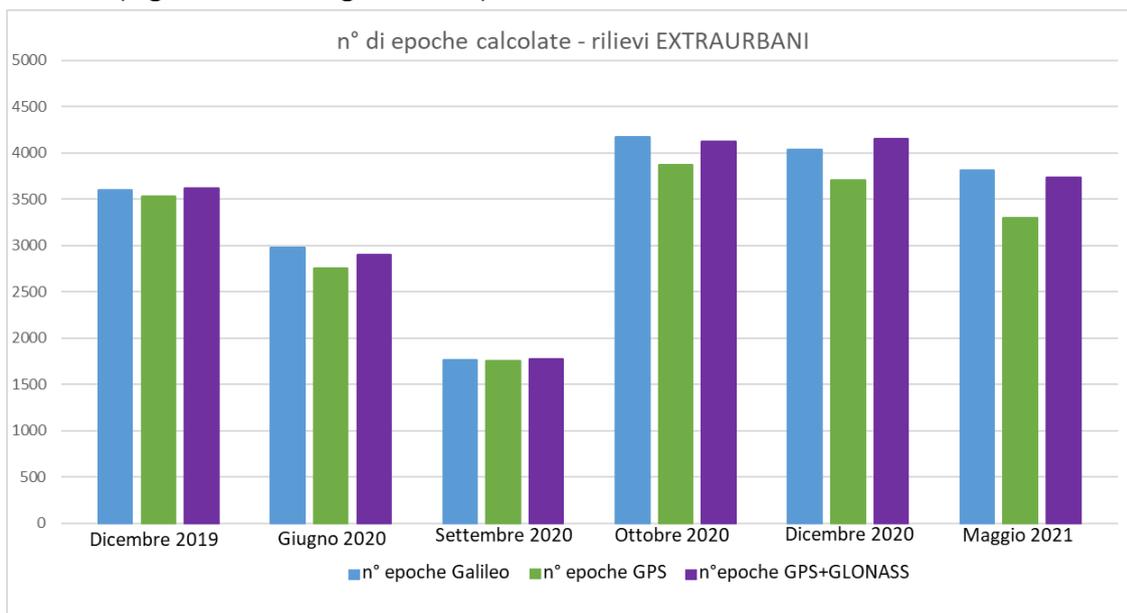


Figura 4.194 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

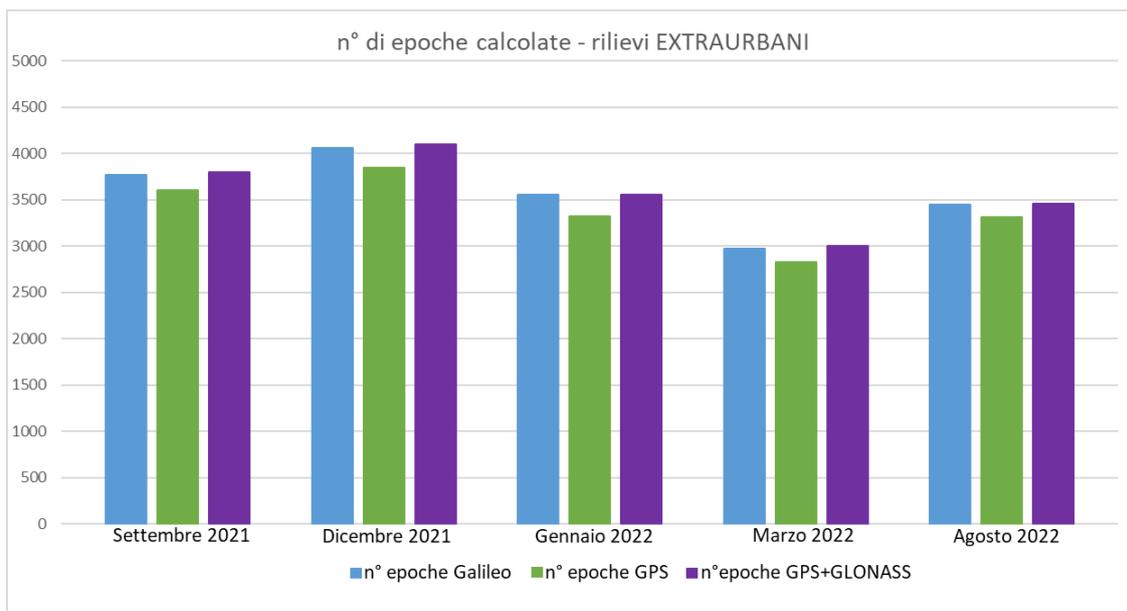


Figura 4.195 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Come si può vedere nei grafici in Figura 4.194 e Figura 4.195, il numero di epoche per cui è stato possibile calcolare una posizione utilizzando congiuntamente i sistemi satellitari GPS e GLONASS è risultato essere maggiore rispetto a quanto ottenuto utilizzando il solo sistema GPS. Il solo sistema satellitare Galileo, ha permesso di calcolare un numero maggiore di posizioni rispetto alla combinazione GPS+GLONASS in tre campagne (giugno 2020, ottobre 2020, maggio 2021) e un numero confrontabile nella campagna di gennaio 2022. Dai grafici si può notare anche che la differenza fra il numero di epoche calcolate utilizzando la combinazione GPS+GLONASS e il numero di epoche calcolate con il sistema Galileo è per la maggior parte delle campagne confrontabile.

Nei due grafici seguenti (Figura 4.196 Figura 4.197) sono invece riportati il n° di satelliti e i PDOP medi delle campagne di misura ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS:

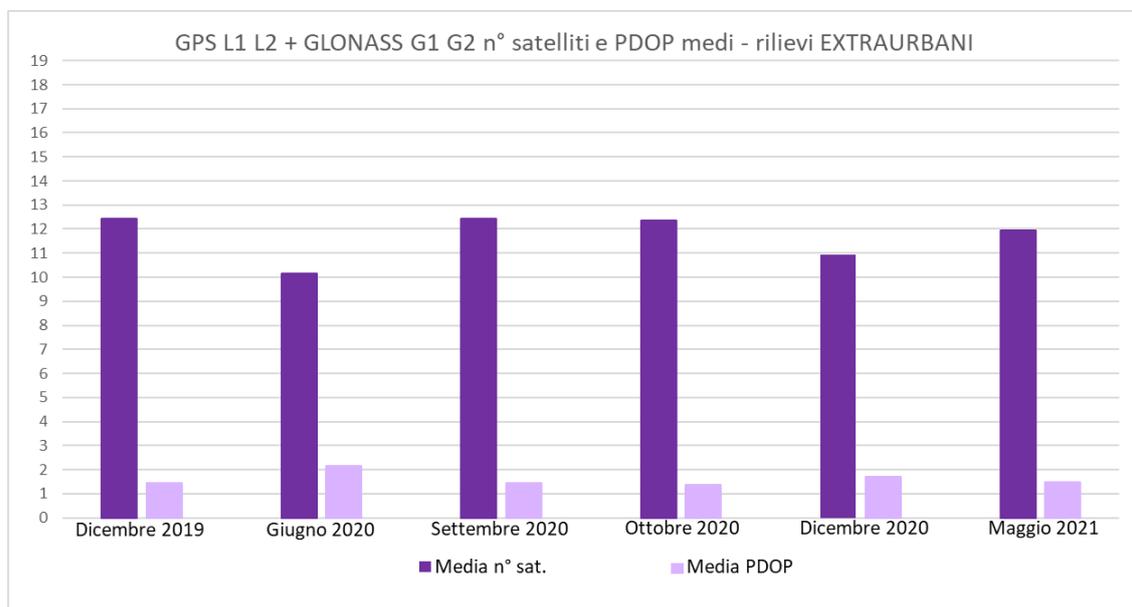


Figura 4.196 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

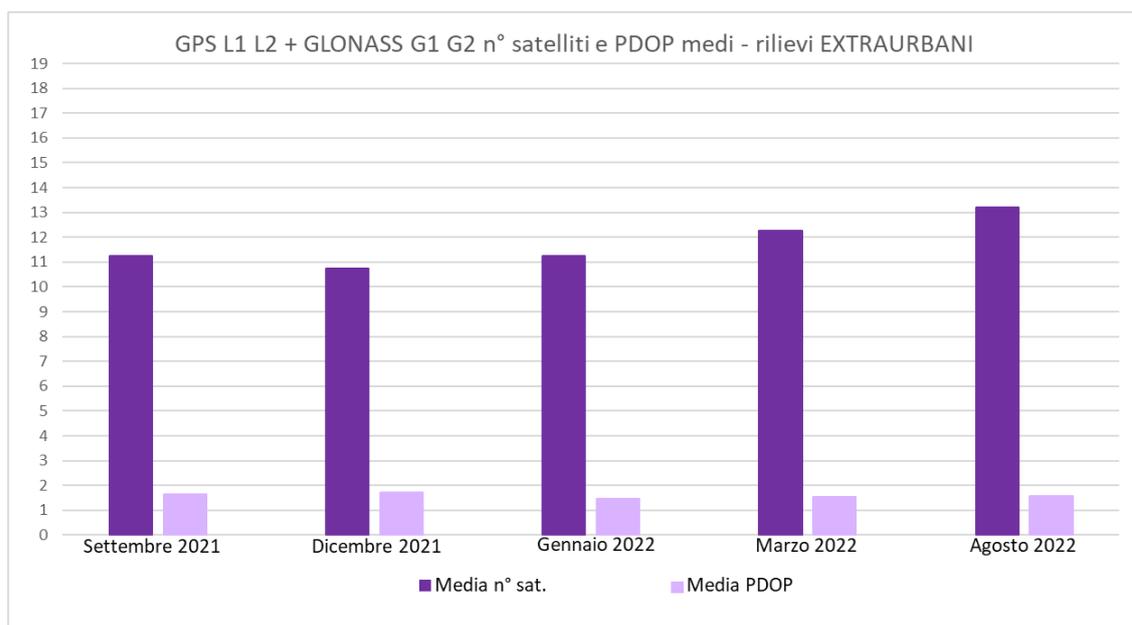


Figura 4.197 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

Utilizzando congiuntamente i dati dei sistemi satellitari GPS e GLONASS si vede che il numero di satelliti medio è prevedibilmente sempre maggiore rispetto al numero di satelliti medio Galileo. Ciononostante i valori medi dei PDOP ottenuti con il sistema satellitare Galileo si discostano in modo apprezzabile rispetto ai PDOP ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS solamente in tre campagne (settembre 2020, ottobre 2020, maggio 2021).

4.3.2.3. GPS L1 L2 + Galileo E1 E5b Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Extraurbano

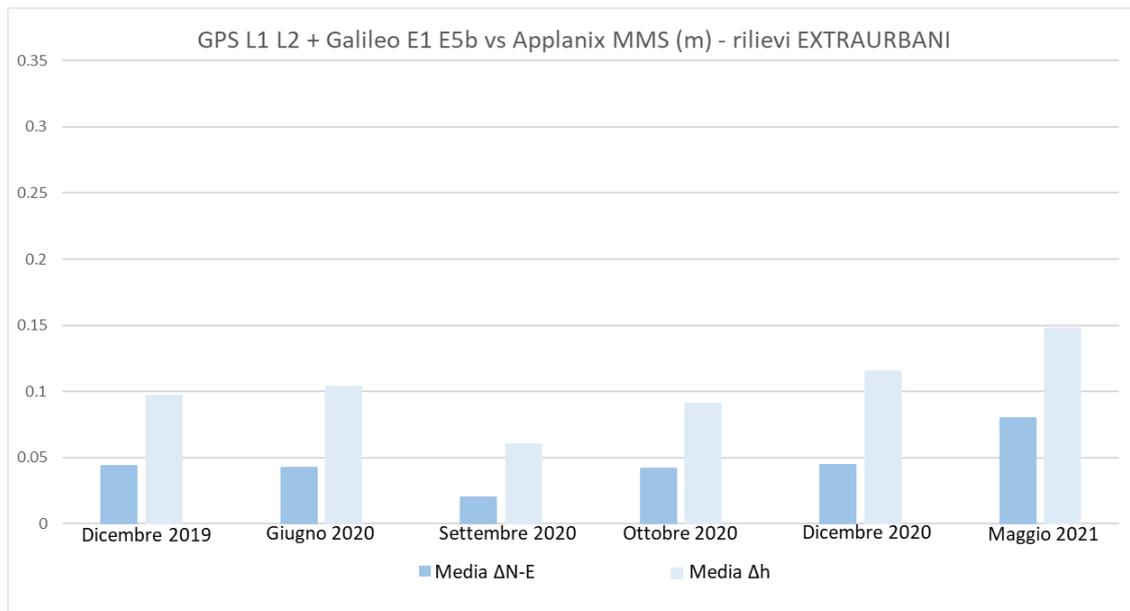


Figura 4.198 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

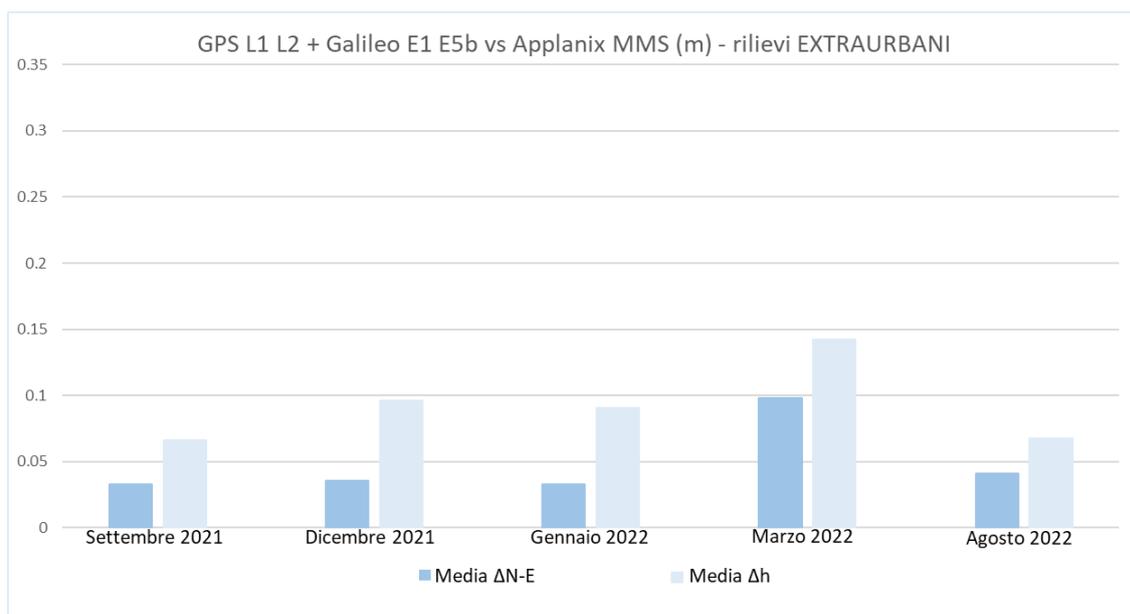


Figura 4.199 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

Come già osservato per il sistema satellitare GPS+GLONASS, le differenze altimetriche e planimetriche tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento presentano un andamento variabile nel tempo che riprende quello ottenuto con il solo sistema GPS (Figura 4.178 e Figura 4.179).

Confrontando i dati planimetrici Galileo con quelli GPS+Galileo si osserva che in quattro campagne (settembre 2020, maggio 2021, settembre 2021, marzo 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni simili.

Analizzando i dati altimetrici Galileo con quelli GPS+Galileo si osserva che in cinque campagne (dicembre 2019, giugno 2020, settembre 2020, maggio 2021, settembre 2021) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere generalmente prestazioni confrontabili.

Si sono quindi tracciati i grafici relativi alle deviazioni standard relative ai confronti planimetrici ed altimetrici (Figura 4.200 e Figura 4.201).

Dai grafici riportati di seguito è possibile notare che nella campagna di maggio 2021 il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere una deviazione standard planimetrica minore rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+Galileo.

Nella campagna di settembre 2021, il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere una deviazione standard altimetrica minore rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+Galileo.

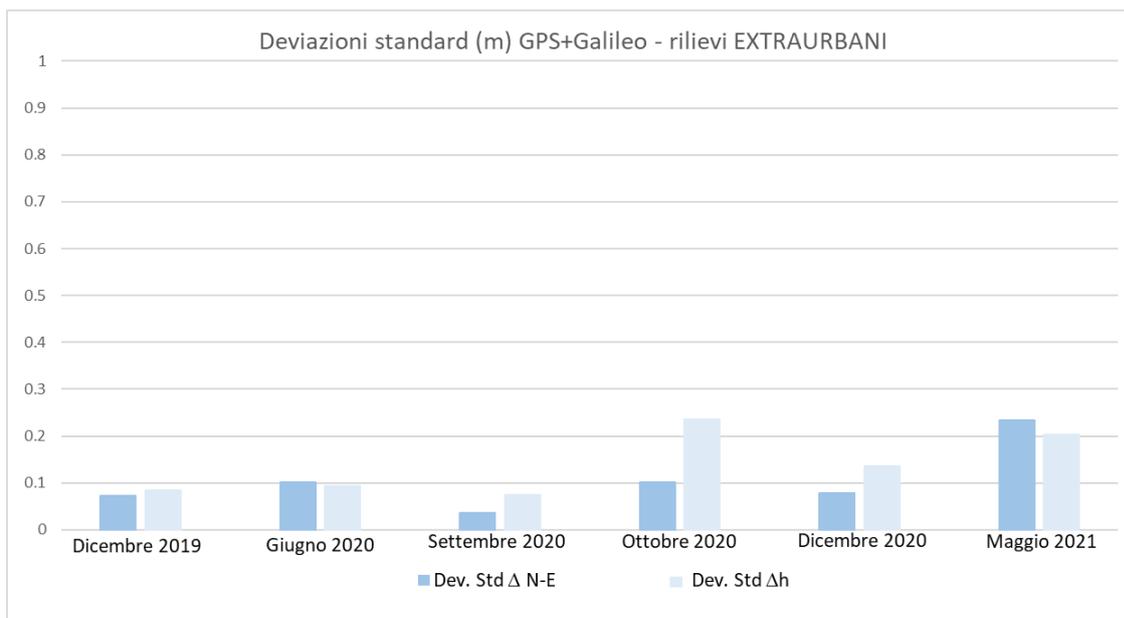


Figura 4.200 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2021 - Maggio 2021

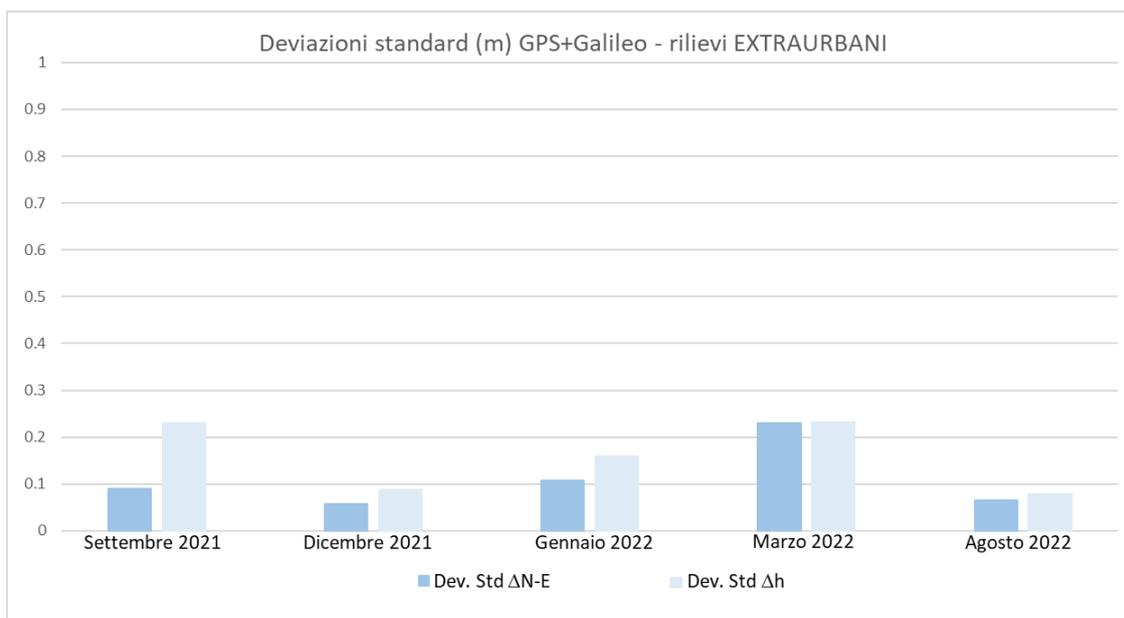


Figura 4.201 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Si sono quindi tracciati i grafici relativi al numero di epoche in cui è stato possibile calcolare una posizione.

Come si può vedere nei grafici sottostanti (Figura 4.202 e Figura 4.203), il numero di epoche per cui è stato possibile calcolare una posizione utilizzando congiuntamente i sistemi satellitari GPS e Galileo è risultato essere maggiore rispetto a quanto ottenuto utilizzando sia il solo sistema GPS che il solo sistema Galileo, ma anche rispetto alla combinazione GPS+GLONASS per tutte le campagne.

Dai grafici si può notare anche che la differenza fra il numero di epoche calcolate utilizzando la combinazione GPS+Galileo e il numero di epoche calcolate con il sistema Galileo è confrontabile per la maggior parte delle campagne.

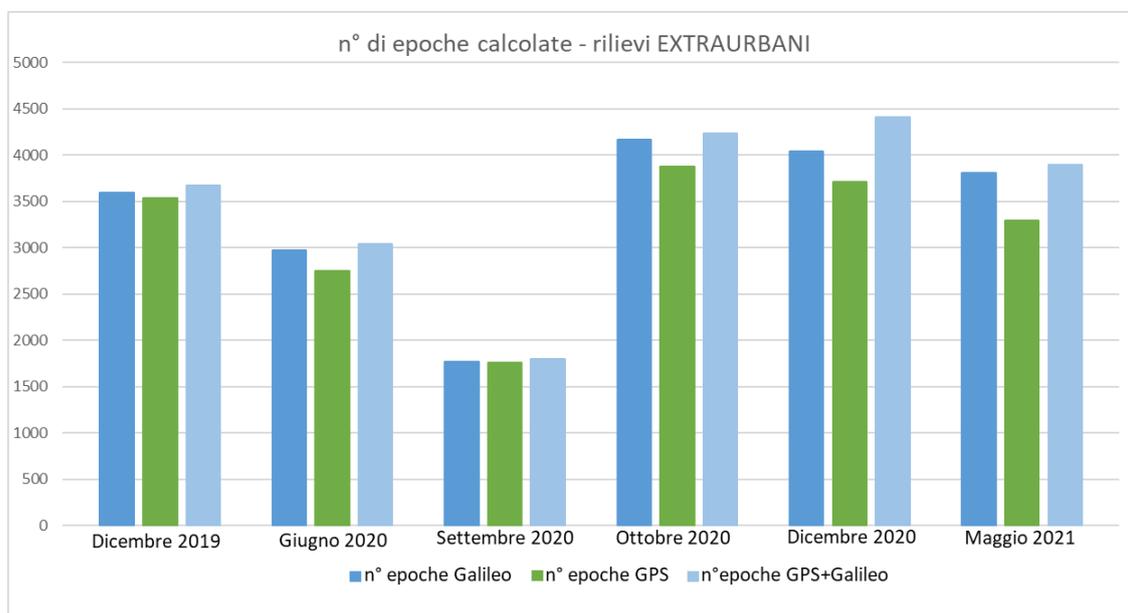


Figura 4.202 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

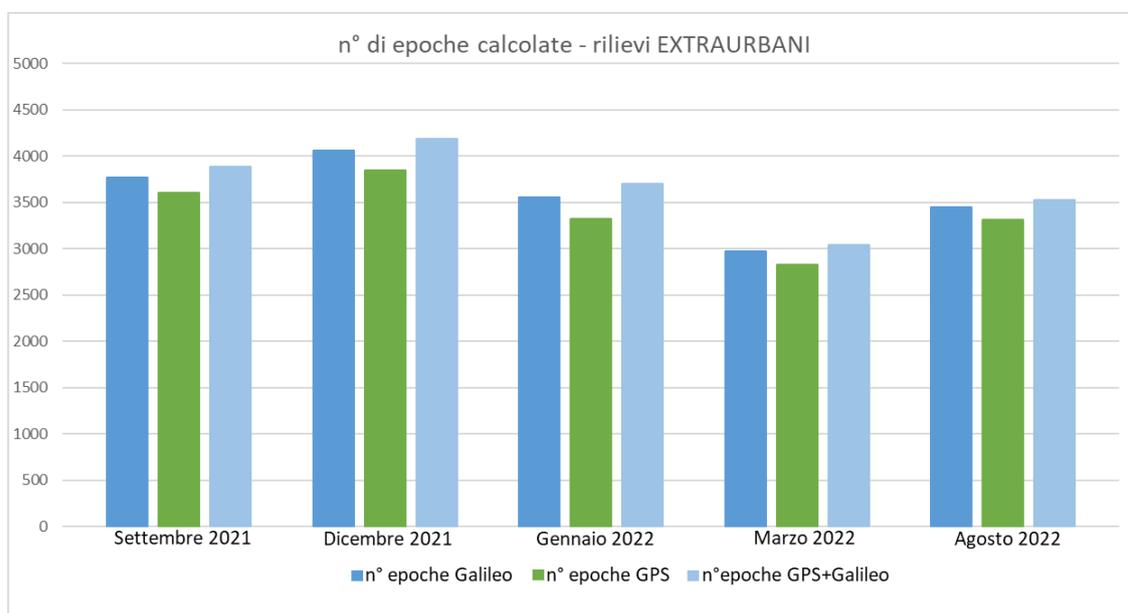


Figura 4.203 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Nei due grafici seguenti (Figura 4.204 e Figura 4.205) sono invece riportati il n° di satelliti e i PDOP medi delle campagne di misura ottenuti con la combinazione GPS+Galileo. I valori medi dei PDOP ottenuti con il sistema satellitare Galileo risultano essere sempre maggiori rispetto ai PDOP ottenuti con la combinazione GPS+Galileo.

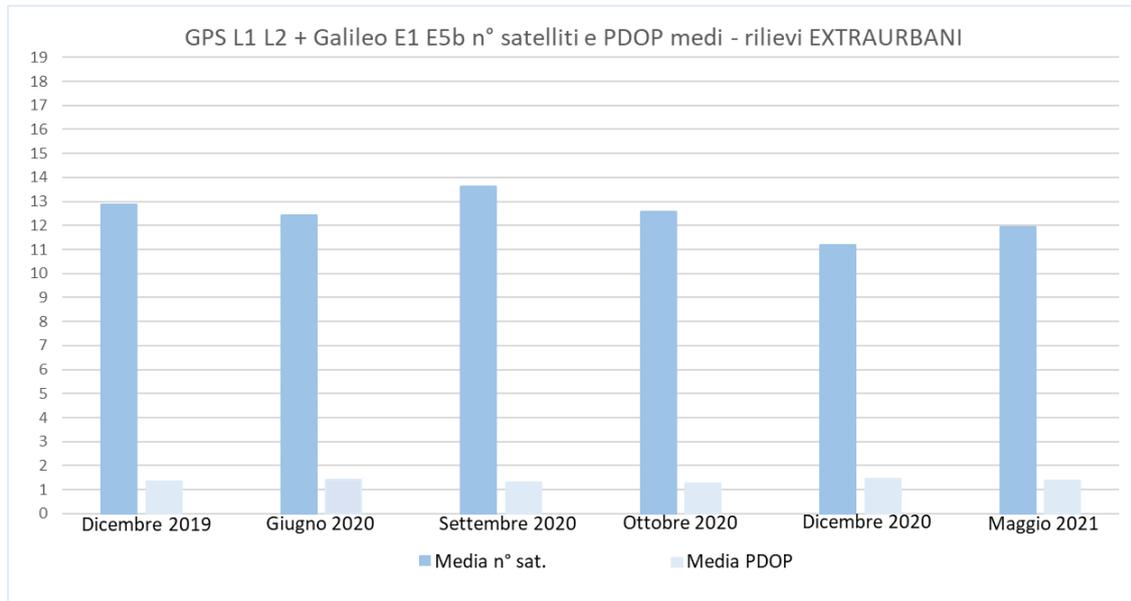


Figura 4.204 n° satelliti e PDOP medi GPS + Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

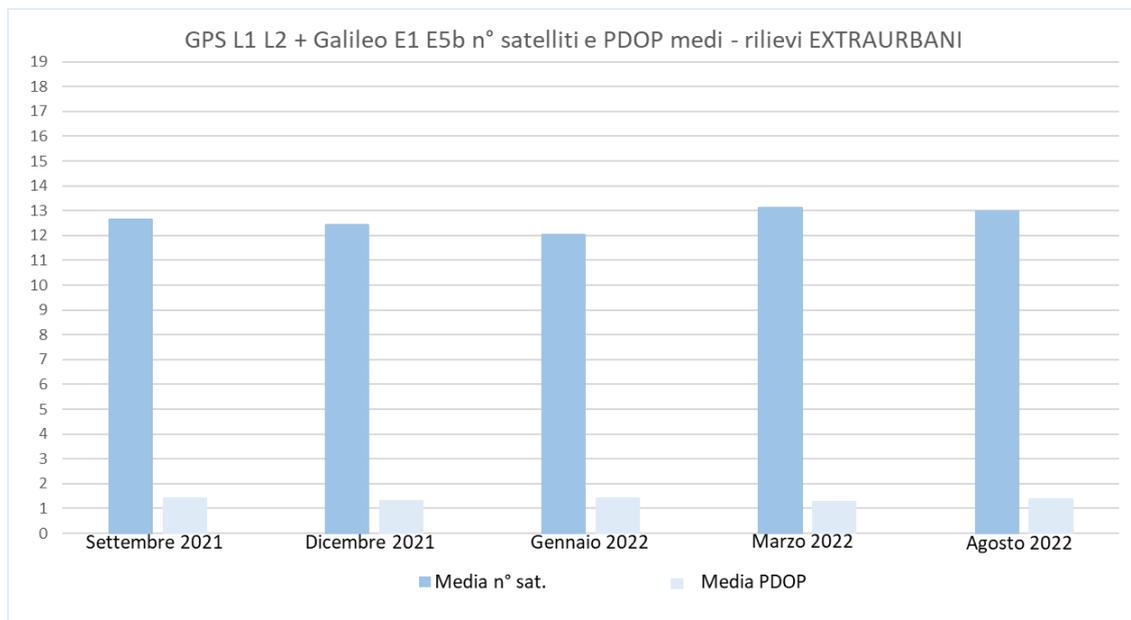


Figura 4.205 n° satelliti e PDOP medi GPS + Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

4.3.2.4. GPS L1 L2 + GLONASS G1 G2 + Galileo E1 E5b Differenze planimetriche tra le traiettorie, numero di satelliti e PDOP medi - Extraurbano

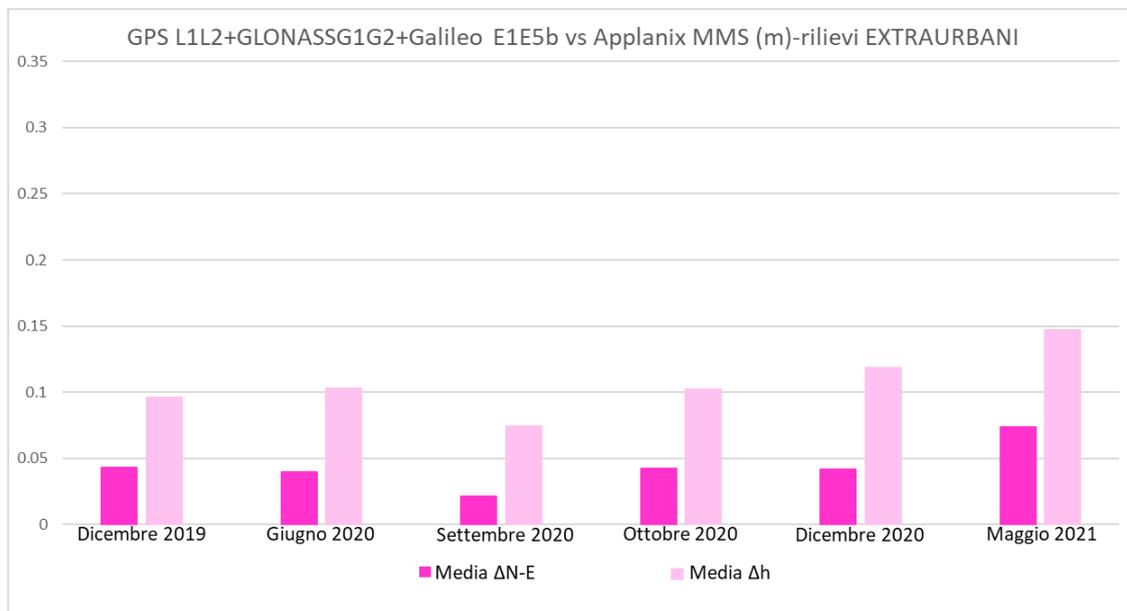


Figura 4.206 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS + Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

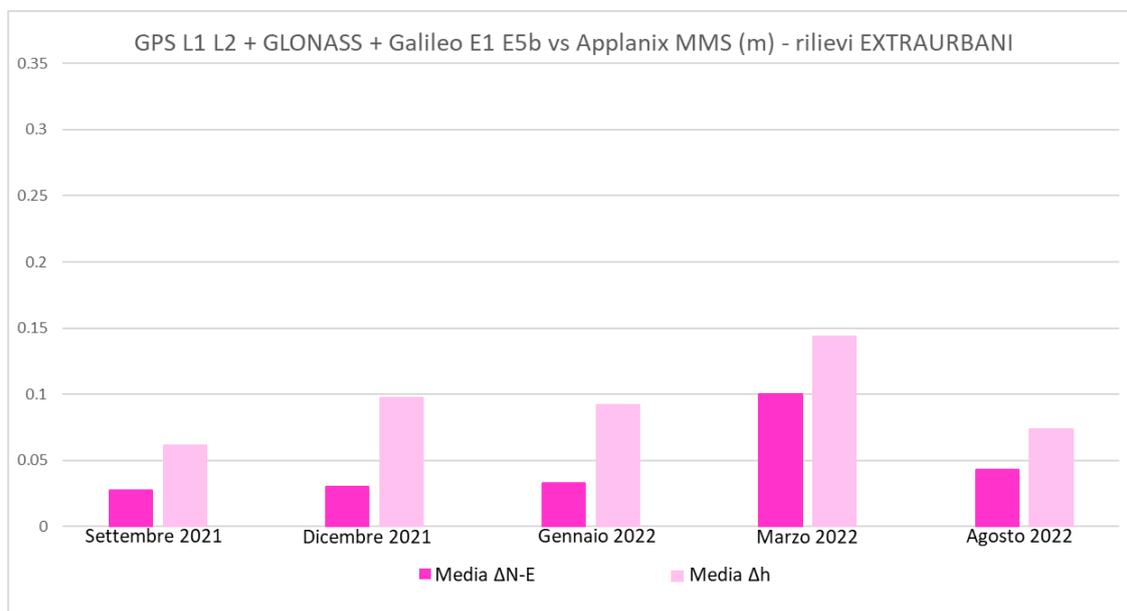


Figura 4.207 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche medie (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS + Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 – Agosto 2022

Le differenze altimetriche e planimetriche tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento (Figura 4.206 e Figura 4.207) presentano un andamento variabile nel tempo che riprende quello ottenuto con il solo sistema GPS (Figura 4.178 e Figura 4.179), con l'eccezione delle campagne di dicembre 2020 e maggio 2021 che evidenziano prestazioni maggiormente allineate alle campagne precedenti rispetto a quanto visto con i dati ottenuti utilizzando il sistema Galileo.

Analizzando i dati planimetrici Galileo con quelli GPS+Galileo si osserva che in due campagne (settembre 2020, marzo 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni confrontabili.

Confrontando i dati altimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS+Galileo si osserva che nella campagna di misura di settembre 2020 il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere prestazioni migliori, mentre per le campagne di giugno 2020, settembre 2020, maggio 2021, settembre 2021 marzo 2022 e agosto 2022 le prestazioni sono confrontabili.

Si sono quindi tracciati i grafici relativi alle deviazioni standard relative ai confronti planimetrici ed altimetrici.

Dai grafici riportati di seguito in Figura 4.208 e Figura 4.209 è possibile notare che in due campagne (settembre 2020, marzo 2022) il sistema satellitare Galileo, per le epoche per cui è stato possibile ottenere una soluzione, ha permesso di ottenere deviazioni standard planimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS+Galileo.

In due campagne (settembre 2020 e settembre 2021), il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere deviazioni standard altimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS+Galileo.

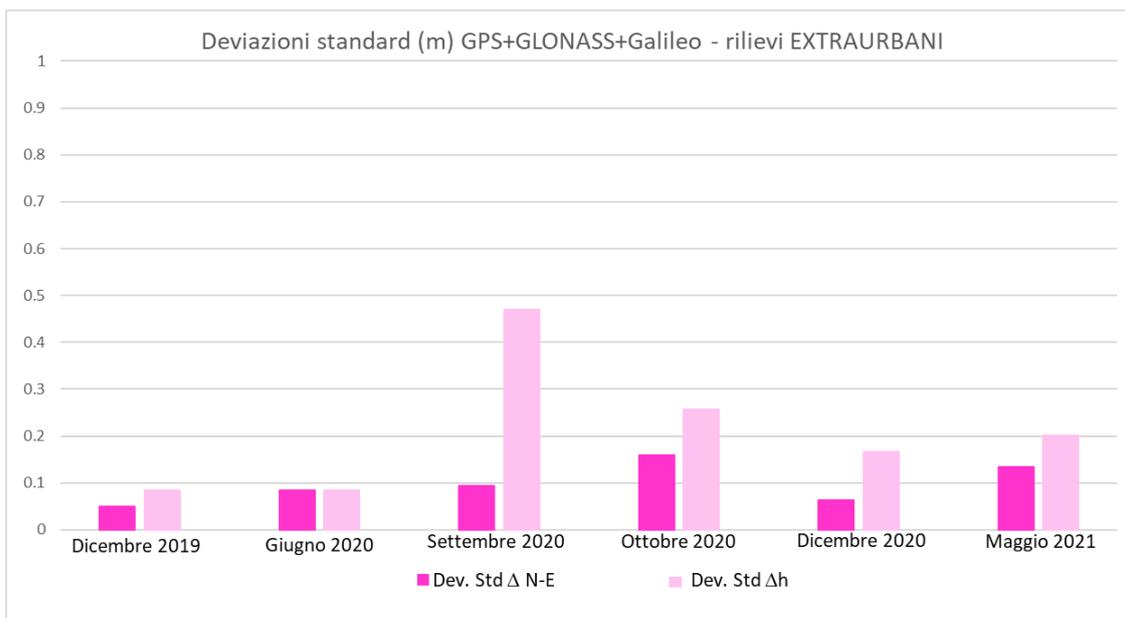


Figura 4.208 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

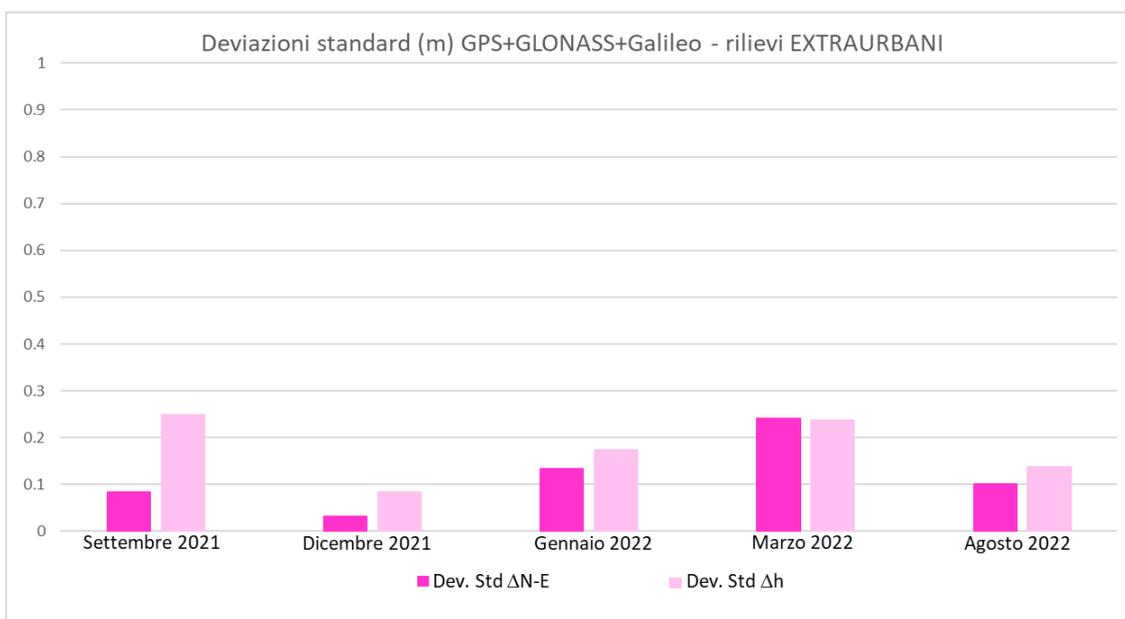


Figura 4.209 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Si sono quindi tracciati i grafici relativi al numero di epoche in cui è stato possibile calcolare una posizione.

Come si può vedere nei grafici esposti di seguito (Figura 4.210 e Figura 4.211), il numero di epoche per cui è stato possibile calcolare una posizione utilizzando congiuntamente i sistemi satellitari GPS+GLONASS+Galileo è risultato essere maggiore o uguale rispetto a quanto ottenuto utilizzando sia il solo sistema GPS che il solo sistema Galileo, ma anche rispetto alle combinazioni GPS+GLONASS e GPS+Galileo per tutte le campagne. Dai grafici si può notare anche che la differenza fra il numero di epoche calcolate utilizzando la

combinazione GPS+GLONASS+Galileo e il numero di epoche calcolate con il sistema Galileo è confrontabile per la maggior parte delle campagne.



Figura 4.210 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

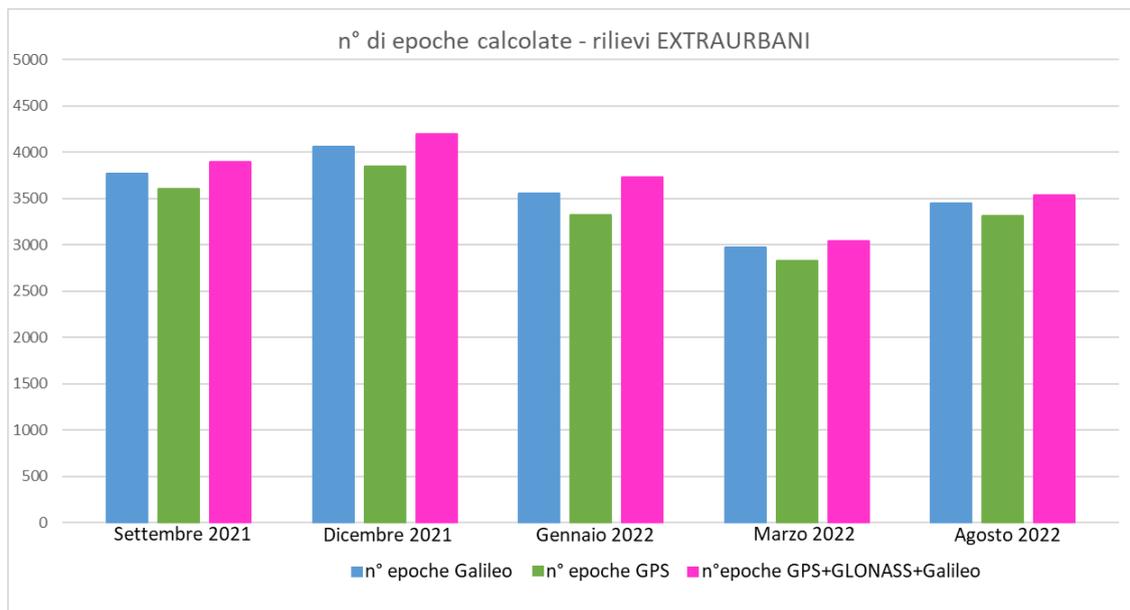


Figura 4.211 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022

Nei due grafici sottostanti (Figura 4.212 e Figura 4.213) sono invece riportati il n° di satelliti e i PDOP medi delle campagne di misura ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo. I valori medi dei PDOP ottenuti con il sistema satellitare Galileo come prevedibile risultano essere più elevati rispetto ai PDOP ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS+Galileo.

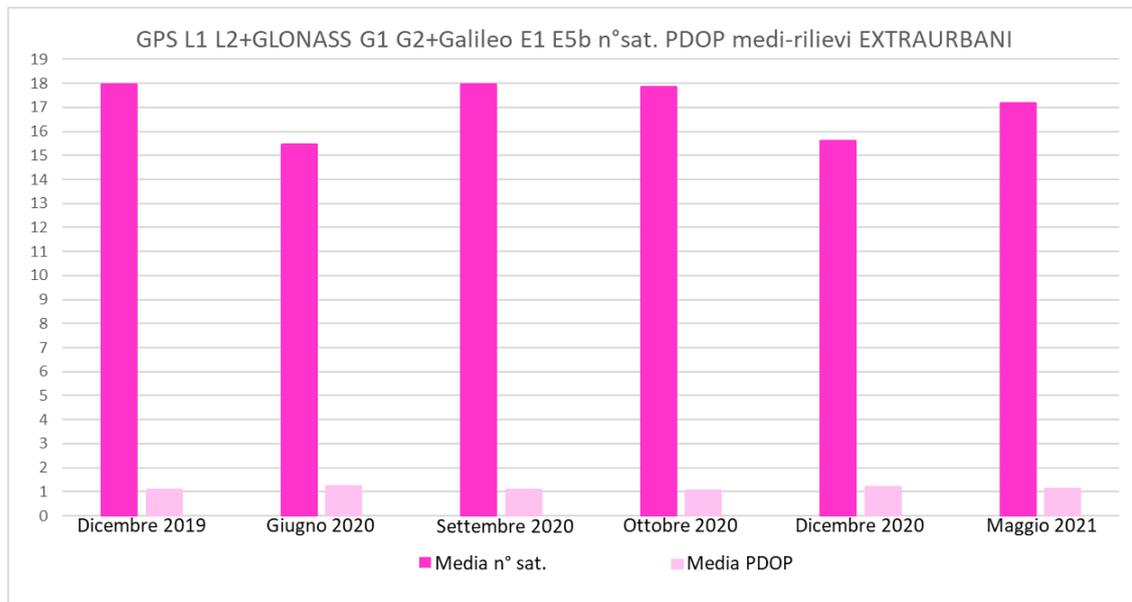


Figura 4.212 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS + Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021

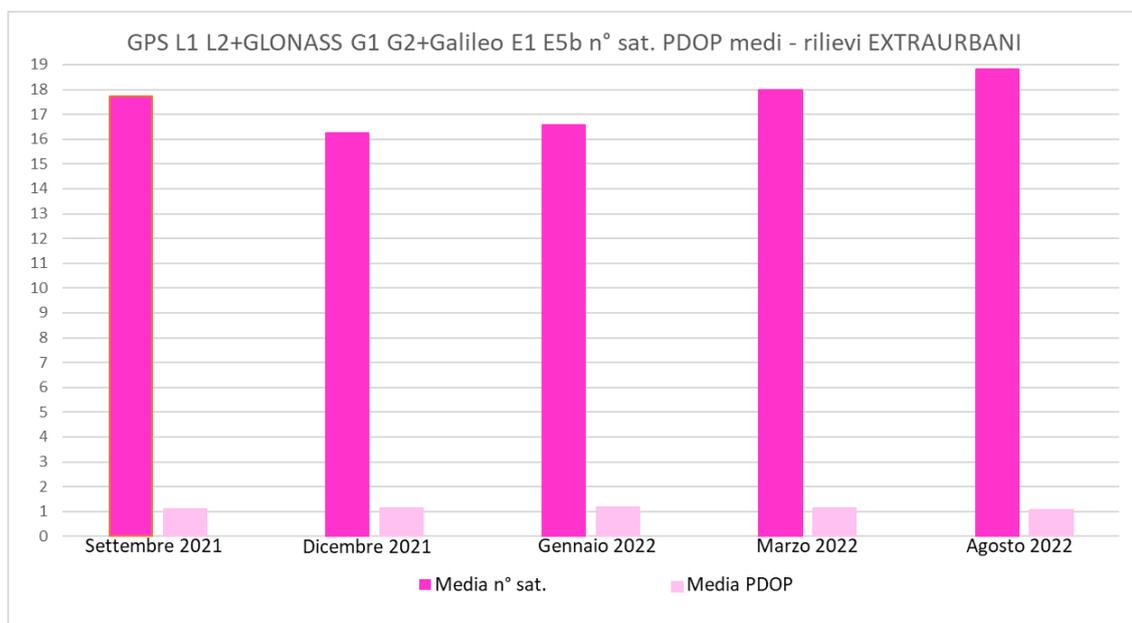


Figura 4.213 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS + Galileo – Ambito extraurbano–Settembre 2021 – Agosto 2022

5. Conclusioni

In questo lavoro di Tesi è stato trattato il funzionamento dei principali sistemi satellitari globali (GNSS) attualmente operativi, come il sistema satellitare GPS, il sistema satellitare GLONASS e BeiDou (Compass), ma anche di sistemi regionali come IRNSS/NAVIC e QZSS per poi soffermarsi sul sistema di posizionamento Galileo, attualmente in fase di completamento per quanto riguarda il segmento spaziale.

E' stata analizzata la composizione dei segmenti terrestri e spaziali di tutti i sistemi satellitari presi in esame e la loro evoluzione nel tempo per poi soffermarsi sulle performance dichiarate dai rispettivi gestori.

Sono state trattate brevemente le basi teoriche relative alle misurazioni con strumentazione GNSS e i relativi errori, per passare poi alle analisi delle prestazioni del sistema satellitare Galileo che sono state studiate anche nell'ambito del Progetto europeo GRC-MS (Galileo Reference Center – Member States) finanziato da EUSPA (EU Agency for the Space Programme) - WP 5.3 Land urban and extra-urban data measurement campaigns.

Lo scopo dell'attività di ricerca era quello di testare le prestazioni del sistema satellitare Galileo nelle applicazioni alla navigazione terrestre, rispetto ai sistemi GNSS GPS e GLONASS, analizzando l'accuratezza nel posizionamento cinematico e le precisioni ottenibili in diverse condizioni operative e confrontando i risultati con quelli ottenuti utilizzando strumentazione geodetica multi-costellazione in differenti configurazioni con le diverse costellazioni attualmente in fase FOC.

Con l'intento anche di verificare eventuali miglioramenti delle prestazioni del sistema satellitare Galileo legati all'avanzamento nell'implementazione del sistema, sono state pianificate, anche nell'ambito del primo Grant del Progetto GRC-MS, numerose campagne di misura con cadenza trimestrale anche se a causa dell'emergenza Covid-19, alcune campagne sono state posticipate. In particolare, in questa Tesi sono state analizzate undici campagne di misura che sono state svolte in ambito urbano ed extraurbano.

Per il calcolo delle soluzioni PVT (Position Velocity Time) mediante tecniche di posizionamento geodetico interferenziale differenziale in modalità cinematica con relativa post-elaborazione dei dati registrati da un ricevitore GNSS Septentrio AsteRx-U collegato ad una antenna Septentrio PolaNt-x MF (utilizzato per tutte le campagne di misura) e da uno smartphone Xiaomi Mi8 (utilizzato solo nelle ultime due campagne di misura), installati a bordo di un veicolo MMS (Mobile Mapping System) del GeoSNav Lab, Università di Trieste e il successivo confronto con i dati provenienti dal sistema GPS/INS (INertial System) del MMS.

Le prestazioni del sistema satellitare Galileo sono state confrontate con quelle ottenute con i sistemi GPS e GLONASS, nonché con le loro combinazioni GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo.

Per illustrare meglio le fasi seguite nelle diverse campagne di misura, è stata riportata in dettaglio la campagna di misura effettuata a marzo 2022, in cui sono state analizzate anche

le prestazioni ottenibili dallo smartphone Xiaomi Mi8 in grado di ricevere segnali GNSS multi-frequenza, specificatamente Galileo E1 ed E5a.

Dall'analisi dei risultati ottenuti in questa campagna di misura con il ricevitore Septentrio AsterX-U sono state evidenziate prestazioni planimetriche ed altimetriche medie in ambito urbano del sistema satellitare Galileo molto vicine a quelle ottenute con il sistema GPS. Si è notato anche che il numero complessivo di soluzioni Galileo è risultato quasi sempre superiore a quello delle soluzioni GPS.

Nella medesima campagna si è osservata, per i risultati ottenuti con il sistema Galileo, una deviazione standard planimetrica minore rispetto a quella ottenuta con il sistema GPS, ma una deviazione standard relativa all'altimetria maggiore.

Nella campagna di marzo 2022, combinando i diversi sistemi GNSS fra loro, si sono ottenute un numero di soluzioni decisamente superiore rispetto alle soluzioni singola costellazione. Nella medesima campagna di misura, in ambito extraurbano per i risultati ottenuti con il sistema Galileo sono emersi valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche molto vicini a quelli ottenuti con il sistema GPS e deviazioni standard planimetriche ed altimetriche maggiori rispetto a quelle ottenute con il sistema GPS.

Come si può vedere nelle Figure che mostrano le traiettorie in ambito extraurbano sovrapposte alle ortofoto ottenute dal server WMS della Regione Friuli Venezia Giulia, in corrispondenza al passaggio del veicolo MMS sotto due ponti, le posizioni calcolate utilizzando la costellazione Galileo sono state caratterizzate da una riacquisizione del segnale più rapida rispetto ai segnali GPS. Questo comportamento si è verificato anche nelle altre campagne di misura.

Analogamente alla campagna urbana di marzo 2022, anche le soluzioni multi-costellazione della campagna extraurbana sono in numero decisamente superiore rispetto alle soluzioni singola costellazione, per tutti i sistemi.

I risultati ottenuti con lo smartphone evidenziano soprattutto in ambito urbano una scarsa stabilità nella ricezione dei segnali GNSS e relativa difficoltà nel calcolo della posizione.

Tuttavia, tenuto conto della differenza tecnologica rispetto ad un ricevitore di tipo geodetico come il Septentrio AsterX-U, si possono reputare i risultati ottenuti come una buona base di partenza per studi futuri con nuovi smartphone più evoluti.

Dopo aver illustrato la campagna di marzo 2022 si sono effettuati i confronti nel tempo in ambito urbano ed extraurbano relativi alle diverse campagne di misura che si sono svolte da dicembre 2019 ad agosto 2022.

Non si sono effettuati confronti nel tempo per i dati relativi allo smartphone in quanto quest'ultimo è stato utilizzato solamente nelle ultime due campagne di misura.

Sia in ambito urbano che extraurbano ogni campagna di misura presentava valori anche significativamente differenti rispetto alle altre. Ciò è dovuto principalmente alle differenti condizioni in cui sono avvenute le misure, come ad esempio la differente disposizione dei satelliti che influivano sulla ricezione del segnale da parte del ricevitore GNSS, ma anche il numero e la durata delle soste statiche causate dal traffico, che variavano da campagna a campagna.

Nei rilievi urbani, dai confronti planimetrici si è ottenuto che in quattro campagne su undici (dicembre 2019, dicembre 2020, maggio 2021, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, ha permesso di ottenere prestazioni migliori rispetto al sistema satellitare GPS relativamente ai valori medi delle differenze planimetriche rispetto alla traiettoria di riferimento.

Inoltre nelle stesse quattro campagne (e anche nella campagna di marzo 2022) il sistema satellitare Galileo ha presentato deviazioni standard più basse del sistema GPS.

Dai confronti altimetrici si evince che in quattro campagne su undici (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, ha permesso di ottenere valori medi migliori rispetto al sistema satellitare GPS.

Per quanto riguarda le deviazioni standard dei dati altimetrici, nelle campagne in esame il sistema Galileo ha presentato valori più bassi del sistema GPS in sei campagne: dicembre 2019, giugno 2020, settembre 2020, ottobre 2020, dicembre 2020, gennaio 2022.

In sette campagne (dicembre 2019, ottobre 2020, maggio 2021, settembre 2021, dicembre 2021, gennaio 2022, marzo 2022) il numero di soluzioni Galileo è stato maggiore rispetto a quello GPS.

Il numero medio di satelliti Galileo visibili nelle campagne in ambito urbano è sempre risultato minore rispetto a quelli GPS ad esclusione della campagna di settembre 2021.

Nonostante ciò per ben cinque campagne (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2020, settembre 2021, dicembre 2021) il sistema satellitare Galileo ha permesso di ottenere un PDOP medio più basso.

Da tutti questi dati si evince che in ambito urbano il sistema Galileo, confrontato con il sistema satellitare GPS ha mostrato prestazioni confrontabili.

Come osservato per il sistema satellitare GPS e Galileo, per tutte le combinazioni fra i vari sistemi GNSS analizzate (GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo), le differenze altimetriche e planimetriche medie tra le traiettorie calcolate e quelle di riferimento presentano un andamento variabile nel tempo. In particolare si nota come questo andamento riprenda quello ottenuto con il solo sistema GPS.

Confrontando i dati planimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS si osserva che in due campagne (dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema Galileo, ha permesso di ottenere valori medi migliori rispetto alla combinazione GPS+GLONASS. In tre campagne (ottobre 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, ha permesso di ottenere deviazioni standard planimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS.

Confrontando i dati altimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS si osserva che in quattro campagne (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2020, gennaio 2022) il sistema satellitare Galileo, ha permesso di ottenere valori medi minori e in sette campagne (dicembre 2019, giugno, settembre, ottobre, dicembre 2020, maggio 2021, gennaio 2022), ha permesso di ottenere deviazioni standard altimetriche migliori.

La differenza fra il numero di soluzioni GPS+GLONASS e quelle Galileo è per la maggior parte delle campagne non elevata.

Utilizzando congiuntamente i dati di più sistemi satellitari come GPS, GLONASS e Galileo il numero di satelliti medio come è ovvio è sempre maggiore rispetto al numero di satelliti medio Galileo sia in ambito urbano che extraurbano. Ciò nonostante i valori medi dei PDOP Galileo non si discostano di molto rispetto ai PDOP GPS+GLONASS.

Dai confronti planimetrici in ambito extraurbano si evince che nelle campagne di giugno e settembre 2020, maggio e settembre 2021 e marzo 2022 il sistema Galileo ha permesso di raggiungere prestazioni simili al sistema GPS.

Il sistema Galileo in alcune campagne di misura presenta deviazioni standard più alte rispetto alle altre campagne, come nelle campagne di ottobre 2020, dicembre 2020, dicembre 2021, gennaio 2022, marzo 2022 e agosto 2022.

Dai confronti altimetrici si evince che in quattro campagne (giugno 2020, settembre 2020, maggio 2021, dicembre 2021) il sistema Galileo, ha permesso di ottenere prestazioni migliori rispetto a quello GPS, considerando i valori medi delle differenze altimetriche.

Per quanto riguarda le deviazioni standard dei dati altimetrici, nelle campagne in esame il sistema Galileo ha presentato valori più bassi di quello GPS in due campagne: maggio 2021 e dicembre 2021.

In tutte le campagne il numero di soluzioni Galileo è stato maggiore rispetto a quello GPS. Nonostante il numero di satelliti GPS operativi sia maggiore rispetto a quello del sistema satellitare Galileo, per ben sette campagne il sistema Galileo ha permesso di ottenere un PDOP medio più basso.

Confrontando i dati planimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS si osserva che ad esclusione di due campagne (dicembre 2020, agosto 2022) il sistema Galileo, ha permesso di ottenere valori medi confrontabili.

In quattro campagne (dicembre 2019, giugno 2020, settembre 2021, dicembre 2021) il sistema Galileo ha permesso di ottenere deviazioni standard planimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione GPS+GLONASS.

Confrontando i dati altimetrici Galileo con quelli GPS+GLONASS si osserva che in due campagne (giugno 2020, settembre 2020) il sistema satellitare Galileo, ha permesso di ottenere valori medi migliori.

In tre campagne (dicembre 2019, giugno 2020, dicembre 2021), con il sistema Galileo sono state ottenute deviazioni standard altimetriche minori rispetto a quanto ottenuto con la combinazione dei sistemi satellitari GPS+GLONASS.

Il solo sistema satellitare Galileo, ha permesso di calcolare un numero maggiore di posizioni rispetto alla combinazione GPS+GLONASS in tre campagne (giugno 2020, ottobre 2020, maggio 2021) e un numero confrontabile nella campagna di gennaio 2022.

Infine solamente in tre campagne i valori medi dei PDOP ottenuti con il sistema satellitare Galileo si discostano in modo apprezzabile rispetto ai PDOP ottenuti con la combinazione GPS+GLONASS.

Si evidenzia l'importanza di eseguire questo tipo di analisi nel tempo e di osservare il miglioramento dei risultati ottenuti in funzione del completamento della costellazione Galileo. Di fatto, nei diversi rilievi effettuati si è riscontrata una sostanziale costanza nel

numero di satelliti disponibili nell'arco delle campagne di misura che non hanno consentito di influire in modo apprezzabile sulle prestazioni raggiunte.

Da tutti i confronti effettuati è stato possibile trarre delle conclusioni generali relativamente alle prestazioni del sistema satellitare Galileo nel campo della navigazione terrestre, in ambito urbano ed extraurbano, rimarcando come le ricerche e le attività presentate in questa tesi vanno intese come attività in divenire e dovranno essere continuate e ottimizzate nel tempo al fine di poter delineare meglio le caratteristiche e le performance del sistema e aprire la strada a studi che possano permettere un eventuale miglioramento ed un'estensione delle applicazioni e delle potenzialità di Galileo in campi come quello della navigazione di veicoli terrestri, particolarmente rilevanti anche nell'ambito degli ITS (Intelligent Transport Systems) al fine di migliorare sempre di più i servizi offerti agli utenti e la sicurezza in campo stradale.

6. Bibliografia

- [1] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Galileo programme,» 13 Gennaio 2022. [Online]. Consultabile al link: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/programme>. [Consultato il giorno 15 Settembre 2022].
- [2] ESA, «BeiDou General Introduction,» 10 Agosto 2018. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction#cite_not_e-China_Daily-4. [Consultato il giorno 15 Settembre 2022].
- [3] Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office, «BeiDou Constellation Status,» 15 Settembre 2022. [Online]. Consultabile al link: <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>. [Consultato il giorno 15 Settembre 2022].
- [4] P. Snider, *Primi test statici del sistema satellitare Europeo Galileo con l'utilizzo di software open source*, Trieste: Università degli Studi di Trieste, 2018.
- [5] NovAtel Inc., *An Introduction to GNSS GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems*, Calgary, Alberta, Canada: NovAtel Inc., 2015.
- [6] J. Sanz Subirana, J. Zornoza e M. Hernández-Pajares, *GNSS Data Processing Volume I: Fundamentals and Algorithms*, Leiden, the Netherlands: ESA Communications Production Contactivity bv, Maggio 2013.
- [7] Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, «The Global Positioning System,» 22 Febbraio 2021. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gps.gov/systems/gps/>. [Consultato il giorno 17 Settembre 2022].
- [8] B. Hofmann-Wellenhof, K. Legat e M. Wieser, *Navigation. Principles of positioning and guidance*, Wien, Austria: Springer-Verlag, 2003.
- [9] A. Leick, L. Rapoport e D. Tatarnikov, *GPS Satellite Surveying*, 4th Edition, Wiley, 2015.
- [10] ESA, «GPS,» 9 Dicembre 2015. [Online]. Consultabile al link: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS>. [Consultato il giorno 17 Settembre 2022].
- [11] Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, «Control Segment,» 17 Ottobre 2017. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>. [Consultato il giorno 17 Settembre 2022].
- [12] Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, «Next Generation Operational Control System (OCX),» 9

- Dicembre 2021. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/OCX/>. [Consultato il giorno 17 Settembre 2022].
- [13] Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, «Space Segment,» 28 Giugno 2022. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>. [Consultato il giorno 17 Settembre 2022].
- [14] ESA, «GPS Space Segment,» 4 Novembre 2020. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Space_Segment. [Consultato il giorno 17 Settembre 2022].
- [15] Department of Defense of United States of America, «Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard,» Aprile 2020.
- [16] Department of Defense of United States of America, «Global Positioning System Precision Positioning Service Performance Standard,» Febbraio 2007.
- [17] Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, «New Civil Signals,» 10 Agosto 2020. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>. [Consultato il giorno 19 Settembre 2022].
- [18] U.S. Government, «Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard,» Aprile 2020. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf>. [Consultato il giorno 20 Settembre 2022].
- [19] U.S. Government, «Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard,» Febbraio 2007. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf>. [Consultato il giorno 20 Settembre 2022].
- [20] Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing/Информационно-аналитический центр координатно-временного, «GLONASS constellation status,» 21 Settembre 2022. [Online]. Consultabile al link: <https://www.glonass-iac.ru/en/sostavOG/>. [Consultato il giorno 21 Settembre 2022].
- [21] ESA, «GLONASS Space Segment,» 22 Giugno 2018. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Space_Segment. [Consultato il giorno 21 Settembre 2022].
- [22] Wikipedia, «Kosmos 2471,» 2022 Gennaio 2022. [Online]. Consultabile al link: https://en.wikipedia.org/wiki/Kosmos_2471. [Consultato il giorno 24 Settembre 2022].

- [23] Wikipedia, «GLONASS-K2,» 20 Agosto 2022. [Online]. Consultabile al link: <https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS-K2>. [Consultato il giorno 24 Settembre 2022].
- [24] Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing/Информационно-аналитический центр координатно-временного, «About GLONASS,» 2022. [Online]. Consultabile al link: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/index.php>. [Consultato il giorno 24 Settembre 2022].
- [25] ESA, «GLONASS Signal Plan,» 30 Ottobre 2019. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Signal_Plan. [Consultato il giorno 25 Settembre 2022].
- [26] ESA, «GLONASS Navigation Message,» 23 Febbraio 2012. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Navigation_Message. [Consultato il giorno 29 Settembre 2022].
- [27] Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing (PNT IAC of the Central Research Institute of Machine Building), «INTERFACE CONTROL DOCUMENTS,» Febbraio 2020. [Online]. Consultabile al link: https://www.glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en.pdf. [Consultato il giorno 29 Settembre 2022].
- [28] Wikipedia, «List of BeiDou satellites,» 3 Settembre 2022. [Online]. Consultabile al link: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_BeiDou_satellites. [Consultato il giorno 3 Ottobre 2022].
- [29] China Satellite Navigation Office, «BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard,» Maggio 2021. [Online]. Consultabile al link: en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110/P020211014595952404052.pdf. [Consultato il giorno 3 Ottobre 2022].
- [30] ESA, «GNSS and moon exploration: a great opportunity for Europe !,» 3 Luglio 2017. [Online]. Consultabile al link: https://www.cosmos.esa.int/documents/13611/3707333/20200213_Ventura_Traveset.pdf. [Consultato il giorno 3 Ottobre 2022].
- [31] Sinodefence, «BeiDou 1 Experimental Satellite Navigation System,» 24 Settembre 2008. [Online]. Consultabile al link: <http://www.sinodefence.com/space/spacecraft/beidou1.asp>. [Consultato il giorno 3 Ottobre 2022].
- [32] Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing/Информационно-аналитический центр координатно-временного, «Состав и состояние орбитальной группировки Beidou/Beidou constellation status,» 30 Settembre 2022. [Online]. Consultabile al link: <https://www.glonass-iac.ru/beidou/sostavOG/>. [Consultato il giorno 3 Ottobre 2022].

- [33] G. Hein, «Galileo and GNSS under Development 2 - Compass/Beidou, IRNSS and QZSS,» in *ESA International Summer School on GNSS*, Slettestrand, Denmark, 2010.
- [34] China Satellite Navigation Office, «BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1C (Version 1.0),» December 2017. [Online]. Consultabile al link: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608519640359959.pdf>. [Consultato il giorno 4 Ottobre 2022].
- [35] China Satellite Navigation Office, «BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2a (Version 1.0),» Dicembre 2017. [Online]. Consultabile al link: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608518432765621.pdf>. [Consultato il giorno 4 Ottobre 2022].
- [36] China Satellite Navigation Office, «BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2b (Version 1.0),» Luglio 2020. [Online]. Consultabile al link: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/202008/P020200803539206360377.pdf>. [Consultato il giorno 4 Ottobre 2022].
- [37] China Satellite Navigation Office, «BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 1.0),» Febbraio 2019. [Online]. Consultabile al link: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201902/P020190227702348791891.pdf>. [Consultato il giorno 4 Ottobre 2022].
- [38] China Satellite Navigation Office, «BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B3I (Version 1.0),» Febbraio 2018. [Online]. Consultabile al link: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608516798097666.pdf>. [Consultato il giorno 4 Ottobre 2022].
- [39] ESA, «Galileo General Introduction,» 29 Gennaio 2021. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_General_Introduction. [Consultato il giorno 4 Ottobre 2022].
- [40] The Council of the European Union, «Council Resolution of 19 July 1999 on the involvement of Europe in a new generation of satellite navigation services - Galileo-Definition Phase,» *Official Journal of the European Communities*, 3 Agosto 1999.
- [41] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Galileo System,» [Online]. Consultabile al link: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>. [Consultato il giorno 5 Ottobre 2022].
- [42] ESA, «Galileo Ground Segment,» 18 Marzo 2020. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Ground_Segment. [Consultato il giorno 5 Ottobre 2023].

- [43] ESA, «Galileo Space Segment,» 22 Luglio 2021. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Space_Segment. [Consultato il giorno 5 Ottobre 2022].
- [44] ESA, «Galileo Future and Evolutions,» 21 Maggio 2021. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Future_and_Evolutions. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2022].
- [45] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Constellation information,» [Online]. Consultabile al link: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2022].
- [46] European Commission, «Galileo goes live!,» 14 Dicembre 2016. [Online]. Consultabile al link: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_16_4366. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2022].
- [47] ESA, «Galileo clock under investigation,» ESA, 19 Gennaio 2017. [Online]. Consultabile al link: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_clock_anomalies_under_investigation. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2022].
- [48] ESA, «Electric thrusters may steer Galileo in future,» ESA, 4 Aprile 2014. [Online]. Consultabile al link: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Electric_thrusters_may_steer_Galileo_in_future. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2022].
- [49] ESA, «Galileo launch completing the constellation (video),» 10 Luglio 2018. [Online]. Consultabile al link: https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2018/07/Galileo-Launch-10-satellites-23242526-Completing-the-constellation.mp4?_=1. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2022].
- [50] ESA, «ESA signs contract for new generation of Galileo,» 28 Maggio 2021. [Online]. Consultabile al link: https://www.esa.int/Applications/Navigation/ESA_signs_contract_for_new_generation_of_Galileo. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2022].
- [51] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Constellation Information,» 7 Ottobre 2022. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>. [Consultato il giorno 7 Ottobre 2022].
- [52] ESA, «Galileo Services,» 29 Gennaio 2021. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Services. [Consultato il giorno 10 Ottobre 2022].
- [53] ESA, «Galileo Open Service (OS),» 29 Gennaio 2021. [Online]. Consultabile al link: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Open_Service_\(OS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Open_Service_(OS)). [Consultato il giorno 9 Ottobre 2022].

- [54] EUSPA, «Galileo Open Service Navigation Message Authentication (OSNMA),» [Online]. Consultabile al link: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-open-service-navigation-message-authentication-osnma>. [Consultato il giorno 9 Ottobre 2022].
- [55] ESA, «Galileo High Accuracy Service (HAS),» 27 Agosto 2021. [Online]. Consultabile al link: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_High_Accuracy_Service_\(HAS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_High_Accuracy_Service_(HAS)). [Consultato il giorno 9 Ottobre 2022].
- [56] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Galileo High Accuracy Service (HAS),» 23 Maggio 2021. [Online]. Consultabile al link: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>. [Consultato il giorno 9 Ottobre 2022].
- [57] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «PRS,» 9 Giugno 2021. [Online]. Consultabile al link: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/prs>. [Consultato il giorno 9 Ottobre 2022].
- [58] ESA, «Galileo Public Regulated Service (PRS),» 16 Marzo 2020. [Online]. Consultabile al link: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Public_Regulated_Service_\(PRS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Public_Regulated_Service_(PRS)). [Consultato il giorno 9 Ottobre 2022].
- [59] ESA, «Galileo Search and Rescue Service,» 26 Marzo 2020. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Search_and_Rescue_Service. [Consultato il giorno 10 Ottobre 2022].
- [60] ESA, «Galileo Signal Plan,» 1 Marzo 2022. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan. [Consultato il giorno 11 Ottobre 2022].
- [61] ESA, «Galileo Navigation Message,» 4 Giugno 2021. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Navigation_Message. [Consultato il giorno 11 Ottobre 2022].
- [62] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Galileo - Open Service - Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD v2.0),» Gennaio 2021. [Online]. Consultabile al link: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf. [Consultato il giorno 11 Ottobre 2022].
- [63] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Galileo – Open Service – Service Definition Document,» Novembre 2021. [Online]. Consultabile al link: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.2.pdf. [Consultato il giorno 13 Ottobre 2022].

- [64] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Galileo-OS-Quarterly-Performance_Report-Q2-2022 April - June 2022,» 2022. [Online]. Consultabile al link: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-Quarterly-Performance_Report-Q2-2022.pdf. [Consultato il giorno 14 Ottobre 2022].
- [65] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Galileo High Accuracy Service, Info Note,» 2020. [Online]. Consultabile al link: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_HAS_Info_Note.pdf. [Consultato il giorno 13 Ottobre 2022].
- [66] ESA, «Galileo Performances,» 21 Maggio 2021. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Performances. [Consultato il giorno 13 Ottobre 2022].
- [67] EUSPA European Union Agency for the Space Programme, «Galileo - Search And Rescue - Service Definition Document (SAR SDD v2.0),» Gennaio 2020. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-SAR-SDD.pdf>. [Consultato il giorno 14 Ottobre 2022].
- [68] EUSPA European Agency for the Space Programme, «SAR Service Quarterly Performance Report - April - June 2022,» 2022. [Online]. Consultabile al link: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-EnS-SAR-Quarterly-Performance_Report-Q2-2022.pdf. [Consultato il giorno 14 Ottobre 2022].
- [69] ESA, «NAVIC,» 22 Aprile 2021. [Online]. Consultabile al link: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NAVIC>. [Consultato il giorno 17 Ottobre 2022].
- [70] ISRO Satellite Centre, «IRNSS - Indian Regional Navigation Satellite System,» ISRO Satellite Centre, 24 Febbraio 2019. [Online]. Consultabile al link: <http://www.isac.gov.in/navigation/irnss.jsp>. [Consultato il giorno 17 Ottobre 2022].
- [71] Inside GNSS, «India's IRNSS Now Part of World Wide Radio Navigation System,» 7 Dicembre 2020. [Online]. Consultabile al link: <https://insidegnss.com/indias-irnss-now-part-of-world-wide-radio-navigation-system/>. [Consultato il giorno 17 Ottobre 2022].
- [72] ESA, «QZSS,» 29 Settembre 2021. [Online]. Consultabile al link: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/QZSS>. [Consultato il giorno 17 Ottobre 2022].
- [73] Quasi-Zenith Satellite System, «List of Positioning Satellites,» 16 Settembre 2022. [Online]. Consultabile al link:

- <https://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html#QZSS>. [Consultato il giorno 17 Ottobre 2022].
- [74] Quasi-Zenith Satellite System, «Quasi-Zenith Satellite Orbit (QZO),» 2022. [Online]. Consultabile al link: <http://qzss.go.jp/en/technical/technology/orbit.html>. [Consultato il giorno 17 Ottobre 2022].
- [75] The Cabinet Office, Government of Japan ("CAO") and Quasi-Zenith Satellite System Services Inc., «Quasi-Zenith Satellite System Performance Standard (PS-QZSS-003),» 17 Marzo 2022. [Online]. Consultabile al link: <https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/ps-qzss-003.pdf?t=1666021124253>. [Consultato il giorno 17 Ottobre 2022].
- [76] G. Hein, «GNSS Interoperability: Achieving a Global System of Systems or “Does Everything Have to Be the Same?”»,» *Inside GNSS*, Vol. %1 di %2January-February, pp. 57-60, 2006.
- [77] IERS, «IERS Technical Note No.36,» 2019. [Online]. Consultabile al link: https://iers-conventions.obspm.fr/conventions_versions.php . [Consultato il giorno 20 Gennaio 2023].
- [78] C. Boucher, «Terrestrial coordinate systems and frames,» *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics* , pp. 3289-3292, 2001.
- [79] C. Gioia e D. Borio, «A statistical characterization of the Galileo-to-GPS inter-system bias,» *Journal of Geodesy*, vol. 90, n. November 2016, pp. 1279-1291, 2016.
- [80] A. Simsky, J.-M. Sleewaegen, M. Hollreiser e M. Crisci, «Performance Assessment of Galileo Ranging Signals Transmitted by GSTB-V2 Satellites,» in *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006)*, Fort Worth, TX, 2006.
- [81] E. Rooney, M. Unwin, G. Gatti, M. Falcone, V. Alpe, M. Malik e D. Hannes, «GIOVE on the Line – Latest results and A-2 Design,» *InsideGNSS*, vol. January/February, 2008.
- [82] A. Simsky, D. Mertens, J.-M. Sleewaegen, W. De Wilde, M. Hollreiser e M. Crisci, «Multipath and Tracking Performance of Galileo Ranging Signals Transmitted by GIOVE-B,» in *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, Savannah, GA, September 2008.
- [83] P. Steigenberger, U. Hugentobler e O. Montenbruck, «First demonstration of Galileo-only positioning,» *GPS World*, vol. 24, pp. 14-15, 2013.
- [84] D. Odijk, P. Teunissen e L. Huisman, «First results of mixed GPS+ GIOVE single-frequency RTK in Australia,» *Journal of Spatial Science*, vol. 57, pp. 3-18, 2012.
- [85] M. Rabbou e A. El-Rabbany, «Performance Analysis of GPS/GALILEO PPP Model for Static and Kinematic Applications,» *Geomatica*, vol. 69, p. 75–81, 2015.

- [86] M. Rabbou e A. El-Rabbany, «Performance analysis of precise point positioning using multi-constellation GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou,» *Survey Review*, vol. 49, pp. 39-50, 2017.
- [87] T. Liu, Y. Yuan, B. Zhang, N. Wang, B. Tan e Y. Chen, «Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations,» *Journal of Geodesy*, vol. 91, pp. 253-268, 2017.
- [88] A. Afifi e A. El-Rabbany, «Single Frequency GPS/Galileo Precise Point Positioning Using Un-Differenced and Between-Satellite Single Difference Measurements,» *Geomatica*, vol. 68, pp. 195-205, 2015.
- [89] R. Odolinski, P. Teunissen e D. Odijk, «Combined BDS, Galileo, QZSS and GPS single-frequency RTK,» *GPS Solutions*, vol. 19, p. 151–163, 2014.
- [90] P. Li, X. Jiang, X. Zhang, M. Ge e H. Schuh, «GPS + Galileo + BeiDou precise point positioning with triple-frequency ambiguity resolution,» *GPS Solutions*, vol. 24, pp. 1-13, 2020.
- [91] L. Pan, X. Zhang e J. Liu, «A comparison of three widely used GPS triple-frequency precise point positioning models,» *GPS Solutions*, vol. 23, n. 121, 2019.
- [92] M. Rabbou, M. Abdelazeem e S. Morsy, «Performance Evaluation of Triple-Frequency GPS/Galileo Techniques for Precise Static and Kinematic Applications,» *Sensors*, vol. 21, p. 3396, 2021.
- [93] J. Song e L. Zhao, «Comparison Analysis on the Accuracy of Galileo PPP Using Different Frequency Combinations in Europe,» *Applied Sciences*, vol. 11, n. 21, p. 10020, 2021.
- [94] G. Katsigianni, F. Perosanz, S. Loyer e M. Gupta, «Galileo millimeter-level kinematic precise point positioning with ambiguity resolution,» *Earth, Planets and Space*, vol. 71, n. 76, 2019.
- [95] S. Zaminpardaz e P. Teunissen, «Analysis of Galileo IOV + FOC signals and E5 RTK performance,» *GPS Solutions*, vol. 21, 2017.
- [96] P. Steigenberger e O. Montenbruck, «Galileo status: orbits, clocks, and positioning,» *GPS Solutions*, vol. 21, pp. 319-331, 2017.
- [97] T. Hadas, K. Kazmierski e K. Sośnica, «Performance of Galileo-only dual-frequency absolute positioning using the fully serviceable Galileo constellation,» *GPS Solutions*, vol. 23, n. 108, 2019.
- [98] P. Hafner, M. Wieser, N. Kuhnreiter, B. Wiesenhofer, C. Abart e B. Hofmann-Wellenhof, «GNSS-based trajectories for demanding applications,» in *2009 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, Hannover, 2009.
- [99] X. Fengyu, Y. Shirong, X. Pengfei, Z. Lewen, J. Nana, C. Dezhong e H. Guangbao, «Assessing the latest performance of Galileo-only PPP and the contribution of Galileo to Multi-GNSS PPP,» *Advances in Space Research*, vol. 63, n. 9, pp. 2784-2795, 1 May 2019.

- [100] S. Öğütçü e T. FARHAN, «Assessing the Contribution of Galileo to GPS+GLONASS Single Point Positioning Navigation,» *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, vol. 7, n. 3, pp. 1377-1383, 2020.
- [101] M. Hernandez-Pajares, M. Juan, J. Sanz, P. Ramos-Bosch, A. Aragon-Angel, R. Orus, W. Ochieng, S. Feng, M. Jofre, P. Coutinho, J. Samson e M. Tossaint, «Enhanced Precise Point Positioning for GNSS Users,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, n. 10, pp. 4213-4222, 2012.
- [102] K. Krasuski e M. Bakula, «Operation and reliability of an onboard GNSS receiver during an in-flight test,» *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, vol. 111, pp. 75-88, 2021.
- [103] M. Li, T. Xu, F. Flechtner, C. Förste, B. Lu e K. He, «Improving the Performance of Multi-GNSS (Global Navigation Satellite System) Ambiguity Fixing for Airborne Kinematic Positioning over Antarctica,» *Remote Sensing*, vol. 11, n. 992, 2019.
- [104] T. Dautermann, B. Korn, K. Flaig e M. de Haag, «GNSS Double Differences Used as Beacon Landing System for Aircraft Instrument Approach,» *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 22, p. 1455–1463, 2021.
- [105] E. Hinüber, C. Reimer, T. Schneider e M. Stock, «INS/GNSS Integration for Aerobatic Flight Applications and Aircraft Motion Surveying,» *Sensors*, vol. 17, n. 941, 2017.
- [106] S. Martin, H. Kuhlen, S. Schlotzer, A. Schmitz-Peiffer, M. Voithenberg e H. Dietz, «SEA GATE—A Maritime Galileo Testbed in the Port of Rostock,» in *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007)*, Fort Worth, TX, USA, 2007.
- [107] Forschungshafen Rostock, «Galileo Testbed SEA Gate,» [Online]. Consultabile al link: <https://www.forschungshafen.de/en/galileo-testbed-sea-gate/>. [Consultato il giorno 18 Gennaio 2023].
- [108] S. Marila, O. Andrei, H. Koivula, P. Häkli e M. Bilker-Koivula, «GNSS Positioning Aspects for the Intelligent Shipping Test Laboratory at Rauma Harbor,» in *Proceedings of the International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS 2020)*, Tampere, Finland, 2020.
- [109] E. Tarantino, A. Novelli, R. Cefalo, T. Sluga e A. Tommasi, «Single-Frequency Kinematic Performance Comparison between Galileo, GPS, and GLONASS Satellite Positioning Systems Using an MMS-Generated Trajectory as a Reference: Preliminary Results,» *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 7, n. 3, p. 122, 2018.
- [110] L. Bastos, P. Buist, R. Cefalo, J. Goncalves, A. Ivan, A. Magalhaes, A. Pandeale, M. Porretta, A. Radutu, T. Sluga e P. Snider, «Kinematic Galileo and GPS Performances in Aerial, Terrestrial and Maritime Environments,» *Remote Sensing*, vol. 14, 2022.
- [111] P. Buist, A. Mozo e H. Tork, «Overview of the Galileo Reference Centre: Mission Architecture and Operational Concept,» in *Proceedings of the 30th International*

- Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS + 2017)*, Portland, OR, USA, 2017.
- [112] EUSPA, «GSA Market Report Issue 6,» 2019. [Online]. Consultabile al link: <https://www.gsa.europa.eu/gnss-market-report-issue-6-october-2019>. [Consultato il giorno 20 Gennaio 2023].
- [113] A. El-Rabbany, *Introduction to GPS: the Global Positioning System*, Boston London: Artech House, 2002.
- [114] R. Cefalo e G. Manzoni, *G.P.S. Global Positioning System - Principi ed Applicazioni*, Trieste: Edizioni Goliardiche, 2003.
- [115] D. J. C. C. P. Sul Gee Park, «Carrier Phase Based Navigation Algorithm Design Using Carrier Phase Statistics in the Weak Signal Environment,» *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, vol. 1, n. 1, pp. 7-14, 2012.
- [116] S. O. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 5th edition, Pearson, 2013.
- [117] L. Zhang, S. Wang, M. Selezneva e K. Neusypin, «A new adaptive Kalman filter for navigation systems of carrier-based aircraft,» *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 35, n. 1, pp. 416-425, 2022.
- [118] ESA, «GNSS Measurements Modelling,» 17 Gennaio 2013. [Online]. Consultabile al link: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Measurements_Modelling. [Consultato il giorno 5 Novembre 2022].
- [119] T. Takasu, «RTKLIB ver. 2.4.2 Manual,» 29 Aprile 2013. [Online]. Consultabile al link: https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf. [Consultato il giorno 4 Novembre 2022].
- [120] R. Cefalo, A. Novelli, S. P. Sluga, T., T. Tarantino e A. Tommasi, «Static and kinematic surveys using GNSS multi-constellation receivers and GPS, GLONASS and GALILEO data,» *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10407, 2018.
- [121] R. Maseroli, «Relazione sul calcolo della rete di stazioni permanenti GNSS "Marussi" della Regione Friuli Venezia Giulia,» Gennaio 2017. [Online]. Consultabile al link: https://rem.regione.fvg.it/rem-fvg/docs/Rel_Inquadramento_Marussi_02-2017.pdf. [Consultato il giorno 5 Gennaio 2023].

Indice delle figure

Figura 2.1 Segmenti di un sistema GNSS [5]	6
Figura 2.2 Assegnazione delle bande dei sistemi GNSS [6].....	8
Figura 2.3 Segmento di controllo GPS [11]	11
Figura 2.4 Numero e caratteristiche dei satelliti dei vari blocchi [13].....	15
Figura 2.5 Spettro dei segnali GPS prima (parte superiore figura) e dopo la modernizzazione (parte inferiore figura) [6]	19
Figura 2.6 Struttura del messaggio navigazionale GPS prima della modernizzazione [6]..	21
Figura 2.7 Segmento di controllo del sistema GLONASS [6]	24
Figura 2.8 Caratteristiche della costellazione GLONASS [24]	26
Figura 2.9 Assegnazione agli antipodi dei satelliti GLONASS. Il parametro $i(k)$ indica che il satellite nello slot dell'almanacco i trasmette sulla frequenza numero k [25].....	28
Figura 2.10 Spettro dei segnali GLONASS. I segnali FDMA prima e dopo la modernizzazione (parte superiore della figura) e i nuovi segnali CDMA dopo la modernizzazione (parte inferiore della figura) [6]	30
Figura 2.11 Struttura del messaggio navigazionale GLONASS	32
Figura 2.12 Costellazione del sistema BeiDou (Compass) [30]	36
Figura 2.13 Segmento di controllo del sistema Galileo [41]	43
Figura 2.14 Segmento spaziale Galileo [43]	46
Figura 2.15 Funzionamento del sistema COSPAS-SARSAT [59]	53
Figura 2.16 Spettro dei segnali Galileo [6]	56
Figura 2.17 Struttura del messaggio navigazionale Galileo [61].....	57
Figura 2.18 Disponibilità del servizio nella peggiore posizione per l'utente [64]	60
Figura 2.19 Disponibilità del servizio in una posizione di tipo medio per l'utente [64]	60
Figura 2.20 Horizontal Positioning Error (HPE) del servizio Open Service Galileo a giugno 2022 [64]	61
Figura 2.21 Vertical Positioning Error (VPE) del servizio Open Service Galileo a giugno 2022 [64]	62
Figura 2.22 Architettura del sistema IRNSS/NAVIC [70]	66
Figura 2.23 Orbita dei satelliti QZSS [74]	68
Figura 2.24 Aree servite dal servizio SLAS [75]	70
Figura 4.1 Misura dell'intervallo di tempo impiegato dal segnale per percorrere la distanza satellite-punto a terra mediante il confronto fra il segnale di codice generato nel ricevitore e il segnale ricevuto dal generico satellite [6].....	84
Figura 4.2 Principi del posizionamento di tipo relativo [113]	86
Figura 4.3 Misure di fase di segnali GNSS [115].....	89
Figura 4.4 Gli errori nelle misure GNSS [118]	91
Figura 4.5 Punto di riferimento ARP, PCO e PCV dell'antenna del ricevitore [119]	92
Figura 4.6 Particolare del file ANTEX utilizzato per l'elaborazione dei dati.....	93
Figura 4.7 Buona geometria satellitare con basso PDOP (a sinistra) e cattiva geometria con alto PDOP (a destra)	97

Figura 4.8 Effetti dell'atmosfera sulla propagazione dei segnali [6]	98
Figura 4.9 Percorso del segnale diretto e quello riflesso da superfici [6]	101
Figura 4.10 Numero di satelliti Galileo visibili durante la giornata scelta per i rilievi (cut-off 15°).....	104
Figura 4.11 Elevazione dei satelliti Galileo durante la giornata scelta per i rilievi (cut-off 15°)	104
Figura 4.12 Skyplot dei satelliti Galileo durante la giornata scelta per i rilievi (cut-off 15°)	105
Figura 4.13 DOP relativi ai satelliti della costellazione Galileo durante la giornata scelta per i rilievi (cut-off 15°).....	105
Figura 4.14 Rilievo urbano.....	106
Figura 4.15 Rilievo extraurbano	106
Figura 4.16 Il veicolo MMS (a sinistra) e la strumentazione Applanix (a destra).....	108
Figura 4.17 Ricevitore Septentrio AsteRx-U e la sua antenna PolaNt-x MF.....	108
Figura 4.18 Posizionamento della Total Station per il rilievo dei bracci di leva.....	109
Figura 4.19 Posizionamento dei target sulla superficie dell'involucro dell'IMU.....	111
Figura 4.20 Posizionamento del prisma e misure delle altezze strumentali rispetto l'ARP delle antenne.....	112
Figura 4.21 Coordinate relative dei componenti MMS e dell'antenna Septentrio.....	113
Figura 4.22 Monografia della Stazione di riferimento permanente di Trieste "TRSE" appartenente alla rete GNSS "Antonio Marussi"	115
Figura 3.23 Precisione di posizionamento della traiettoria di riferimento MMS (Mobile Mapping System) in ambito urbano	116
Figura 3.24 Precisione di posizionamento della traiettoria di riferimento MMS (Mobile Mapping System) in ambito extraurbano	117
Figura 4.25 Script in MATLAB per l'import dei file txt di output delle elaborazioni GrafNav	120
Figura 4.26 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito urbano.....	121
Figura 4.27 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito urbano.....	121
Figura 4.28 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano	122
Figura 4.29 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano.....	122
Figura 4.30 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano	122
Figura 4.31 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano	123
Figura 4.32 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano	123

Figura 4.33 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo Ambito urbano.....	123
Figura 4.34 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	124
Figura 4.35 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	124
Figura 4.36 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS – Ambito urbano	135
Figura 4.37 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati Galileo – Ambito urbano	135
Figura 4.38 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano.....	136
Figura 4.39 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano.....	136
Figura 4.40 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	136
Figura 4.41 Skyplot dei satelliti GPS – Ambito urbano.....	137
Figura 4.42 Skyplot dei satelliti GLONASS – Ambito urbano.....	138
Figura 4.43 Skyplot dei satelliti Galileo – Ambito urbano.....	138
Figura 4.44 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS – Ambito urbano	139
Figura 4.45 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	139
Figura 4.46 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s) – Ambito urbano.....	140
Figura 4.47 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS L1/L2 – Ambito urbano	140
Figura 4.48 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s) – Ambito urbano	141
Figura 4.49 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati Galileo E1/E5b – Ambito urbano	141
Figura 4.50 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L2, E1/E5b – Ambito urbano	142
Figura 4.51 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L2, G1/G2 – Ambito urbano	142
Figura 4.52 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L2, G1/G2, E1/E5b – Ambito urbano	143
Figura 4.53 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)	143
Figura 4.54 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)	144
Figura 4.55 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano	145

Figura 4.56 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano	145
Figura 4.57 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano	145
Figura 4.58 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano	146
Figura 4.59 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano.....	146
Figura 4.60 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano.....	146
Figura 4.61 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano.....	147
Figura 4.62 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano.....	147
Figura 4.63 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano	147
Figura 4.64 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano	148
Figura 4.65 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS – Ambito extraurbano	159
Figura 4.66 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati Galileo – Ambito extraurbano	159
Figura 4.67 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano.....	160
Figura 4.68 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano.....	160
Figura 4.69 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Septentrio per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano	160
Figura 4.70 Skyplot dei satelliti GPS – Ambito extraurbano.....	162
Figura 4.71 Skyplot dei satelliti GLONASS – Ambito extraurbano	162
Figura 4.72 Skyplot dei satelliti Galileo – Ambito extraurbano.....	163
Figura 4.73 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS – Ambito extraurbano	163
Figura 4.74 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano.....	164
Figura 4.75 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s) – Ambito extraurbano.....	164
Figura 4.76 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS L1/L2 – Ambito extraurbano	165
Figura 4.77 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (satelliti da E02 a E36) rispetto al tempo (s) – Ambito extraurbano	165
Figura 4.78 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati Galileo E1/E5b – Ambito extraurbano	166

Figura 4.79 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L2, E1/E5b – Ambito extraurbano	166
Figura 4.80 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L2, G1/G2 – Ambito extraurbano.....	167
Figura 4.81 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L2, G1/G2, E1/E5b – Ambito extraurbano	167
Figura 4.82 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)	168
Figura 4.83 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)	169
Figura 4.84 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS – Ambito urbano	170
Figura 4.85 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS – Ambito urbano	170
Figura 4.86 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano	170
Figura 4.87 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano	171
Figura 4.88 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano.....	171
Figura 4.89 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano.....	171
Figura 4.90 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano.....	172
Figura 4.91 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+Galileo Ambito urbano.....	172
Figura 4.92 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	172
Figura 4.93 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	173
Figura 4.94 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS – Ambito urbano	183
Figura 4.95 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati Galileo – Ambito urbano	183
Figura 4.96 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano.....	184
Figura 4.97 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano.....	184
Figura 4.98 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	184
Figura 4.99 Skyplot dei satelliti GPS – Ambito urbano.....	186

Figura 4.100 Skyplot dei satelliti GLONASS – Ambito urbano	186
Figura 4.101 Skyplot dei satelliti Galileo – Ambito urbano	187
Figura 4.102 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS – Ambito urbano	187
Figura 4.103 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	188
Figura 4.104 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (satelliti da G05 a G30) rispetto al tempo (s) – Ambito urbano	188
Figura 4.105 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS L1/L5 – Ambito urbano.....	189
Figura 4.106 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s) – Ambito urbano.....	189
Figura 4.107 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati Galileo E1/E5a – Ambito urbano.....	190
Figura 4.108 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L5, E1/E5a – Ambito urbano	190
Figura 4.109 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L5, G1 – Ambito urbano	191
Figura 4.110 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L5, G1, E1/E5a – Ambito urbano	191
Figura 4.111 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde).....	192
Figura 4.112 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde).....	193
Figura 4.113 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano	194
Figura 4.114 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano	194
Figura 4.115 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano	195
Figura 4.116 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano	195
Figura 4.117 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano.....	195
Figura 4.118 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano.....	196
Figura 4.119 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano.....	196
Figura 4.120 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano.....	196
Figura 4.121 Differenze planimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano	197

Figura 4.122 Differenze altimetriche (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano	197
Figura 4.123 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS – Ambito extraurbano	208
Figura 4.124 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati Galileo – Ambito extraurbano	208
Figura 4.125 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano	209
Figura 4.126 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano	209
Figura 4.127 Grafico PDOP/n° satelliti relativo alla traiettoria Smartphone per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano	209
Figura 4.128 Skyplot dei satelliti GPS – Ambito extraurbano	210
Figura 4.129 Skyplot dei satelliti GLONASS – Ambito extraurbano	211
Figura 4.130 Skyplot dei satelliti Galileo – Ambito extraurbano	211
Figura 4.131 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS – Ambito extraurbano.....	212
Figura 4.132 Skyplot dei satelliti GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano.....	212
Figura 4.133 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale GPS L1 (satelliti da G01 a G30) rispetto al tempo (s) – Ambito extraurbano.....	213
Figura 4.134 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS L1/L5 – Ambito extraurbano.....	213
Figura 4.135 Rapporto segnale/rumore C/N0 (dB/Hz) per il segnale Galileo E1 (satelliti da E02 a E30) rispetto al tempo (s) – Ambito extraurbano	214
Figura 4.136 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati Galileo E1/E5a – Ambito extraurbano.....	214
Figura 4.137 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+Galileo L1/L5, E1/E5a – Ambito extraurbano.....	215
Figura 4.138 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS L1/L5, G1 – Ambito extraurbano.....	215
Figura 4.139 Grafico relativo alle ambiguità fixed/float ottenuto con i dati GPS+GLONASS+Galileo L1/L5, G1, E1/E5a – Ambito extraurbano	216
Figura 4.140 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)	217
Figura 4.141 Dettaglio delle traiettorie Galileo (in azzurro) e GPS (in rosso) rispetto a quella di riferimento MMS (in verde)	218
Figura 4.142 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	220
Figura 4.143 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022.....	220
Figura 4.144 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.	221

Figura 4.145 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	221
Figura 4.146 Differenze planimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.	222
Figura 4.147 Differenze planimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	222
Figura 4.148 Differenze altimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.	223
Figura 4.149 Differenze altimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	223
Figura 4.150 n° di epoche calcolate con i dati Galileo e GPS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	224
Figura 4.151 n° di epoche calcolate con i dati Galileo e GPS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	224
Figura 4.152 n° satelliti e PDOP medi Galileo e GPS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	225
Figura 4.153 n° satelliti e PDOP medi Galileo e GPS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	225
Figura 4.154 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	226
Figura 4.155 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022	226
Figura 4.156 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano – Dicembre 2021 - Maggio 2021	227
Figura 4.157 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	227
Figura 4.158 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	228
Figura 4.159 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	228
Figura 4.160 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	229
Figura 4.161 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022	229
Figura 4.162 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	230

Figura 4.163 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022.....	230
Figura 4.164 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2021 - Maggio 2021	232
Figura 4.165 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	232
Figura 4.166 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	233
Figura 4.167 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	233
Figura 4.168 n° satelliti e PDOP medi GPS + Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	234
Figura 4.169 n° satelliti e PDOP medi GPS + Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022.....	234
Figura 4.170 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS + Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	235
Figura 4.171 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche medie (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS + Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022.....	235
Figura 4.172 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	236
Figura 4.173 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022.....	236
Figura 4.174 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	237
Figura 4.175 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	237
Figura 4.176 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS + Galileo – Ambito urbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	238
Figura 4.177 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS + Galileo – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022.....	238
Figura 4.178 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	240

Figura 4.179 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	240
Figura 4.180 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	241
Figura 4.181 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	241
Figura 4.182 Differenze planimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	242
Figura 4.183 Differenze planimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	242
Figura 4.184 Differenze altimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	243
Figura 4.185 Differenze altimetriche medie e deviazioni standard (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	243
Figura 4.186 n° di epoche calcolate con i dati Galileo e GPS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	244
Figura 4.187 n° di epoche calcolate con i dati Galileo e GPS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022.....	244
Figura 4.188 n° satelliti e PDOP medi Galileo e GPS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	245
Figura 4.189 n° satelliti e PDOP medi Galileo e GPS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022.....	245
Figura 4.190 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	246
Figura 4.191 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS – Ambito urbano – Settembre 2021 – Agosto 2022	246
Figura 4.192 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano – Dicembre 2021 - Maggio 2021.....	247
Figura 4.193 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022.....	247

Figura 4.194 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	248
Figura 4.195 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	248
Figura 4.196 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	249
Figura 4.197 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS – Ambito extraurbano – Settembre 2021 – Agosto 2022.....	249
Figura 4.198 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	250
Figura 4.199 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 – Agosto 2022.....	250
Figura 4.200 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2021 - Maggio 2021.....	252
Figura 4.201 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022.....	252
Figura 4.202 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	253
Figura 4.203 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	253
Figura 4.204 n° satelliti e PDOP medi GPS + Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	254
Figura 4.205 n° satelliti e PDOP medi GPS + Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 – Agosto 2022.....	254
Figura 4.206 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS + Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	255
Figura 4.207 Valori medi delle differenze planimetriche e altimetriche medie (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS + GLONASS + Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 – Agosto 2022.....	255
Figura 4.208 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	257
Figura 4.209 Deviazioni standard planimetriche e altimetriche (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per i dati GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022	257

Figura 4.210 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021.....	258
Figura 4.211 n° di epoche calcolate con i dati Galileo, GPS e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano – Settembre 2021 - Agosto 2022.....	258
Figura 4.212 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS + Galileo – Ambito extraurbano – Dicembre 2019 - Maggio 2021	259
Figura 4.213 n° satelliti e PDOP medi GPS + GLONASS + Galileo – Ambito extraurbano– Settembre 2021 – Agosto 2022	259

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 Frequenze e lunghezze d'onda delle portanti GPS L1 e L2.....	15
Tabella 2.2 Segnali GPS attuali e futuri [6].....	19
Tabella 2.3 Accuratezza in termini di posizione/velocità/tempo per il sistema GPS in modalità SPS [18]	22
Tabella 2.4 Segnali GLONASS [6].....	29
Tabella 2.5 Struttura del segnale GLONASS [6].....	29
Tabella 2.6 Segnali trasmessi dalle diverse generazioni di satelliti GLONASS	30
Tabella 2.7 Accuratezza in termini di posizione/tempo per il sistema GLONASS in modalità Open Service secondo [27].....	33
Tabella 2.8 Segnali navigazionali del sistema BeiDou Phase II [33]	37
Tabella 2.9 Segnali navigazionali del sistema BeiDou Phase III (dati ottenuti da [29])	38
Tabella 2.10 Corrispondenze tra tipi di satelliti BeiDou in orbita, segnali e messaggi navigazionali [29]	38
Tabella 2.11 Accuratezza in termini di posizione per il sistema BeiDou in modalità Open Service secondo [29]	40
Tabella 2.12 Accuratezza in termini di tempo per il sistema BeiDou in modalità Open Service secondo [29].....	40
Tabella 2.13 Accuratezza in termini di velocità per il sistema BeiDou in modalità Open Service secondo [29]	41
Tabella 2.14 Caratteristiche dei satelliti Galileo [43]	49
Tabella 2.15 Segnali navigazionali del sistema Galileo [60] [61]	55
Tabella 2.16 Allocazione dei messaggi e contenuto generale dei dati [62].....	57
Tabella 2.17 Struttura dei frame [61].....	57
Tabella 2.18 Parametri del messaggio navigazionale del sistema Galileo [61]	59
Tabella 2.19 Performance previste dal servizio Open Service Galileo (media globale, in metri, accuratezza del 95%) [63].....	61
Tabella 2.20 Prestazioni dei servizi HAS [65] [66]	63
Tabella 2.21 Performances per il servizio Public Regulated Service Galileo [66]	63
Tabella 2.22 Minimum Performance Levels per il servizio SAR Galileo Forward Link [67] [66]	64
Tabella 2.23 Minimum Performance Levels per il servizio SAR Galileo Return Link [67] [66]	64
Tabella 2.24 Minimum Performance Levels per il servizio SAR Galileo Space Segment [67] [66]	64
Tabella 2.25 Accuratezza del servizio SLAS [75].....	70
Tabella 2.26 Accuratezza del servizio CLAS [75]	71
Tabella 2.27 Sistemi di riferimento temporali [8]	75
Tabella 4.1 Mensilità ed anno in cui si sono svolte le campagne di misura	103
Tabella 4.2 Dati tecnici relativi alle misure angolari della Total Station Leica TS02	109

Tabella 4.3 Dati tecnici relativi alla portata strumentale con diverse tipologie di riflettore della Total Station Leica TS02	110
Tabella 4.4 Dati tecnici relativi alla portata strumentale senza riflettori della Total Station Leica TS02	110
Tabella 4.5 Coordinate delle antenne dei dispositivi utilizzati nel sistema di riferimento dell'IMU del sistema Applanix,	112
Tabella 4.6 Differenze planimetriche ΔE (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	124
Tabella 4.7 Differenze planimetriche ΔN (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo - Ambito urbano	125
Tabella 4.8 Differenze altimetriche Δh (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	126
Tabella 4.9 Percentuali di soluzioni di tipo fixed, float, code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni	127
Tabella 4.10 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e Galileo	127
Tabella 4.11 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS	128
Tabella 4.12 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+Galileo	128
Tabella 4.13 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo	129
Tabella 4.14 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e Galileo	130
Tabella 4.15 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS	131
Tabella 4.16 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+Galileo	132
Tabella 4.17 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo	133
Tabella 4.18 Statistiche relative al PDOP e al n° di satelliti per i dati GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	137
Tabella 4.19 Differenze planimetriche ΔE (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano...	148
Tabella 4.20 Differenze planimetriche ΔN (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano...	148
Tabella 4.21 Differenze altimetriche Δh (m) tra le traiettorie Septentrio e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano...	150
Tabella 4.22 Percentuali di soluzioni di tipo fixed, float, code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni	151

Tabella 4.23 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e Galileo	152
Tabella 4.24 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS.....	152
Tabella 4.25 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+Galileo.....	152
Tabella 4.26 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo	153
Tabella 4.27 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e Galileo	154
Tabella 4.28 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS.....	155
Tabella 4.29 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+Galileo.....	156
Tabella 4.30 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo	157
Tabella 4.31 Statistiche relative al PDOP e al n° di satelliti per i dati GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano.....	161
Tabella 4.32 Differenze planimetriche ΔE (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano.....	173
Tabella 4.33 Differenze planimetriche ΔN (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano.....	173
Tabella 4.34 Differenze altimetriche Δh (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano.....	175
Tabella 4.35 Percentuali di soluzioni di tipo fixed, float, code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni.....	176
Tabella 4.36 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e Galileo	177
Tabella 4.37 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS.....	177
Tabella 4.38 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+Galileo.....	177
Tabella 4.39 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo	178
Tabella 4.40 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e Galileo	179
Tabella 4.41 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS.....	179
Tabella 4.42 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+Galileo.....	180

Tabella 4.43 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo.....	181
Tabella 4.44 Statistiche relative al PDOP e al n° di satelliti per i dati GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo – Ambito urbano	185
Tabella 4.45 Differenze planimetriche ΔE (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano...	197
Tabella 4.46 Differenze planimetriche ΔN (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano...	198
Tabella 4.47 Differenze altimetriche Δh (m) tra le traiettorie Smartphone e MMS per GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo e GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano...	199
Tabella 4.48 Percentuali di soluzioni di tipo fixed, float, code e No data rispetto al totale delle epoche per le diverse combinazioni di costellazioni	200
Tabella 4.49 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e Galileo	201
Tabella 4.50 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS.....	201
Tabella 4.51 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+Galileo	201
Tabella 4.52 Matrice di comparazione relativa alle % di tipologie di soluzione ottenute con Il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo.....	202
Tabella 4.53 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e Galileo	202
Tabella 4.54 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS.....	203
Tabella 4.55 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+Galileo	205
Tabella 4.56 Matrice di comparazione relativa alle differenze planimetriche e altimetriche medie ottenute con il sistema GPS e GPS+GLONASS+Galileo.....	206
Tabella 4.57 Statistiche relative al PDOP e al n° di satelliti per i dati GPS, Galileo, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo – Ambito extraurbano.....	210

Riconoscimenti

I risultati presentati in questa Tesi sono stati co-finanziati dall'Unione Europea e dall'**European Union Agency for the Space Programme (EUSPA)** nell'ambito del progetto GRC-MS (Galileo Reference Center - Member States), Grant Agreement n° GSA/GRANT/04/2016 e dal **GeoSNav Lab (Geodesy and Satellite Navigation Laboratory)**, coordinato dalla Prof.ssa Raffaella Cefalo, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste.



Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Chiar.mo Prof. Raffaella Cefalo per avermi dato l'opportunità di partecipare a queste ricerche e per il sostegno nella stesura di questa Tesi. Un grande grazie all'Ing. Tatiana Sluga per aver preparato il veicolo MMS nonché avermi illustrato le procedure necessarie per il suo corretto funzionamento e la successiva elaborazione dati.

Ringrazio anche i revisori di questa Tesi, il Chiar.mo Prof. Alberto Beinat e il Chiar.mo Prof. Andrea Piemonte per gli utili consigli e idee che mi hanno suggerito ma che purtroppo non sono riuscito a sviluppare pienamente.

Ringrazio inoltre il Prof. Renzo Simoni che ci ha lasciati da poco, mio Professore di Topografia all'Istituto Tecnico per Geometri Max Fabiani di Trieste ormai molti anni fa, mi ha insegnato molto e mi ha lasciato molti cari ricordi.

Inoltre vorrei esprimere la mia sincera gratitudine agli amici che mi sono stati vicini in questi anni.

Infine ringrazio con affetto la mia famiglia per il sostegno e il grande aiuto che mi ha sempre dato.