

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE MAGISTRALE

TESI DI LAUREA  
in

*‘Controllo e Collaudo delle strutture e del territorio M’*

**IL POSIZIONAMENTO DI PRECISIONE SATELLITARE  
NELL’ERA DELLA MULTICOSTELLAZIONE E DEI  
RICEVITORI GNSS A BASSO COSTO. VALUTAZIONI SU  
PRECISIONI ED ACCURATEZZE.**

CANDIDATO:

Noemi Barisciani

RELATORE:

Prof. Stefano Gandolfi

CORRELATORE:

Ing. Luca Poluzzi

SESSIONE II  
ANNO ACCADEMICO 2018/2019



*Tu, mio.*

*(Erri De Luca)*



# Sommario

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Indice figure</i> .....  | 7         |
| <i>Indice tabelle</i> .....   | 10        |
| <i>Introduzione</i> .....   | 11        |
| <br>  |           |
| <b>Capitolo 1: La tecnologia GNSS per il posizionamento di precisione</b> .....   | <b>13</b> |
| 1.1 Il sistema di navigazione satellitare multi-GNSS.....                         | 13        |
| 1.2 Principali caratteristiche delle costellazioni satellitari .....              | 14        |
| <b>Capitolo 2: Tipologia di analisi e data processing</b> .....                   | <b>20</b> |
| 2.1 Il caso di studio: dataset e stazioni permanenti scelte per l'analisi .....   | 21        |
| 2.2 Software commerciale per l'elaborazione: <i>Leica Infinity</i> .....          | 26        |
| 2.3 Fasi operative e impostazioni di elaborazione .....                           | 28        |
| <b>Capitolo 3: Post-trattamento dei dati</b> .....                                | <b>38</b> |
| 3.1 Serie temporali grezze e trasformazione in coordinate geodetiche locali.....  | 38        |
| 3.2 Operazione di individuazione e rimozione outliers.....                        | 42        |
| 3.3 Valutazioni sulla precisione .....  | 44        |
| 3.4 Valutazioni sull'accuratezza .....  | 52        |
| <b>Capitolo 4: Applicazione multi-GNSS con strumentazione a basso costo</b> ..... | <b>58</b> |
| 4.1 Caratteristiche generali ricevitori ed antenne a basso costo utilizzate.....  | 58        |
| 4.2 Descrizione della sperimentazione condotta.....                               | 61        |
| 4.3 Risultati su precisioni e tempo di fissaggio dell'ambiguità di fase .....     | 69        |
| 4.4 Test di calibrazione degli strumenti con slitta micrometrica .....            | 72        |
| <br>  |           |
| <i>Conclusioni</i> .....  | 75        |
| <br>  |           |
| <i>Bibliografia</i> .....   | 76        |
| <br>  |           |
| <i>Ringraziamenti</i> .....   | 77        |



## **Indice figure**

*Figura 1.1: Logo della costellazione americana GPS*

*Figura 1.2: Logo della costellazione russa GLONASS*

*Figura 1.3: Logo della costellazione cinese Beidou*

*Figura 1.4: Logo della costellazione Galileo*

*Figura 2.1: Fasi di lavoro eseguite*

*Figura 2.2: Stazioni permanenti scelte per il calcolo*

*Figura 2.3: Inquadramento delle stazioni permanenti TLSE-TLMF*

*Figura 2.4: Inquadramento delle stazioni permanenti PADO-VENI*

*Figura 2.5: Inquadramento delle stazioni permanenti CREU-CASE*

*Figura 2.6: Esempio informazioni EPN della stazione TLSE00FRA*

*Figura 2.7: Coordinate della stazione CASE00ESP all'epoca 51/2018*

*Figura 2.8: Velocità  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  della stazione Master CREU00ESP*

*Figura 2.9: Logo Leica Infinity - Geosystem*

*Figura 2.10: Interfaccia grafica Leica Infinity*

*Figura 2.11: Importa dati RINEX.*

*Figura 2.12: Assegnazione comando 'Base' per stazione Master*

*Figura 2.13: Colore rosso rappresentativo della stazione Master*

*Figura 2.14: Assegnazione comando 'Rover' per stazione Rover*

*Figura 2.15: Colore verde rappresentativo della stazione Rover*

*Figura 2.16: Assegna Punto di Controllo e coordinate cartesiane X, Y, Z di riferimento*

*Figura 2.17: Impostazioni Strategia di elaborazione*

*Figura 2.18: Impostazioni Dati di elaborazione*

*Figura 2.19: Impostazioni Dati con Selezione Manuale per la scelta delle costellazioni*

*Figura 2.20: Selezione Satelliti*

*Figura 2.21: Esempio selezione della costellazione Galileo*

*Figura 2.22: Elabora progetto*

*Figura 2.23: Esempio parte introduttiva del report della baseline TLSE-TLMF*

*Figura 2.24: Esempio soluzione per singolo giorno*

*Figura 2.25: Esempio contenuto del .txt di soluzione.*

*Figura 3.1: Serie temporali grezze in X, Y, Z multicostellazione per la stazione TLMF00FRA*

*Figura 3.2: Serie temporali grezze in X, Y, Z costellazione GPS+Galileo per la stazione VEN100ITA*

*Figura 3.3: Serie temporali grezze in X, Y, Z costellazione GPS per la stazione CASE00ESP*

*Figura 3.4: Soluzione  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$  multicostellazione per la stazione TLMF00FRA*

*Figura 3.5: Soluzione  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$  costellazione GPS+Galileo per la stazione VEN100ITA*

*Figura 3.6: Soluzione  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$  costellazione GPS per la stazione CASE00ESP*

*Figura 3.7: Soluzione multicostellazione con outliers per la stazione TLMF00FRA*

*Figura 3.8: Soluzione costellazione GPS+Galileo con outliers per la stazione VEN100ITA*

*Figura 3.9: Soluzione costellazione GPS con outliers per la stazione CASE00ESP*

*Figura 3.10: Errore quadratico medio in mm associato alla componente Nord*

*Figura 3.11: Errore quadratico medio in mm associato alla componente Est*

*Figura 3.12: Errore quadratico medio in mm associato alla componente Up*

*Figura 3.13: Confronto GPS/Galileo stazione TLMF00FRA*

*Figura 3.14: Confronto GPS+GLONASS/GPS+Galileo stazione TLMF00FRA*

*Figura 3.15: Confronto Beidou/GPS+GLONASS stazione VEN100ITA*

*Figura 3.16: Componenti planimetriche al variare della tipologia di elaborazione per la stazione TLMF00FRA*

*Figura 3.17: Componente altimetrica al variare della tipologia di elaborazione per la stazione TLMF00FRA*

*Figura 3.18: Componenti planimetriche al variare della tipologia di elaborazione per la stazione VEN100ITA*

*Figura 3.19: Componente altimetrica al variare della tipologia di elaborazione per la stazione VEN100ITA*

*Figura 3.20: Componente planimetrica al variare della tipologia di elaborazione per la stazione CASE00ESP*

*Figura 3.21: Componente altimetrica al variare della tipologia di elaborazione per la stazione CASE00ESP*

*Figura 4.1: Prototipo ublox F9P*

*Figura 4.2: Antenna Harxon GPS1000*

*Figura 4.3: Antenna Tallysman TW3882*

*Figura 4.4: Illustrazione collegamenti strumentazione*

*Figura 4.5: Inquadramento dei punti: stazione Master e punti a distanza variabile*

*Figura 4.6: Ricevitore GIS TOPCON GRS-1*

*Figura 4.7: Materializzazione stazione Master sul tetto dell'edificio*

*Figura 4.8: Esempio materializzazione stazione Rover a 500 m*

*Figura 4.9: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 100 m*

*Figura 4.10: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 500 m*

*Figura 4.11: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 1000 m*

*Figura 4.12: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 1500 m*

*Figura 4.13: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 2000 m*

*Figura 4.14: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 100 m*

*Figura 4.15: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 500 m*

*Figura 4.16: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 1000 m*

*Figura 4.17: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 1500 m*

*Figura 4.18: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 2000 m*

*Figura 4.19: Andamento della precisione all'aumentare della distanza (Harxon+F9P)*

*Figura 4.20: Andamento della precisione all'aumentare della distanza (Tallysman+F9P)*

*Figura 4.21: Andamento tempi di fix all'aumentare della distanza*

*Figura 4.22: Test di calibrazione con slitta micrometrica*

*Figura 4.23: Calibration Test antenna Harxon GPS1000*

## **Indice tabelle**

*Tabella 1: Confronto tra i Sistemi di Navigazione Satellitare Globali*

*Tabella 2: Stazioni permanenti: caratteristiche ed equipaggiamento*

*Tabella 3: Coordinate geocentriche cartesiane di riferimento delle stazioni permanenti pubblicate sul sito EUREF Permanent Network*

*Tabella 4: Correzione coordinate stazione CASE00ESP all'epoca 001/2010*

*Tabella 5: Elenco delle elaborazioni eseguite per ogni baseline*

*Tabella 6: Precisioni raggiunte (in mm) e percentuale di rigetti per base corta TLSE-TLMF*

*Tabella 7: Precisioni raggiunte (in mm) e percentuale di rigetti per base media PADO-VENI*

*Tabella 8: Precisioni raggiunte (in mm) e percentuale di rigetti per base lunga CREU-CASE*

*Tabella 9: N° soluzioni rigettate per la costellazione Beidou*

*Tabella 10: Confronto precisioni raggiungibili da GPS e Galileo*

*Tabella 11: Confronto precisioni raggiungibili dalle combinazioni GPS+GLONASS e GPS+Galileo*

*Tabella 12: Valutazione accuratezza stazione TLMF00FRA*

*Tabella 13: Valutazione accuratezza stazione VENI00ITA*

*Tabella 14: Valutazione accuratezza stazione CASE00ESP*

*Tabella 15: Deviazioni standard al variare della distanza con antenna Harxon GPS1000*

*Tabella 16: Deviazioni standard al variare della distanza con antenna Tallysman TW3882*

*Tabella 17: Tempi di fissaggio dell'ambiguità di fase a confronto*

## Introduzione

Con l'avvento di nuovi sistemi di navigazione satellitare è lecito parlare di "era della multicostellazione". È necessario considerare quanto di positivo (o negativo) le nuove costellazioni apportano al posizionamento satellitare di elevata precisione (ordine centimetrico). Infatti, la sperimentazione condotta in questa tesi ha preso in esame lo studio delle precisioni ed accuratezze raggiungibili dalle differenti costellazioni attualmente disponibili.

Oltre ai sistemi GNSS esistenti da decenni, quali la costellazione statunitense GPS e quella russa GLONASS, sono operative la costellazione cinese Beidou e quella europea Galileo. Quest'ultime allo stato dell'arte non sono ancora giunte a completamento, ma nonostante ciò, sono comunque in grado di consentire il posizionamento in ogni punto sulla superficie terrestre.

La tesi è costituita da un primo capitolo introduttivo, e generale, in cui vengono descritte le costellazioni satellitari prese in esame, con particolare attenzione alla costellazione Galileo.

Nel secondo capitolo è illustrata la tipologia di elaborazione dati: la scelta di operare in modalità statica con approccio differenziale, per baseline di lunghezze variabili, prendendo in esame stazioni permanenti della rete EUREF Permanent Network. L'elaborazione è stata eseguita in post-processing per tre baseline di lunghezza rispettivamente 10 km, 30 km e 60 km. Per ognuna di esse si è proceduto ad elaborare un anno di dati con stima della posizione giornaliera, impiegando singole costellazioni o loro combinazioni. Tutte le elaborazioni sono state eseguite con un nuovo software: *Leica Infinity*.

Il terzo capitolo, quello più significativo di questo lavoro, è relativo all'analisi dei risultati ottenuti sia in termini di precisioni sia di accuratezze delle differenti costellazioni prese in esame.

L'ultimo capitolo considera, invece, i risultati ottenuti da una sperimentazione con strumentazione GNSS a basso costo, senza valutare l'apporto delle costellazioni al posizionamento di precisione, ma focalizzando l'interesse sulle prestazioni raggiungibili con questa classe di strumenti, che sempre più spesso viene impiegata per scopi di monitoraggio.

Per ottimizzare il processo di post-elaborazione del dato, nell'ottica di automatizzarlo il più possibile, i risultati ottenuti sono stati eseguiti in ambiente *Matlab*, con la produzione di script ad hoc.



## Capitolo 1: La tecnologia GNSS per il posizionamento di precisione

Attualmente, la tecnologia GNSS è considerata una valida alternativa ai metodi di posizionamento tradizionali. L'acronimo GNSS (Global Navigation Satellite System) indica l'insieme di tutti i sistemi di navigazione satellitare che permettono di stimare le coordinate di qualsiasi punto sulla superficie terrestre con elevata precisione, in un prescelto sistema di riferimento, grazie ai segnali in radiofrequenza trasmessi da satelliti artificiali orbitanti attorno alla Terra.

Grazie alla riduzione dei prezzi dei ricevitori GNSS sul mercato, l'impiego di questa tecnologia ha subito un notevole incremento. Parallelamente a ciò, i continui miglioramenti in termini di precisione, hanno fatto sì che essa diventasse una delle tecniche di posizionamento più impiegate dai professionisti.

L'aumento della precisione nel posizionamento è dovuto a diversi fattori: miglioramento nella calibrazione delle antenne, miglioramento dei modelli ionosferici e troposferici, miglioramenti della precisione delle effemeridi e lancio di nuove costellazioni.

Inoltre, negli ultimi anni, l'incremento delle costellazioni disponibili ha aumentato il numero complessivo di satelliti visibili contemporaneamente, accrescendo quindi anche la ridondanza nel posizionamento. Potenziale conseguenza dell'aumento del numero di satelliti dovrebbe essere quella di un notevole miglioramento della precisione finale.

### 1.1 Il sistema di navigazione satellitare multi-GNSS

Un sistema di navigazione satellitare è progettato per stimare in ogni istante la posizione di un punto sul nostro pianeta, a partire dalla misura del tempo intercorso tra il momento in cui un segnale radio viene inviato da un satellite e il momento in cui esso viene captato dall'antenna in ricezione. Pertanto, si procede alla stima delle coordinate di un punto qualunque per via indiretta.

Per poter ricostruire l'orbita percorsa dai satelliti è necessario ricorrere ad un insieme di parametri: le effemeridi. Esistono diverse tipologie di effemeridi, ma quelle impiegate per il posizionamento satellitare di precisione, sono le *effemeridi precise*.

In generale, la precisione raggiungibile da un sistema di navigazione satellitare dipende da una varietà di fattori:

- Segnale acquisito (codici/fasi);

- Tipo di effemeridi (trasmesse/precise);
- Tecnica di rilievo (statico/cinematico);
- Finestra temporale di acquisizione;
- Modalità di posizionamento (assoluto/relativo).

L'aspetto innovativo di questo studio è stato quello di considerare l'impatto delle differenti costellazioni nella stima della posizione sia prese singolarmente sia simultaneamente. Per questo motivo diviene lecito parlare di "era della multicostellazione".

L'utilizzo simultaneo delle costellazioni introduce il concetto di multi-GNSS. Attualmente i sistemi di navigazione satellitare operativi e orbitanti attorno al nostro globo sono:

- la costellazione statunitense GPS (Global Positioning System) pienamente operativa,
- la costellazione russa GLONASS pienamente operativa,
- la costellazione europea Galileo operativa, ma con completamento previsto nel 2020,
- la costellazione cinese Beidou operativa ed in fase di completamento.

Ognuna di queste costellazioni è in grado di operare in maniera autonoma e di fornire copertura globale, anche se ciascun sistema utilizza un proprio datum geodetico di riferimento.

Di seguito saranno brevemente descritte le principali caratteristiche dei quattro sistemi nominati precedentemente.

## **1.2 Principali caratteristiche delle costellazioni satellitari**

La storia del posizionamento satellitare ha avuto inizio durante la guerra fredda, il 4 ottobre 1957, quando il primo satellite russo Sputnik1 è stato lanciato in orbita. È evidente che dal primo lancio ad oggi molte cose siano cambiate.

Di seguito, vengono delineate le principali caratteristiche delle costellazioni satellitari nell'ordine GPS, GLONASS, Beidou e Galileo.

### *GPS (Global Positioning System)*

Il GPS (Global Positioning System), sviluppato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America, è il sistema satellitare globale statunitense. È nato negli anni

'70 per scopi militari, al fine di poter localizzare ed eventualmente soccorrere mezzi militari sia sulla terraferma sia in mare. Il sistema è completamente operativo dal 1994 e successivamente, fu integrato con impiego ad uso civile.

Il segnale GPS ad uso civile subiva intenzionali degradazioni da errori, restringendone l'applicazione; gli errori venivano generati tramite il Selective Availability, voluto dal governo statunitense e attivato a suo piacimento, al fine di produrre una stima meno precisa delle posizioni.

Dal 2000, grazie al blocco deciso dal presidente degli Stati Uniti D'America Bill Clinton, fu fermata l'intenzionale degradazione dei segnali. Attualmente, il sistema GPS fornisce due tipi di servizi: il PPS (Precise Positioning Service) ad uso di utenti autorizzati specifico per uso militare e il SPS (Standard Positioning Service) accessibile da qualsiasi utente, anche se ancora oggi i due servizi non raggiungono gli stessi livelli di accuratezza.

Dal punto di vista pratico, il sistema GPS si compone di 32 satelliti in orbita MEO (medium earth orbit), su sei piani orbitali inclinati di  $55^\circ$ , di cui 24 realmente usati e 6 di riserva. Il suo controllo è condotto dalla Master Control Station (MSC) situata in Colorado, dove vengono raccolti tutti i dati provenienti dalle Monitor Station, così da tenere monitorata la posizione, la velocità, la quota e lo stato di funzionamento di ogni satellite in orbita. Il sistema GPS non copre i due poli.



*Figura 1.1: Logo della costellazione americana GPS*

### *GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System)*

Il GLONASS è il sistema satellitare globale russo, nato anch'esso durante gli anni '70 e per scopi militari. Il sistema doveva essere operativo all'inizio degli anni '90, ma a causa della crisi economica russa, esso tardò a prendere vita.

Dal 2004 il numero di satelliti in orbita è aumentato ed ora conta 31 satelliti totali, di cui 4 di scorta, 3 satelliti in stato di riparazione o fuori uso, solamente 24 realmente

usati. Si compone di 8 satelliti per ognuno dei tre piani orbitali di inclinazione  $64,8^\circ$ , disposti su orbite circolari.

È gestito dalle Forze Spaziali Russe (VKS) ed il suo controllo avviene grazie al SCC (System Control Center) a Krasnoznamensk, a circa 70 km dalla capitale Mosca. È affiancato da altri cinque centri che hanno il compito di monitorare la posizione e lo stato dei satelliti tramite radar e laser. Queste stazioni di terra ne coordinano il funzionamento, ma essendo anch'esso di proprietà del governo russo, potrebbe da un momento all'altro subire l'interruzione del segnale.



*Figura 1.2: Logo della costellazione russa GLONASS*

### *Beidou (BDS, Cina)*

Il sistema satellitare Beidou è nato come sistema regionale ad uso prettamente militare, molti anni dopo rispetto al GPS e GLONASS. Costruito e sviluppato dalla Repubblica cinese, il primo lancio è avvenuto nel 2000 e successivamente si è reso accessibile all'impiego civile.

Beidou nella sua prima versione (Beidou1) contava solo 4 satelliti, di cui uno di riserva, orbitanti su orbite geostazionarie, che consentivano la stima della posizione solo su area regionale.

Nell'ottica di passare da una copertura regionale ad una globale, è stata sviluppata la versione Beidou2 di recente sviluppo. È ancora in fase di completamento, previsto nel 2020, e potrà contare su 35 satelliti, di cui 27 orbitanti su orbite MEO e su tre piani inclinati di  $55^\circ$ . Una volta ultimato, potrà operare su scala globale come GPS e GLONASS.

Il controllo di Beidou avviene tramite una Master Control Station (MCS) che ha il compito di controllare e calcolare i dati delle Monitor Station e di generare il messaggio di navigazione.



*Figura 1.3: Logo della costellazione cinese Beidou*

### Galileo (sistema europeo)

Il sistema di navigazione satellitare Galileo è nato grazie all'Europa negli anni '90. A differenza di GPS e GLONASS nati per scopi militari, esso è stato concepito per l'impiego nel settore civile e commerciale mondiale.

Nel 1994 i maggiori paesi europei, riuniti nella Commissione Europea, decisero di dare un contributo alle costellazioni già esistenti con un nuovo sistema indipendente, sotto il controllo civile.

Il progetto Galileo, voluto dalla Commissione Europea e dall'ESA (European Space Agency) con il contributo dell'ASI (Agenzia Spaziale Italiana), ha avuto inizio nell'ottobre 2011 con il lancio di una coppia di satelliti (IOV-A e IOV-B) dalla base di Kourou nella Guyana Francese ed è proseguito con il lancio della seconda coppia a ottobre 2012. Questa prima fase di sperimentazione e validazione è chiamata IOV (In Orbit Validation). Ad essa è seguita la fase FOC (Full Operational Capability), che consiste nella piena operatività del sistema.

Il completamento di questo progetto è previsto per il 2020.

La costellazione risulterà costituita da 30 satelliti, di cui 27 operativi, più uno di riserva per ognuno dei tre piani orbitali inclinati di  $56^\circ$  rispetto all'equatore. Tale costellazione è stata progettata in modo da garantire una copertura anche a latitudini superiori a  $75^\circ$  (contrariamente alla copertura fornita dal GPS).

Il sistema è stato concepito per fornire il posizionamento di ogni punto, in modo tale che non esisteranno più punti 'nascosti' o non raggiungibili per presenza di ostacoli, come alti e fitti alberi o grandi grattacieli.

Il controllo di Galileo avviene da due centri principali GCC (Ground Control Centre), Fucino (Italia) e ad Oberpfaffenhofen (Germania), che si occupano sia di funzioni di controllo (GCS - Ground Control Segment) sia di funzioni di missione (GMS - Ground Mission Segment). Affiancate a queste, ci sono cinque stazioni di

controllo, tracking e telemetria (TT&C), nove stazioni di uplink (ULS) e circa una quarantina di stazioni GSS (Galileo Sensor Station).



Figura 1.4: Logo della costellazione Galileo

Una delle novità del sistema Galileo è il suo carattere commerciale. Per questo il sistema è stato realizzato per fornire diversi servizi per l'utenza sia pubblica sia privata:

- *Open Service (OS)*, basato su segnali 'aperti', si tratta di servizi di posizionamento e navigazione accessibili gratuitamente a chiunque (servizio per la massa);
- *Commercial Service (CS)*, servizio commerciale a pagamento che consente di raggiungere una maggiore accuratezza;
- *Public Regulated Service (PRS)*, sotto il controllo delle autorità pubbliche europee per la protezione dei cittadini e la sicurezza nazionale; è un servizio di navigazione per utenti autorizzati che richiedono elevata continuità e robustezza del servizio;
- *Safety of Life Service (SoL)*, servizio certificato per applicazioni a rischio vita, con miglioramento del servizio OS grazie ad allarmi che avvertono l'utenza in caso di mancanza di certi margini di precisione (messaggio di integrità);
- *Search and Rescue Support Service (SAR)*, servizio che permette di trasmettere su tutto il globo un segnale di allertamento e di migliorare il servizio internazionale COSPAS-SARSAT di ricerca e salvataggio in condizione di emergenza.

Tutti questi servizi rendono Galileo un sistema satellitare efficiente. Ciò che più contraddistingue Galileo dalle altre costellazioni, oltre al suo carattere civile e alla disponibilità del segnale in situazioni meno favorevoli, è la sua certificata affidabilità. Con l'espressione 'certificata affidabilità' non si vuole intendere che il sistema funziona sempre correttamente, ma che quando il segnale diviene debole, l'utente ne viene a conoscenza.

In *Tabella 1* sono riassunte le caratteristiche principali dei diversi sistemi di navigazione satellitare globali illustrati precedentemente ed il corrispondente datum di riferimento:

| <b>Costellazione</b>     | <b>GPS</b>                            | <b>GLONASS</b>                     | <b>Beidou</b>                                       | <b>Galileo</b>                                |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| <b>n° satelliti</b>      | 24                                    | 24                                 | 27  | 30  |
| <b>n° piani orbitali</b> | 6                                     | 3                                  | 3   | 3   |
| <b>Inclinazione</b>      | 55°                                   | 64,8°                              | 55°   | 56°   |
| <b>Quota [km]</b>        | 20.180                                | 19.140                             | 21.528  | 23.222  |
| <b>Sito di lancio</b>    | Cape Canaveral                        | Baikonur/Plesetsk                  | Xichang   | Kourou  |
| <b>Datum</b>             | WGS84<br>(World Geodetic System 1984) | PZ-90.11<br>(Parametry Zemli 1990) | CGCS2000<br>(China Geodetic Coordinate System 2000) | GTRF<br>(Galileo Terrestrial Reference Frame) |

*Tabella 1: Confronto tra i Sistemi di Navigazione Satellitare Globali*

## Capitolo 2: Tipologia di analisi e data processing

Al fine di poter determinare le precisioni raggiungibili nel posizionamento di un punto dalle singole costellazioni satellitari e combinazioni di queste, la tesi prende in esame un'analisi in post-processing di un anno di dati relativi a stazioni permanenti, facenti parte della rete EPN (EUREF Permanent Network). Essa è una rete di stazioni GNSS in continuo funzionamento, gestita dall'IAG (International Association of Geodesy) utilizzata per la definizione del sistema di riferimento ETRS89 (European Terrestrial Reference System, sistema di riferimento geodetico intraplacca).

Lo scopo primario dello studio condotto in questa tesi è stato quello di valutare la precisione nelle tre componenti spaziali all'aumentare della lunghezza della base ed al variare delle costellazioni satellitari utilizzate.

La sperimentazione ha riguardato l'elaborazione di dati relativi a stazioni scelte in modo tale da definire le seguenti lunghezze di baseline: 10 km, 30 km, 60 km.

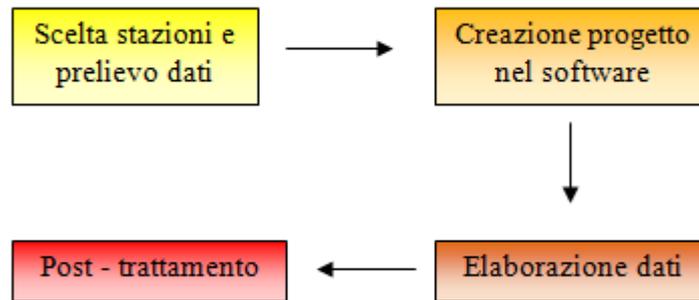
Pertanto, tutte le stazioni scelte per l'elaborazione acquisivano da tutte e quattro le costellazioni considerate.

Il tipo di approccio impiegato è stato quello del posizionamento relativo statico tra una stazione a coordinate note assunta come riferimento (Master) ed una stazione Rover, di cui si vogliono determinare le coordinate.

A partire dalle coordinate geocentriche X, Y, Z, con opportune conversioni, i risultati sono stati esaminati in un sistema di riferimento geodetico locale nelle tre componenti  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$ , al fine consentire un'interpretazione più chiara, separando le componenti planimetriche da quella altimetrica.

Una volta eseguita l'elaborazione, dalle soluzioni si è passati al post-trattamento dei dati in ambiente *Matlab*.

Lo schema generale del lavoro può essere suddiviso in quattro macrofasi, come riportato in figura 2.1:



*Figura 2.1: Fasi di lavoro eseguite*

**Fase I:** Scelta campione e download dei file GNSS, orbite broadcast ed orbite precise.

**Fase II:** Creazione del progetto nel software di calcolo.

**Fase III:** Elaborazione dei dati per ogni singola costellazione e loro combinazioni.

**Fase IV:** Post-trattamento dei dati tramite analisi statistica.

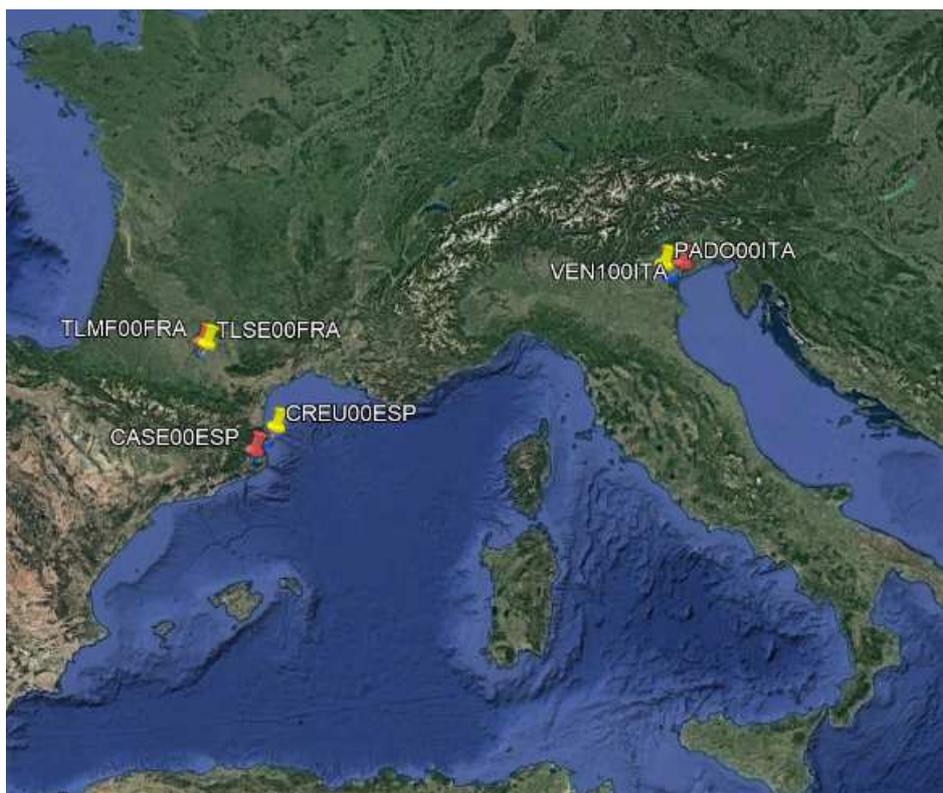
La spiegazione dettagliata delle fasi di lavoro è rimandata ai paragrafi e capitoli successivi.

## **2.1 Il caso di studio: dataset e stazioni permanenti scelte per l'analisi**

L'analisi dei dati GNSS è iniziata con la scelta delle stazioni permanenti.

Tale scelta è ricaduta su sei stazioni permanenti appartenenti alla rete EUREF, scelte in modo tale da definire lunghezze di baseline pari a 10 km, 30 km e 60 km, che nel corso dell'elaborato vengono nominate come "base corta", "base media" e "base lunga" rispettivamente.

In figura 2.2 è illustrata la posizione delle stazioni permanenti prese in esame nel continente europeo, dove le stazioni Master sono state indicate con un segnaposto di colore giallo e quelle Rover con un segnaposto di colore rosso.



*Figura 2.2: Stazioni permanenti scelte per il calcolo*

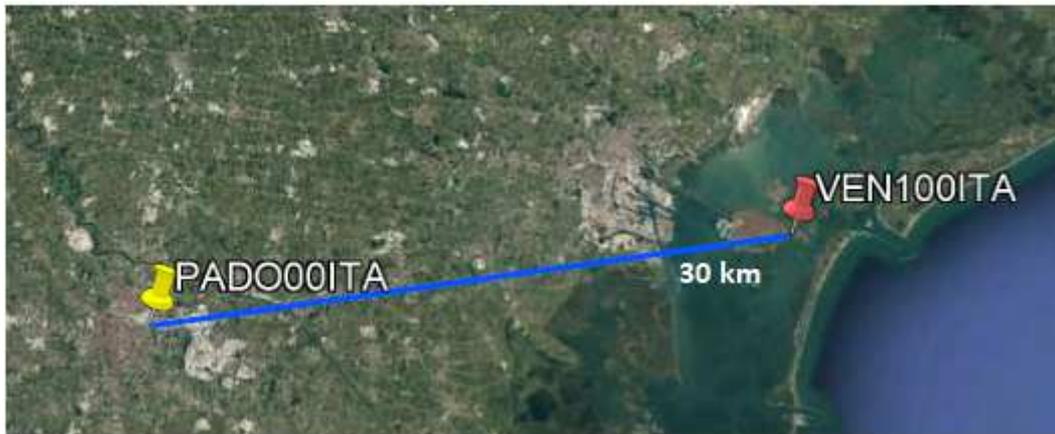
Di seguito sono presentate nel dettaglio le stazioni considerate per l'elaborazione:

-TLSE00FRA e TLMF00FRA, stazioni permanenti situate nella città di Tolosa, in Francia, distanti tra loro circa 10 km:



*Figura 2.3: Inquadramento delle stazioni permanenti TLSE-TLMF*

-PADO00ITA e VEN100ITA, stazioni permanenti situate in Veneto (Italia), distanti tra loro circa 30 km:



*Figura 2.4: Inquadramento delle stazioni permanenti PADO-VENI*

-CREU00ESP e CASE00ESP, stazioni permanenti situate nella Spagna orientale, distanti tra loro circa 60 km:



*Figura 2.5: Inquadramento delle stazioni permanenti CREU-CASE*

In *Tabella 2* sono riportate le principali caratteristiche e la tipologia di equipaggiamento delle stazioni in esame:

| Stazione   | TLSE00FRA                   | TLMF00FRA    | PADO00ITA                    | VEN100ITA                      | CREU00ESP                   | CASE00ESP                       |
|------------|-----------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Ricevitore | TRIMBLE<br>NETR9            | LEICA GR25   | SEPTPOLARX5                  | LEICA<br>GR30                  | LEICA GR50                  | LEICA GR50                      |
| Antenna    | TRM59800.00                 | TRM57971.00  | SEPCHOKE_B3E6                | LEIAR20                        | LEIAR25.R4                  | LEIAR25.R4                      |
| IGS        | YES                         | NO           | YES                          | NO                             | NO                          | NO                              |
| Data Type  | Daily, hourly&<br>real-time | Daily&hourly | Daily, hourly& real-<br>time | Daily,<br>hourly&<br>real-time | Daily, hourly&<br>real-time | Daily,<br>hourly& real-<br>time |

Tabella 2: Stazioni permanenti: caratteristiche ed equipaggiamento

Successivamente, per ogni stazione sono state individuate le informazioni relative alla loro posizione in coordinate geocentriche cartesiane X, Y, Z.

In figura 2.6 si riporta un esempio delle informazioni fornite dall'EPN:

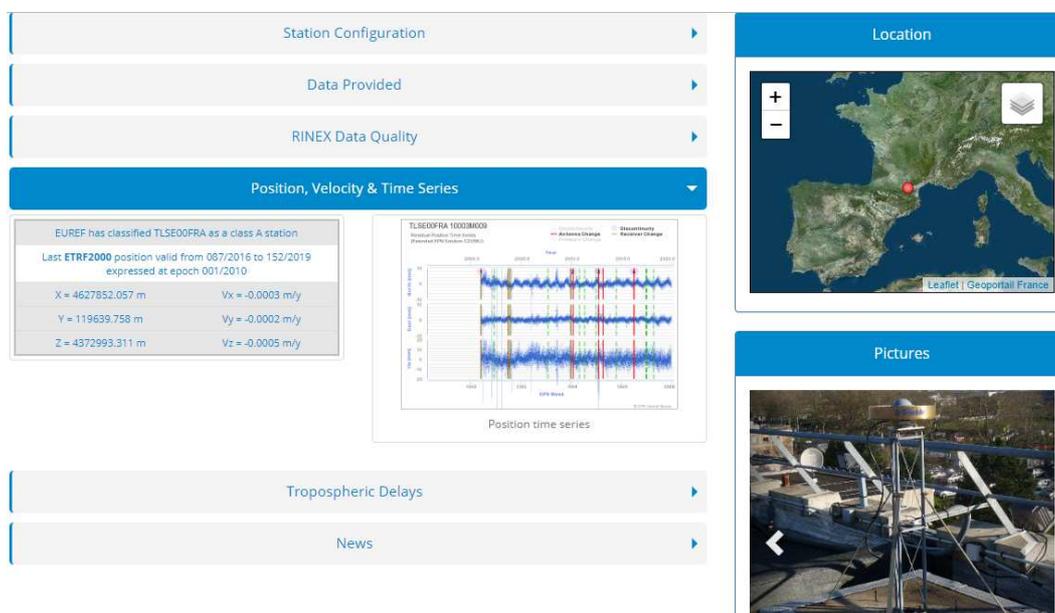


Figura 2.6: Esempio informazioni EPN della stazione TLSE00FRA

In Tabella 3 sono riportate le coordinate geocentriche cartesiane delle stazioni permanenti, corrispondenti ad un'epoca di riferimento:

| Stazione | TLSE00FRA   | TLMF00FRA   | PADO00ITA   | VEN100ITA   | CREU00ESP   | CASE00ESP   |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Epoca    | 001/2010    | 001/2010    | 001/2010    | 001/2010    | 001/2010    | 51/2018     |
| X        | 4627852.057 | 4627010.057 | 4388882.301 | 4379846.848 | 4715420.543 | 4749772.754 |
| Y        | 119639.758  | 111069.212  | 924567.214  | 959292.008  | 273177.512  | 240959.531  |
| Z        | 4372993.311 | 4374122.856 | 4519588.507 | 4521100.128 | 4271946.432 | 4236095.91  |

Tabella 3: Coordinate geocentriche cartesiane di riferimento delle stazioni permanenti pubblicate sul sito EUREF Permanent Network

Al fine di condurre un'analisi uniforme è necessario che l'epoca di riferimento delle coordinate sia della stazione Master sia della stazione Rover, risulti la medesima. Nel caso della 'base lunga' CREU00ESP-CASE00ESP, la stazione Rover ha un'epoca differente da quella Master: infatti, la stazione di CASE00ESP all'epoca 001/2010 non era ancora operativa. Per questo motivo è stato necessario operare un cambiamento alle sue coordinate.

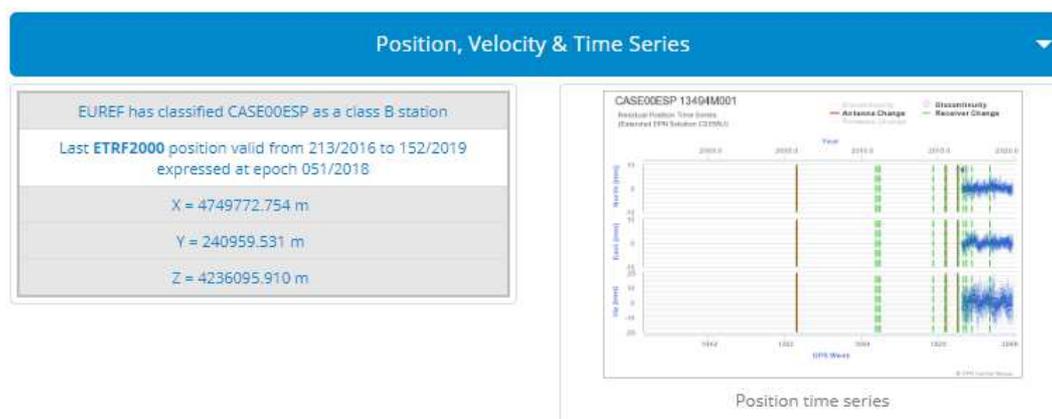


Figura 2.7: Coordinate della stazione CASE00ESP all'epoca 51/2018

Innanzitutto, si è dovuta considerare la velocità della stazione Master CREU00ESP, come evidenziato in figura 2.8:

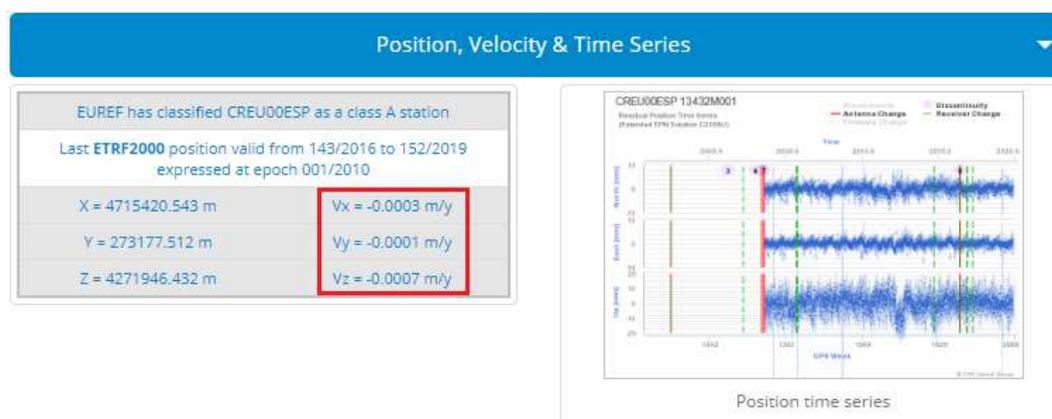


Figura 2.8: Velocità  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  della stazione Master CREU00ESP

Note le velocità nelle tre componenti di CREU00ESP, queste sono state moltiplicate per il numero di anni intercorsi tra l'epoca 001/2010 e 51/2018, ottenendo così le correzioni spaziali da apportare alle coordinate cartesiane di CASE00ESP:

$$x(t) = x(t_0) + v_i * (t - t_0)$$

dove  $x(t)$  è la posizione all'epoca  $t$  che si vuole calcolare,  $x(t_0)$  è la posizione nota all'epoca  $t_0$  e  $v_i$  è la velocità nell' $i$ -esima componente.

Procedendo con quanto appena esposto, sono stati calcolati i valori delle coordinate della stazione di CASE00ESP, riferite all'epoca 001/2010:

| STAZIONE | CASE00ESP   | Differenze | CASE00ESP   |
|----------|-------------|------------|-------------|
| EPOCA    | 51/2010     | 8 anni     | 001/2010    |
| X        | 4749772.754 | -2.4 mm    | 4749772.752 |
| Y        | 240959.531  | -0.8 mm    | 240959.530  |
| Z        | 4236095.91  | -5.6 mm    | 4236095.904 |

Tabella 4: Correzione coordinate stazione CASE00ESP all'epoca 001/2010

Completato il quadro generale, si è potuto procedere al download dei file GNSS, orbite broadcast ed orbite precise di un anno di dati da inserire nell'elaborazione. Nello specifico sono stati scaricati i dati relativi al periodo che va da febbraio 2018 a marzo 2019.

## 2.2 Software commerciale per l'elaborazione: *Leica Infinity*

Per l'elaborazione dei dati GNSS sono in commercio molteplici software. In questo elaborato il calcolo è stato eseguito mediante il software *Leica Infinity*.

Si tratta di un software ad uso commerciale rivolto a professionisti, per il calcolo di reti di stazioni in post-processing.

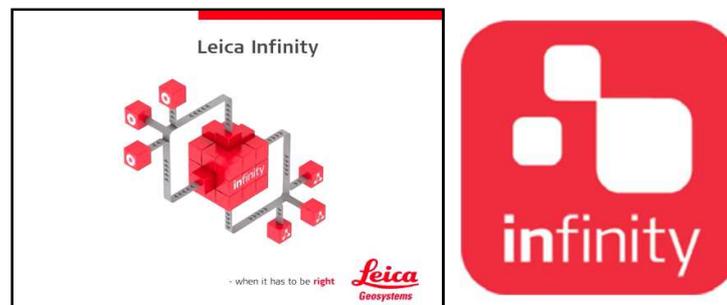


Figura 2.9: Logo Leica Infinity - Geosystem

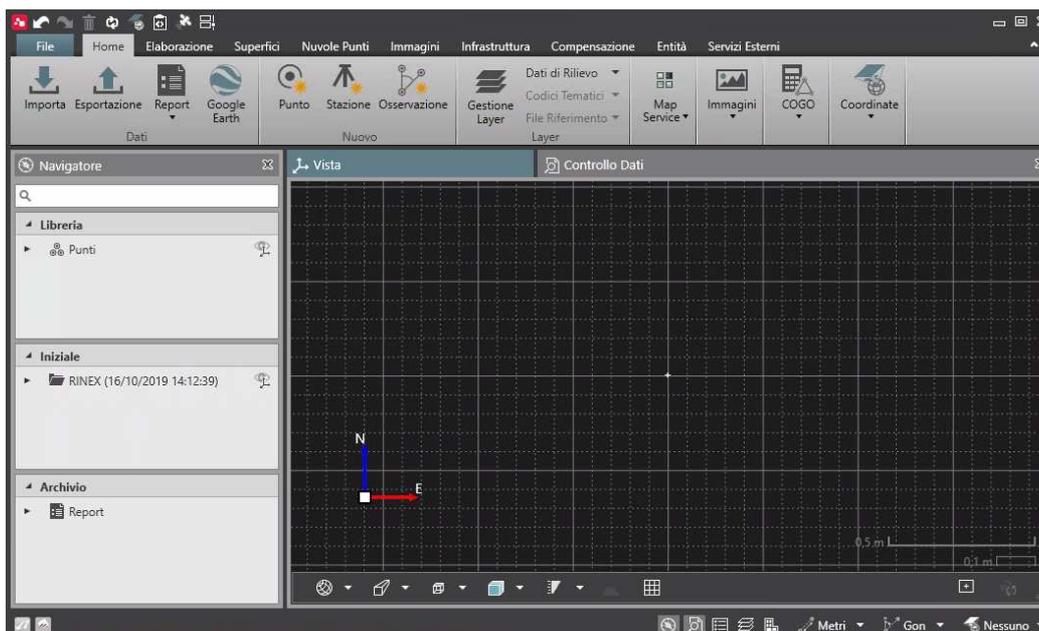


Figura 2.10: Interfaccia grafica Leica Infinity

*Infinity* è un programma in grado di operare su larga scala nell'ambito geodetico, ma in questa sperimentazione è stata eseguita la sola elaborazione GNSS.

In particolare, il software permette di eseguire:

- l'elaborazione dei dati grezzi sia statici sia cinematici GNSS a singola o multipla frequenza per determinare la più affidabile e precisa soluzione;
- l'elaborazione multifrequenza di GPS, GLONASS, Beidou, Galileo (punto fondamentale per questo studio);
- l'autoelaborazione, che costruisce automaticamente tutte le possibili combinazioni di baseline e ne elabora i dati con un solo click.

I dati grezzi supportabili dal software sono solo quelli in formato DBX (SmartWorx) o RINEX. Per quanto concerne le orbite, queste devono essere importate in formato ".sp3".

Tutte le *baseline* possono essere inserite in un unico progetto e poi selezionate ed elaborate singolarmente, oppure elaborate contemporaneamente.

L'elaborazione GNSS delle baseline con *Infinity* è influenzata da tre aspetti:

- definire quali dati il motore di elaborazione deve considerare;
- selezionare il set di calibrazione dell'antenna per minimizzare gli errori nella soluzione della posizione;
- impostare la strategia di elaborazione da applicare ai dati.

L'impostazione della strategia di elaborazione è il punto più significativo, poiché al variare di questa, cambiano notevolmente le soluzioni.

Il software utilizza parametri standard di default per l'elaborazione, ma è comunque possibile assegnare impostazioni specifiche.

Importati i dati e definite le impostazioni di elaborazione, l'avvio dell'elaborazione risulta semplice. Solo al termine del processo è possibile visualizzare le soluzioni nei report riassuntivi creati dal programma.

### 2.3 Fasi operative e impostazioni di elaborazione

Le fasi operative possono essere riassunte come segue:

1. Scelta delle tipologie di elaborazioni da effettuare per ogni baseline;
2. Creazione del progetto ed importazione dei dati; assegnazione etichetta Master/Rover e delle coordinate di riferimento dei punti di controllo, con successiva scelta della strategia di elaborazione;
3. Lettura dei report contenenti le soluzioni e trasformazione in file *.txt* da importare in ambiente *Matlab*;
4. Creazione di script ad hoc in ambiente *Matlab* per il calcolo rapido e la rappresentazione grafica dei risultati;
5. Redazione di file excel contenenti le statistiche finali per l'interpretazione dei risultati ottenuti;
6. Conclusioni e riflessioni.

Primariamente, si è proceduto alla scelta delle tipologie di elaborazione dei dati da effettuare. Note le tre baseline da analizzare, per ognuna di esse sono state effettuate 7 elaborazioni, per un totale di 21, come riportato in *Tabella 5*.

| BASE CORTA<br>TLSE-TLMF (10 KM)        | BASE MEDIA<br>PADO-VEN1 (30 KM) | BASE LUNGA<br>CREU-CASE (60 KM) |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| COSTELLAZIONI E COMBINAZIONI ELABORATE |                                 |                                 |
| MULTICOSTELLAZIONE                     |                                 |                                 |
| GPS+GLONASS                            |                                 |                                 |
| GPS+Galileo                            |                                 |                                 |
| GPS                                    |                                 |                                 |
| GLONASS                                |                                 |                                 |
| Galileo                                |                                 |                                 |
| Beidou                                 |                                 |                                 |

*Tabella 5: Elenco delle elaborazioni eseguite per ogni baseline*

È opportuno precisare che con il termine "multicostellazione" viene indicata la combinazione simultanea GPS+GLONASS+Galileo+Beidou. Questa tipologia di

elaborazione è stata eseguita al fine di valutare le performance dell'utilizzo simultaneo delle costellazioni e di capire se produrre il miglior risultato nella stima della posizione di un punto.

Sono state eseguite due ulteriori elaborazioni: la combinazione GPS+GLONASS e la combinazione GPS+Galileo. La scelta è ricaduta su di esse per confrontare i risultati restituiti da una combinazione di sistemi satellitari esistenti e combinati tra loro da decenni, e quella con un sistema, come è Galileo, di recente lancio.

Dunque, lo scopo principale dell'esecuzione di numerose elaborazioni è stato quello di poter conoscere le precisioni e le accuratezze raggiungibili dai diversi sistemi di navigazione satellitare e confrontarne i risultati.

Per comodità di lettura, ogni impostazione che seguirà sarà riferita all'interfaccia grafica del software.

Dopo aver scaricato le effemeridi ed i file RINEX relativi ai dati di interesse, questi sono stati importati nel progetto su Infinity: nell'interfaccia grafica in alto a sinistra è presente il tasto *Importa*, utilizzato per caricare i file.

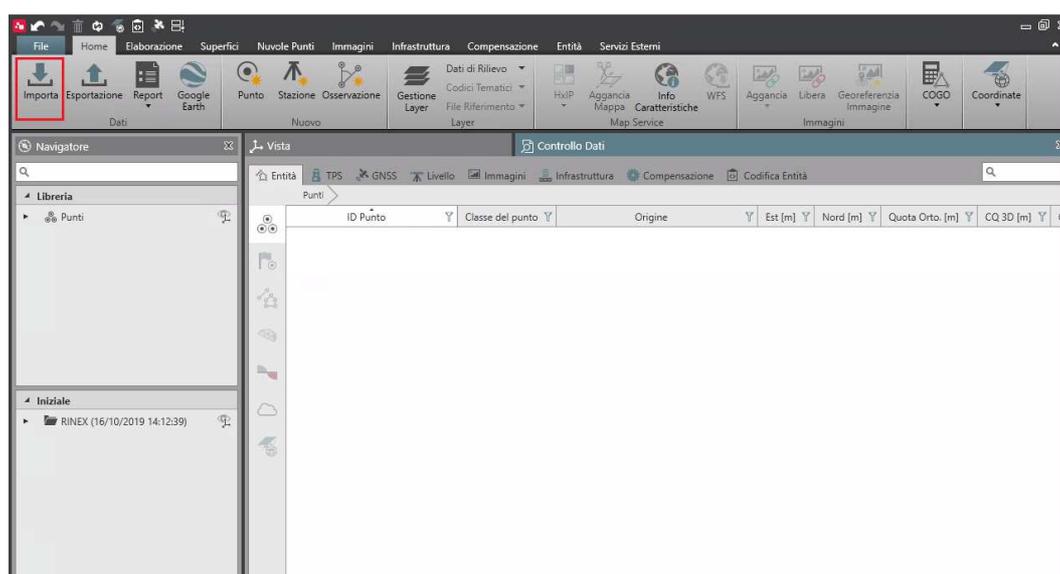


Figura 2.11: Importa dati RINEX.

I file importati nel progetto sono relativi al periodo che va da febbraio 2018 a marzo 2019, considerando una finestra temporale di un anno.

La creazione delle baseline è avvenuta assegnando l'etichetta Master/Rover alle stazioni attraverso *Controllo dati* nella sezione *GNSS*. In automatico gli intervalli temporali dei dati importati diventeranno di colore rosso per la Master e di colore verde per il Rover.

Nelle figure 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 vengono illustrati i passaggi effettuati nel software, prendendo come esempio il caso di “base corta”.

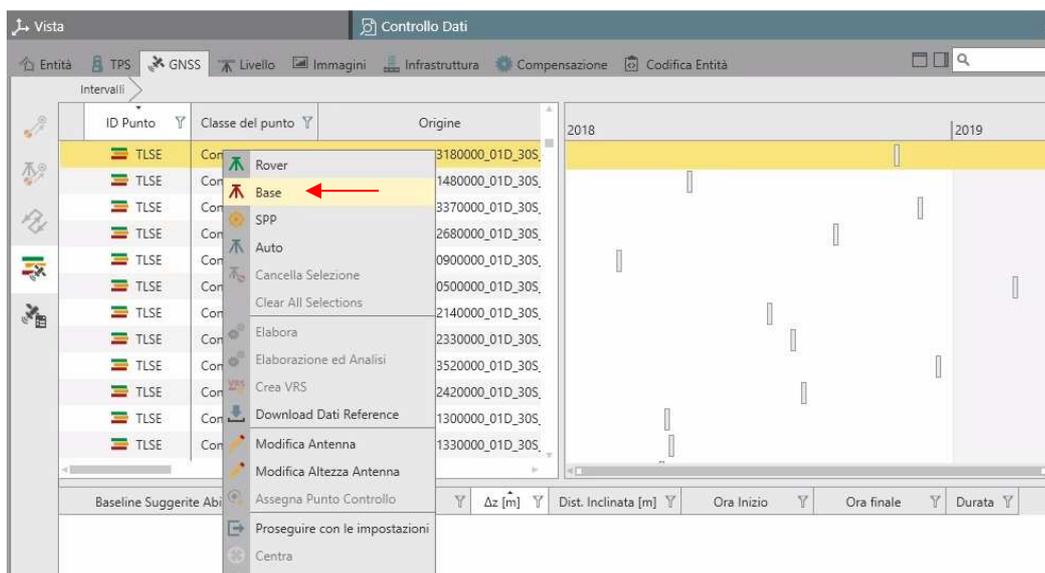


Figura 2.12: Assegnazione comando ‘Base’ per stazione Master

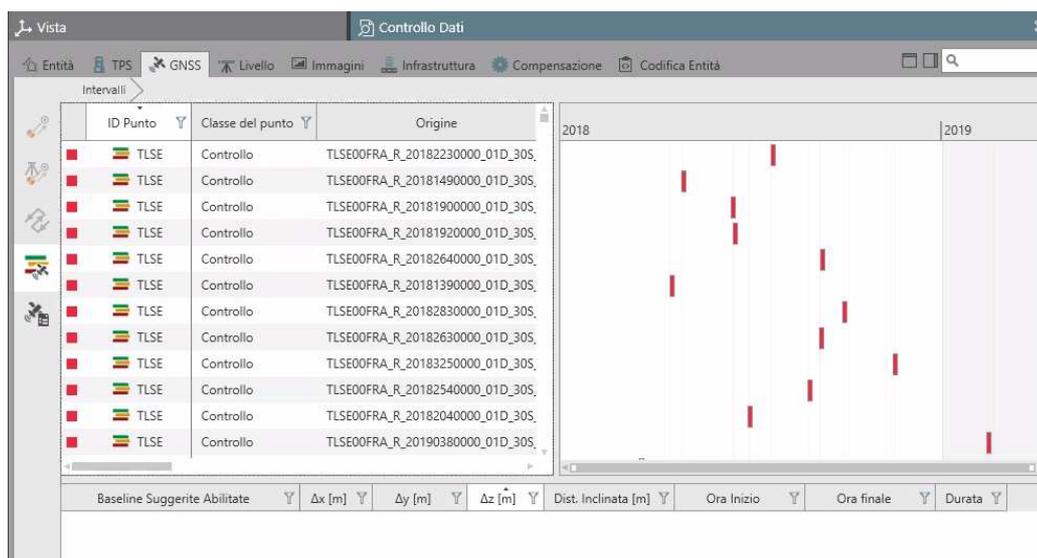


Figura 2.13: Colore rosso rappresentativo della stazione Master

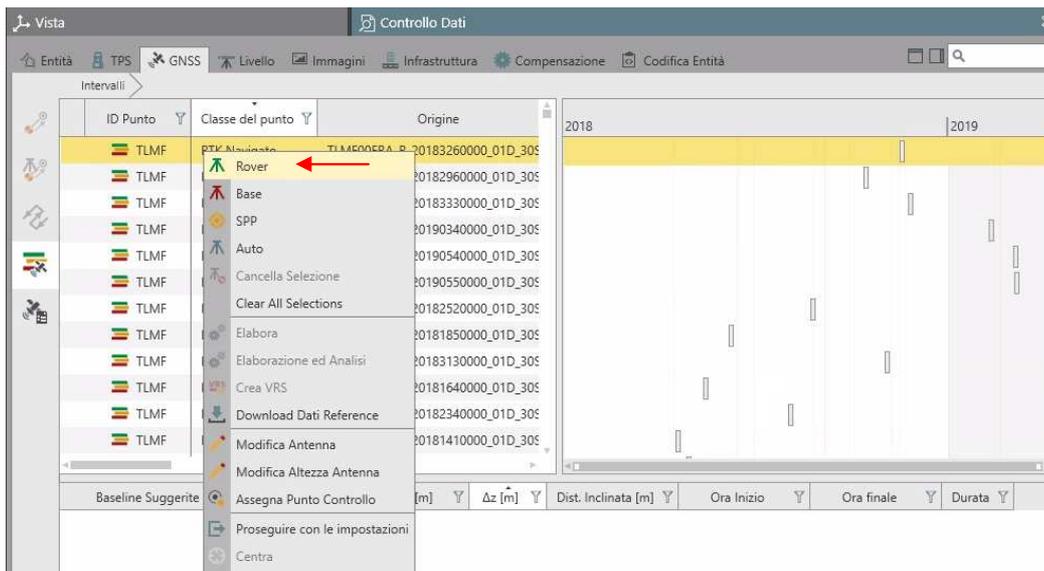


Figura 2.14: Assegnazione comando 'Rover' per stazione Rover

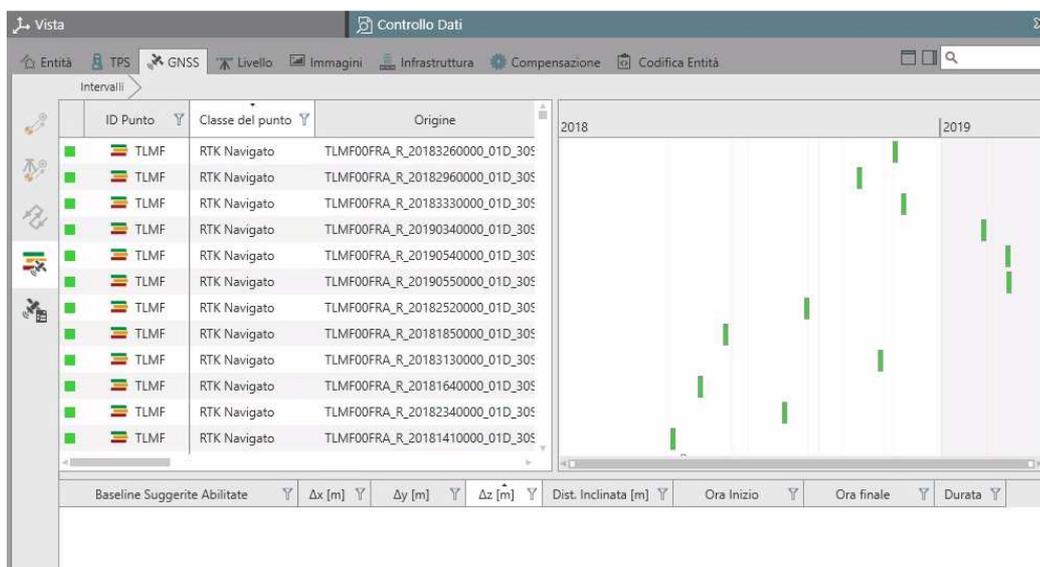


Figura 2.15: Colore verde rappresentativo della stazione Rover

Inoltre, è necessario impostare la stazione Master come 'Punto di controllo'. Questa operazione viene eseguita tramite la *Proprietà Griglia*, selezionando il pulsante *Assegna Punto Controllo*: il campo *Posizione WGS84* diventa editabile ed in questa sede sono state assegnate le coordinate geocentriche cartesiane EUREF di riferimento, per ogni stazione Master.

Per quanto concerne la stazione Rover, al fianco di essa comparirà 'RTK Navigato': questa etichetta indica che la soluzione restituirà la stima della posizione di questo punto.

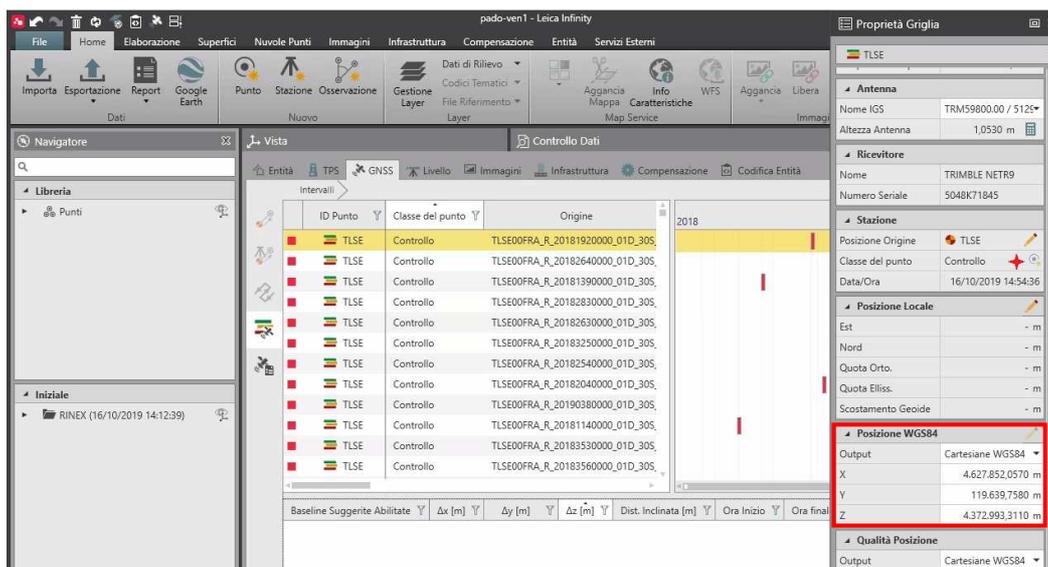


Figura 2.16: Assegna Punto di Controllo e coordinate cartesiane X, Y, Z di riferimento

Per le differenti elaborazioni sono stati scelti gli stessi parametri generali.

Per assegnare le impostazioni specifiche, dal menù principale si deve accedere alla scheda *Elaborazione*: qui aprendo la finestra di impostazione *Dati e Strategia* è possibile selezionare le diverse opzioni.

Nella finestra *Strategia* vengono impostati parametri riguardanti il tipo di soluzione ed i modelli atmosferici. In particolare, nel caso in esame, il tipo di soluzione ricercata è quella ad ambiguità fissata (*fixed*= ambiguità fissate al valore intero). Si sottolinea che la stima dell'ambiguità di fase iniziale N come intero avviene a valle di una stima della stessa come reale; quando il fissaggio delle ambiguità non avviene in modo corretto, il software restituisce soluzioni *float*. Nel calcolo della stima delle posizioni le soluzioni *float* sono state rigettate.

I modelli atmosferici sono un altro parametro importante, poiché influenzano considerevolmente la soluzione. Nel caso di basi maggiori di un paio di km, come è il caso di questa sperimentazione, il programma Infinity non restituisce soluzioni efficaci se il modello troposferico è lasciato, come di default, su '*Automatico*'. Pertanto, l'impostazione del modello troposferico è stata impostata su '*Calcolato*'.



Figura 2.17: Impostazioni Strategia di elaborazione

Nella finestra *Dati* vengono impostate: le tipologie di costellazioni, l'angolo di elevazione delle osservazioni, il tipo di effemeridi e la frequenza di campionamento delle osservazioni.

Nel progetto i parametri fissati per ogni baseline sono stati:

- angolo di cut off di 13°;
- tipo di effemeridi *Precise*;
- modello troposferico *Calcolato*;
- modello ionosferico *Automatico*.

Per quanto concerne l'opzione riguardante quali satelliti utilizzare per l'elaborazione, è stata utilizzata l'impostazione '*Usa Tutto*' per la multicostellazione, poi per selezionare le singole costellazioni si è proceduto con la '*Selezione Manuale*': Infinity di default prova ad utilizzare tutti i satelliti disponibili nei dati, l'esclusione di un'intera costellazione deve essere eseguita manualmente.

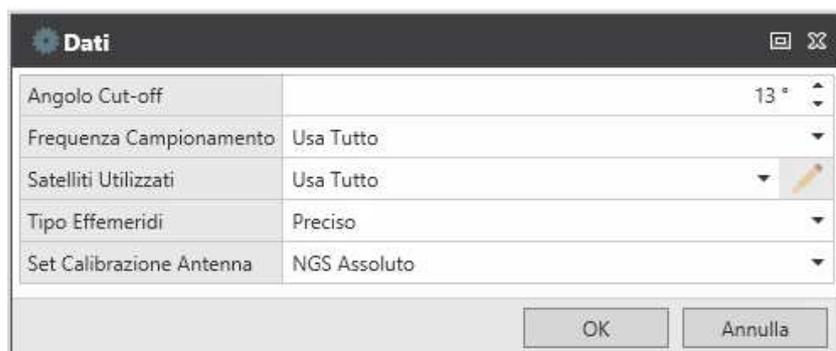


Figura 2.18: Impostazioni Dati di elaborazione

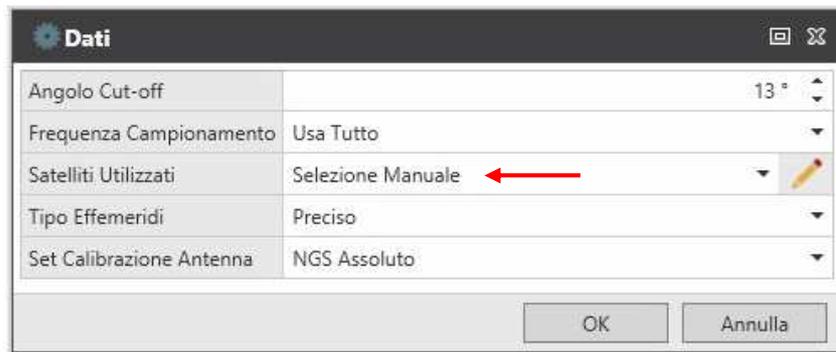


Figura 2.19: Impostazioni Dati con Selezione Manuale per la scelta delle costellazioni

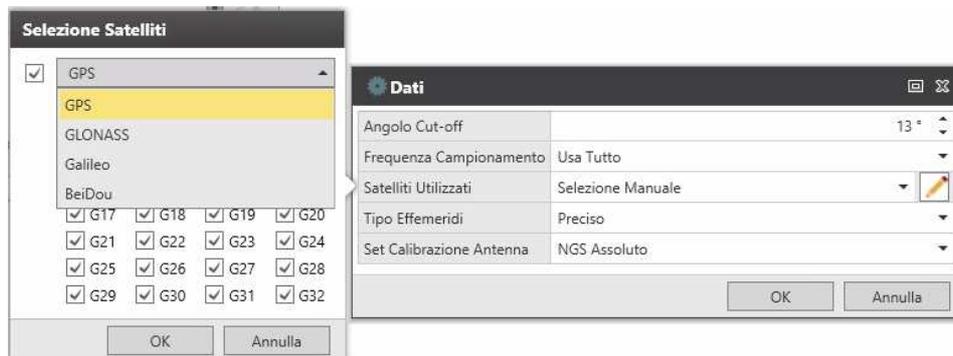


Figura 2.20: Selezione Satelliti

In figura 2.21 è riportato l'esempio di selezione della costellazione satellitare Galileo.

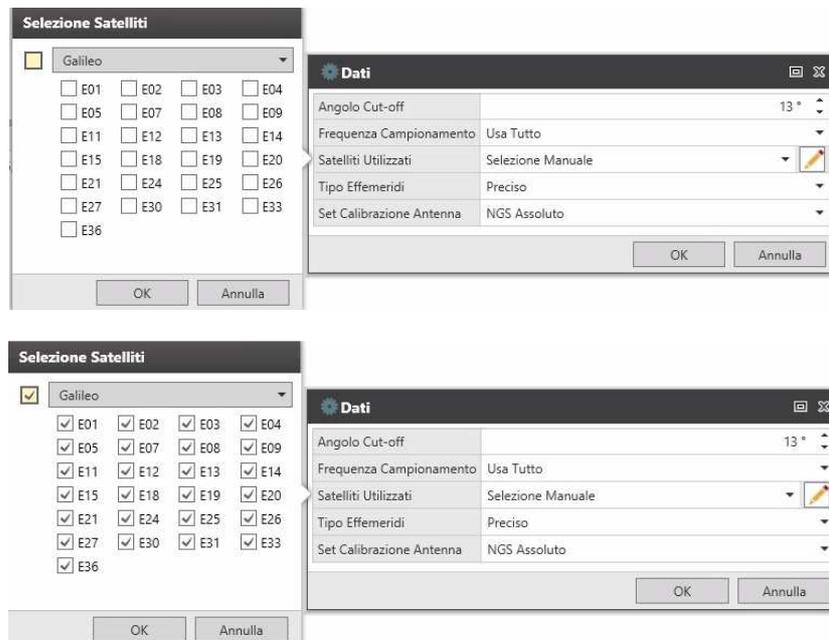


Figura 2.21: Esempio selezione della costellazione Galileo

Una volta impostati i parametri di elaborazione, il progetto è pronto per essere eseguito. L'elaborazione viene lanciata cliccando su 'Elabora' nel menù principale:

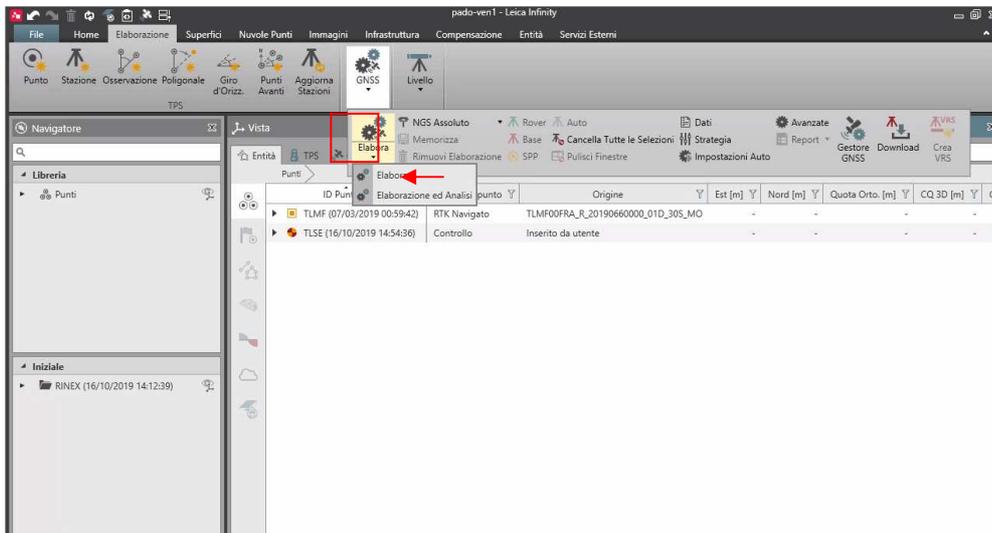


Figura 2.22: Elabora progetto

Ad elaborazione conclusa, è possibile aprire il report riassuntivo restituito dal software in formato *.pdf*. In ognuno di essi è presente una parte iniziale riassuntiva dove sono riportati i parametri di elaborazione adottati ed una seconda parte contenente le soluzioni ottenute.

In figura 2.23 si può osservare un esempio di visualizzazione delle informazioni generali di elaborazione di una singola baseline:

| <b>Baseline TLSE - TLMF</b>  |                            |                                 |                 |
|--|----------------------------|---------------------------------|-----------------|
| <b>Parametri di Elaborazione (08/03/2018 00:59:42 - 09/03/2018 00:59:12)</b> |                            |                                 |                 |
| <b>Dati</b>  | <b>Selezionato</b>         | <b>Utilizzato</b>               | <b>Commenti</b> |
| Angolo Cut-off:  | 13°                        | 13°                             |                 |
| Frequenza:   | Automatico                 | L1/E1/B1/L2/B2/L5/E5a/E5b/E5a+b |                 |
| Frequenza Campionamento:   | Usa Tutto                  | 30,00 sec                       |                 |
| Sistema Satellitare:   | GPS/GLONASS/Galileo/Beidou | GPS/GLONASS/Galileo/Beidou      |                 |
| Tipo Effemeridi:   | Preciso                    | Preciso                         |                 |
| Set Calibrazione Antenna:  | NGS Assoluto               | NGS Assoluto                    |                 |
| <b>Strategia Elaborazione</b>  |                            |                                 |                 |
| Tipo Soluzione:  | Fissato (Fase)             | Fissato (Fase)                  |                 |
| Ottimizzazione Soluzione:  | Automatico                 | Nessuno                         |                 |
| Frequenza da utilizzare in Iono Minimizzato:                                 | Automatico                 | Automatico                      |                 |
| Modello Troposferico:  | Calcolato                  | Calcolato                       |                 |
| Modello Ionosferico:   | Automatico                 | Calcolato                       |                 |
| Permetti Fix Widelane:   | Automatico                 | Automatico                      |                 |

Figura 2.23: Esempio parte introduttiva del report della baseline TLSE-TLMF

A titolo di esempio, in figura 2.24, è riportata la soluzione della stazione Rover TLMF, di un singolo giorno:

| <b>Coordinate</b>    |                    |                     |
|----------------------|--------------------|---------------------|
|                      | <b>Base - TLSE</b> | <b>Rover - TLMF</b> |
| Classe del punto:    | Controllo          | Fissato PP          |
| WGS84 Latitudine:    | 43° 33' 38,49" N   | 43° 34' 28,57" N    |
| WGS84 Longitudine:   | 1° 28' 51,19" E    | 1° 22' 30,34" E     |
| Quota Elliss. WGS84: | 207,1810 m         | 221,0584 m          |
| WGS84 Cartesiana X:  | 4.627.852,0570 m   | 4.627.010,0793 m    |
| WGS84 Cartesiana Y:  | 119.639,7580 m     | 111.069,2120 m      |
| WGS84 Cartesiana Z:  | 4.372.993,3110 m   | 4.374.122,8735 m    |

Figura 2.24: Esempio soluzione per singolo giorno

Le elaborazioni sono state ottenute dopo diversi giorni di lavoro con il software Infinity, poiché ogni singolo progetto ha richiesto un tempo di processing di circa 4 ore.

Successivamente, si è operata una conversione dei report in formato *.txt*.

In ogni riga dei file *.txt* da sinistra a destra sono riportati rispettivamente:

- epoca
- coordinata X
- coordinata Y
- coordinata Z.

```

2018.18082 4627010.0793 111069.2120 4374122.8735
2018.18356 4627010.0756 111069.2127 4374122.8696
2018.18630 4627010.0791 111069.2127 4374122.8745
2018.18904 4627010.0782 111069.2114 4374122.8733
2018.19178 4627010.0818 111069.2096 4374122.8778
2018.19452 4627010.0766 111069.2106 4374122.8716
2018.19726 4627010.0773 111069.2115 4374122.8724
2018.20000 4627010.0792 111069.2118 4374122.8738
2018.20274 4627010.0781 111069.2118 4374122.8729
2018.20548 4627010.0779 111069.2130 4374122.8727
2018.20822 4627010.0775 111069.2109 4374122.8717
2018.21096 4627010.0780 111069.2115 4374122.8730
2018.21370 4627010.0780 111069.2111 4374122.8720
2018.21644 4627010.0780 111069.2108 4374122.8716
2018.21918 4627010.0774 111069.2107 4374122.8724
2018.22192 4627010.0778 111069.2101 4374122.8720
2018.22466 4627010.0779 111069.2114 4374122.8724
2018.22740 4627010.0784 111069.2108 4374122.8733

```

Figura 2.25: Esempio del contenuto del *.txt* di soluzione.

Una volta calcolate tutte le soluzioni, si è proceduto con l'analisi statistica dei dati. Quest'analisi ha permesso di valutare sia le precisioni (calcolo dell'errore quadratico medio o deviazione standard associata ad ogni componente, per definire la ripetibilità del dato) sia le accuratezze (calcolo della differenza con il valore di riferimento).

## Capitolo 3: Post-trattamento dei dati

I risultati dell'elaborazione sono stati importati in ambiente *Matlab*. Il codice creato ha permesso di eseguire le seguenti operazioni:

1. Visualizzazione delle serie temporali grezze nel sistema di coordinate cartesiane;
2. Conversione delle coordinate delle stazioni *Master* in un sistema di coordinate geodetiche locali;
3. Individuazione e rigetto degli *outliers* con metodo 3sigma iterativo e visualizzazione grafica di essi;
4. Analisi statistica delle precisioni ed accuratezze;
5. Rappresentazione grafica dei risultati.

Dapprima, si è scelto di visualizzare i risultati delle serie temporali grezze in coordinate cartesiane X, Y, Z, soluzioni ottenute dalle elaborazioni con Infinity. Successivamente, per una migliore interpretazione dei risultati, separando le componenti planimetriche da quelle altimetriche, si è scelto di visualizzare i risultati in coordinate geodetiche locali  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$ .

L'analisi statistica di confronto dei dati è avvenuta dopo la pulizia dei risultati. La pulizia delle serie temporali consiste nella rimozione degli errori grossolani, generalmente chiamati *outliers*. Gli outliers sono stati individuati e successivamente rimossi tramite metodo iterativo del 3sigma, di seguito descritto.

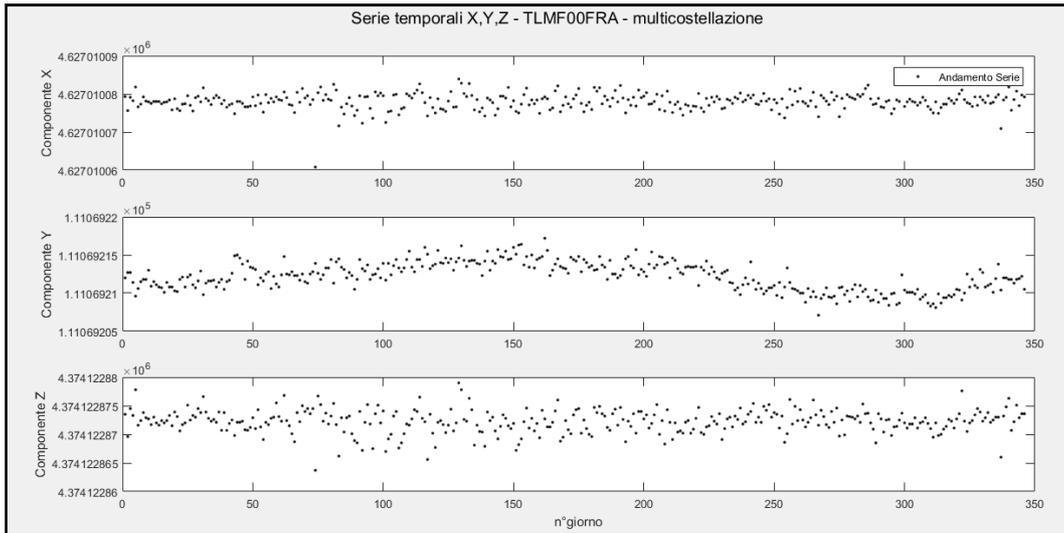
I risultati statistici di precisione ed accuratezza del posizionamento satellitare sono stati valutati al variare della lunghezza della base e del sistema satellitare considerato.

Nei paragrafi successivi è possibile conoscere nel dettaglio le fasi di post-trattamento dei dati e le conclusioni a cui si è giunti a valle di questa sperimentazione.

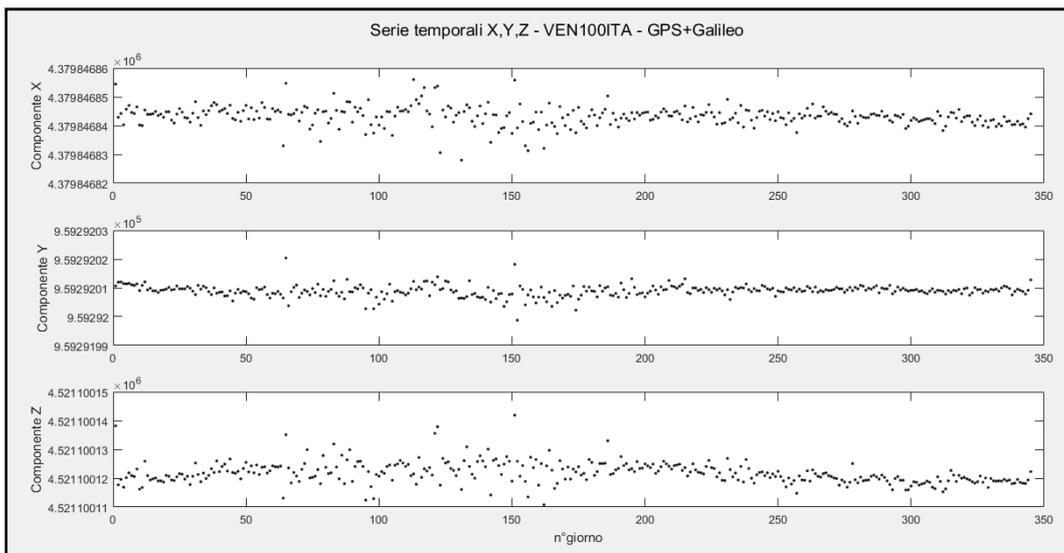
### 3.1 Serie temporali grezze e trasformazione in coordinate geodetiche locali

Le soluzioni in coordinate cartesiane geocentriche X, Y, Z sono state visualizzate graficamente nelle tre componenti come serie temporali grezze. I grafici sono stati ottenuti per ogni baseline ed ogni costellazione satellitare utilizzata, al fine di poterne osservare l'andamento generale.

A titolo di esempio si riportano alcune delle rappresentazioni ottenute:



*Figura 3.1: Serie temporali grezze in X, Y, Z multiconstellazione per la stazione TLMF00FRA*



*Figura 3.2: Serie temporali grezze in X, Y, Z costellazione GPS+Galileo per la stazione VEN100ITA*

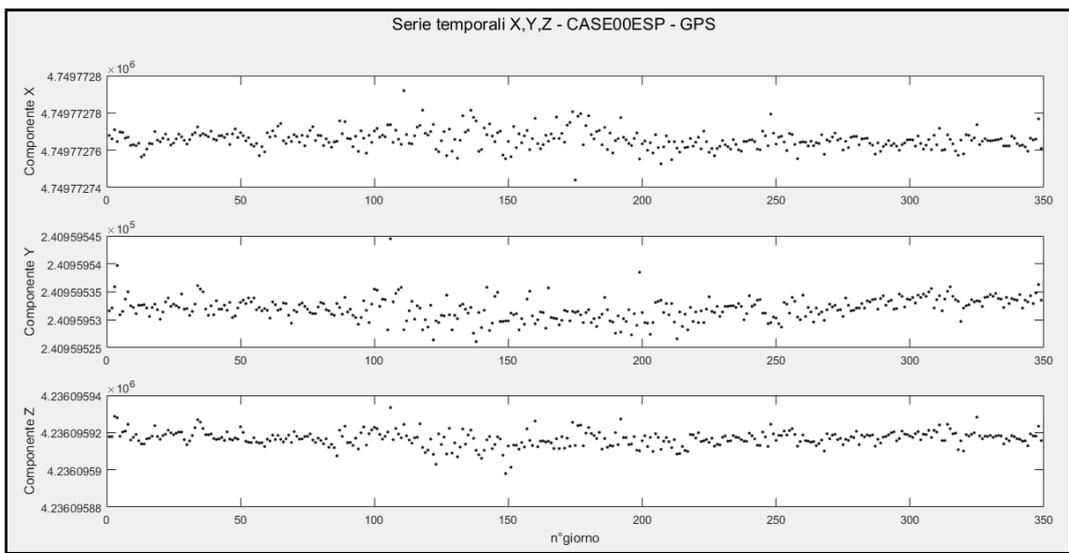


Figura 3.3: Serie temporali grezze in X, Y, Z costellazione GPS per la stazione CASE00ESP

Il sistema geocentrico è di difficile interpretazione, pertanto si è proceduto alla trasformazione delle soluzioni in coordinate geodetiche locali  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$ .

Successivamente, si è potuto procedere al calcolo delle deviazioni standard  $\sigma_{\Delta N}$ ,  $\sigma_{\Delta E}$ ,  $\sigma_{\Delta U}$  associate ad ogni componente.

A titolo di esempio, si riportano i grafici per ogni baseline e per una sola delle elaborazioni svolte:

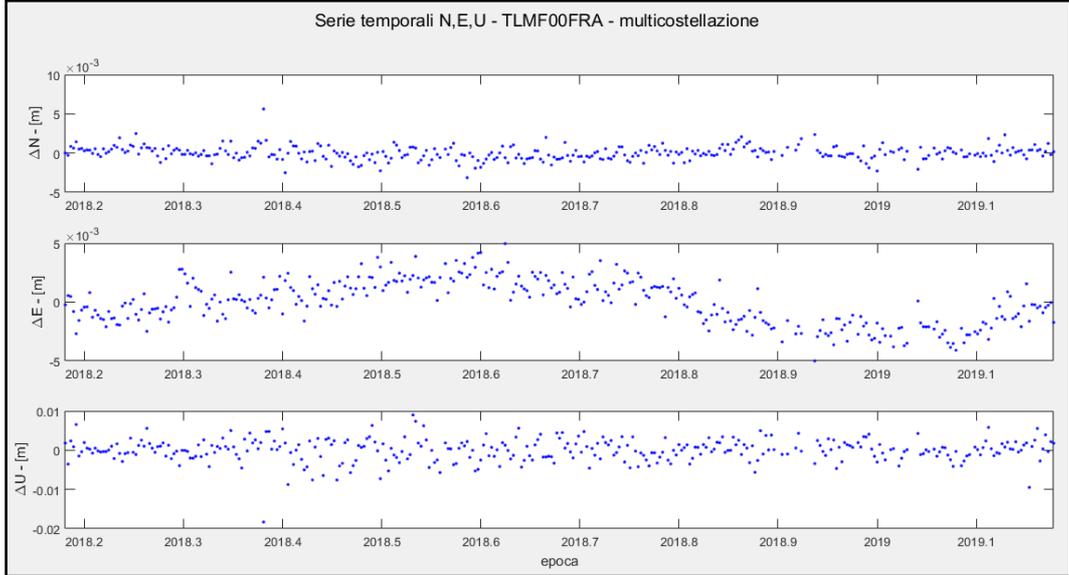


Figura 3.4: Soluzione  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$  multicostellazione per la stazione TLMF00FRA

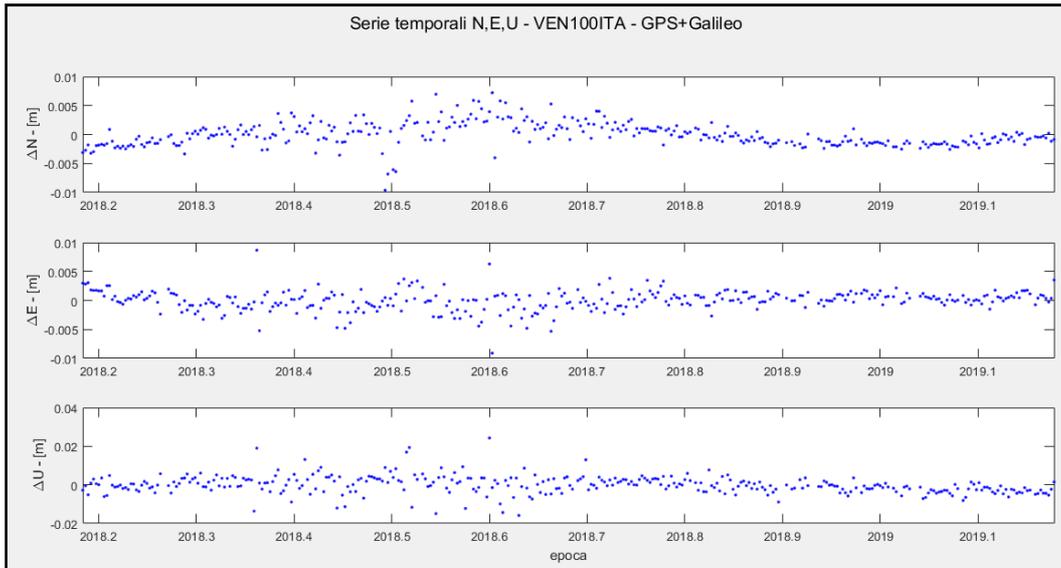


Figura 3.5: Soluzione  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$  costellazione GPS+Galileo per la stazione VEN100ITA

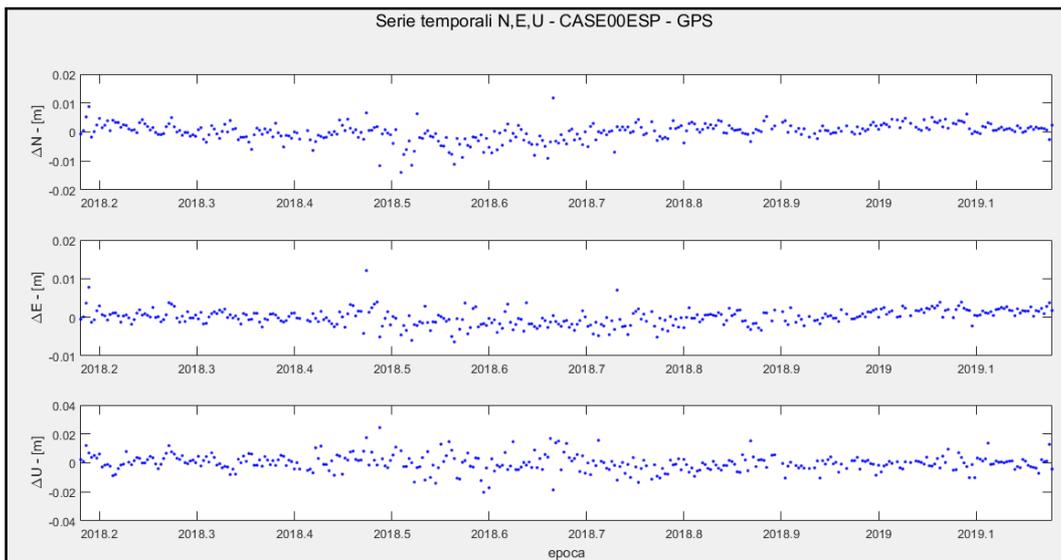


Figura 3.6: Soluzione  $\Delta N$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta U$  costellazione GPS per la stazione CASE00ESP

In figura 3.4, 3.5, 3.6, si può notare che le serie temporali presentano punti che si discostano molto dall'andamento medio della serie. Se non rimossi, questi punti (*outliers*) possono incidere sui risultati, sottostimando le precisioni effettivamente raggiungibili.

La descrizione del metodo di rimozione di questi punto è rimandata al paragrafo successivo.

### 3.2 Operazione di individuazione e rimozione outliers

Per individuare e rimuovere gli outliers, come già anticipato, è stato impiegato il metodo iterativo del “3sigma”, sinteticamente riportato di seguito:

- Calcolo della deviazione standard per ogni singola componente
- Normalizzazione dei residui di ogni componente rispetto alla  $\sigma$  ad essa associata
- Ricerca del massimo residuo in valore assoluto e rigetto della corrispondente misura in caso di superamento della soglia pari a  $3\sigma$ .

Per effettuare il criterio di pulizia, è stato necessario calcolare le deviazioni standard (errori quadratici medi associati ad ogni distribuzione) come:

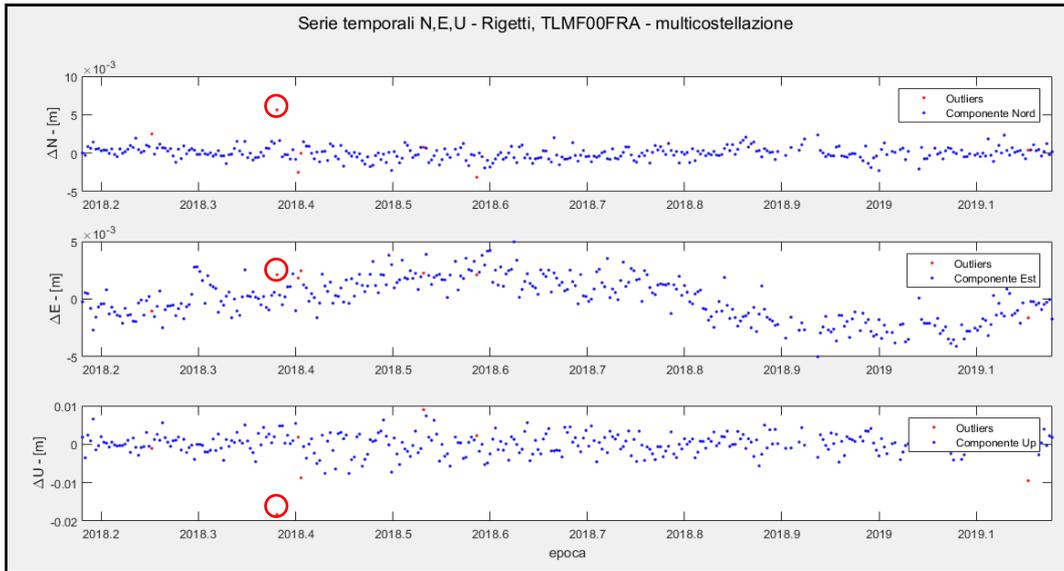
$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_n [s_i(t)]^2}{n}}$$

Per  $i = \Delta N, \Delta E, \Delta U$ , con  $n$  pari al numero di soluzioni per ogni elaborazione.

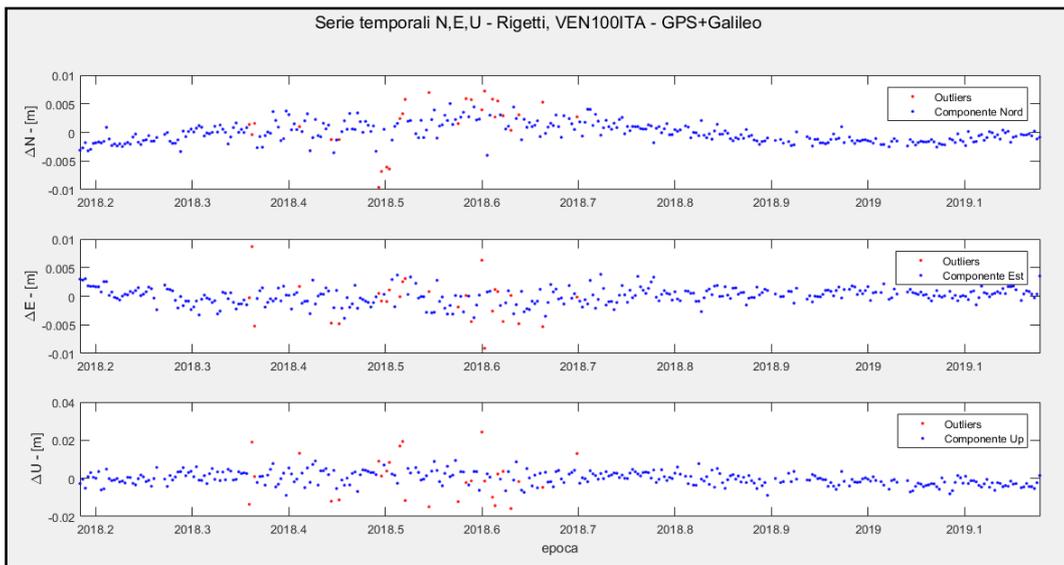
Dove  $s_i$  è il residuo rispetto alla retta di regressione lineare,  $t$  è il tempo ed  $n$  il numero di soluzioni totali del campione di dati in esame.

Calcolati i valori delle deviazioni standard associate alle tre componenti, il metodo 3sigma assume che una soluzione è da considerare come outliers, quindi da rimuovere, quando supera la soglia di  $3 * \sigma_i$  (pari al 99,7%).

A titolo di esempio vengono riportate le serie temporali nelle componenti Nord, Est, Up, in cui in rosso sono evidenziali i punti eliminati dal metodo 3sigma.



*Figura 3.7: Soluzione multicostellazione con outliers per la stazione TLMF00FRA  
(il cerchio rosso indica alcuni punti rimossi)*



*Figura 3.8: Soluzione costellazione GPS+Galileo con outliers per la stazione VEN100ITA*

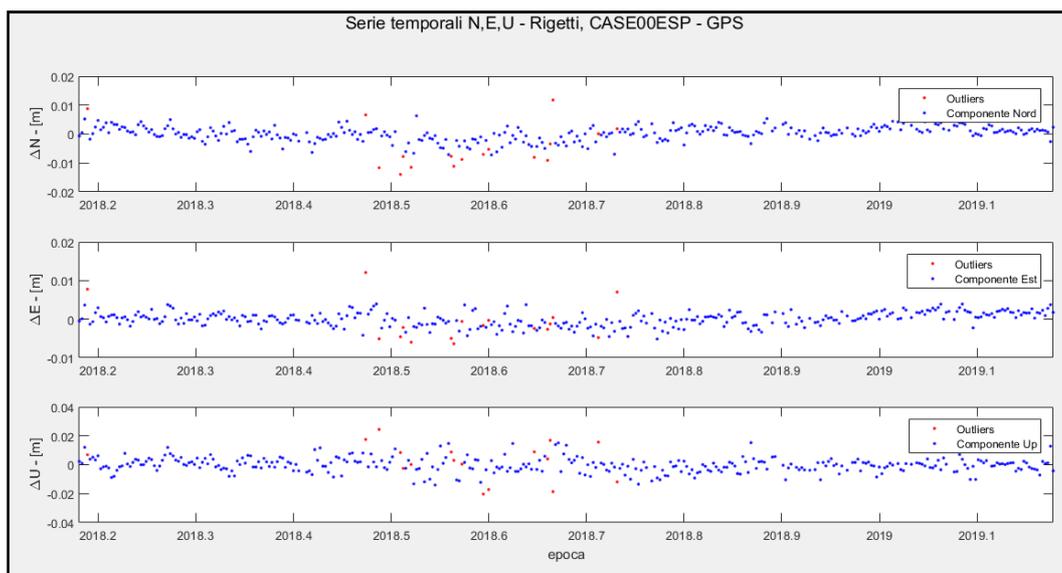


Figura 3.9: Soluzione costellazione GPS con outliers per la stazione CASE00ESP

A valle di tale operazione sono state ottenute le serie temporali depurate dagli outliers.

### 3.3 Valutazioni sulla precisione

La precisione è stata valutata in termini di ripetibilità del dato. La ripetibilità consiste nella capacità di ripetere un'osservazione senza divergere molto dalla precedente.

La sperimentazione si è focalizzata principalmente su due aspetti:

- Lunghezza della baseline *Master-Rover*;
- Tipologia di costellazione (o di combinazioni) utilizzata/e.

Il primo punto è utile per comprendere se la precisione si riduce all'aumentare della distanza tra Master e Rover. Il secondo punto ha il fine di comprendere i limiti attuali dei sistemi di navigazione satellitare nella stima del posizionamento di un punto.

Ricercando i limiti di ripetibilità delle soluzioni in esame, sono stati calcolati gli errori quadratici medi per “base corta”, “base media” e “base lunga” rispettivamente, al variare della tipologia di costellazione considerata.

Nelle *Tablelle 6, 7 e 8* si riportano i risultati ottenuti.

| <b>Precisione</b><br>“base corta” TLSE-TLMF (lunghezza 10 km) |                     |                     |                     |                |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| <b>Costellazioni</b>  | $\sigma_{\Delta N}$ | $\sigma_{\Delta E}$ | $\sigma_{\Delta U}$ | <b>rigetti</b> |
| Multicostellazione  | 1.9                 | 0.8                 | 2.6                 | 2%             |
| GPS+GLONASS   | 1.8                 | 0.8                 | 2.4                 | 3%             |
| GPS+Galileo   | 1.8                 | 0.8                 | 2.5                 | 3%             |
| GPS   | 1.9                 | 0.9                 | 2.9                 | 2%             |
| Galileo   | 2.4                 | 1.3                 | 6.4                 | 4%             |
| GLONASS   | 1.8                 | 0.9                 | 4.2                 | 3%             |
| Beidou  | <b>5.9</b>          | <b>4.7</b>          | <b>18.3</b>         | <b>40%</b>     |

Tabella 6: Precisioni raggiunte (in mm) e percentuale di rigetti per base corta TLSE-TLMF

| <b>Precisione</b><br>“base media” PADO-VEN1 (lunghezza 30 km) |                     |                     |                     |                |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| <b>Costellazioni</b>  | $\sigma_{\Delta N}$ | $\sigma_{\Delta E}$ | $\sigma_{\Delta U}$ | <b>rigetti</b> |
| Multicostellazione  | 1.4                 | 1.8                 | 4.2                 | 6%             |
| GPS+GLONASS   | 1.4                 | 1.7                 | 3.3                 | 7%             |
| GPS+Galileo   | 1.4                 | 1.7                 | 3.4                 | 8%             |
| GPS   | 1.4                 | 1.8                 | 4.2                 | 6%             |
| Galileo   | 1.8                 | 1.9                 | 7.5                 | 15%            |
| GLONASS   | 1.6                 | 1.8                 | 7.7                 | 10%            |
| Beidou  | <b>6.5</b>          | <b>5.8</b>          | <b>25.1</b>         | <b>39%</b>     |

Tabella 7: Precisioni raggiunte (in mm) e percentuale di rigetti per base media PADO-  
VEN1

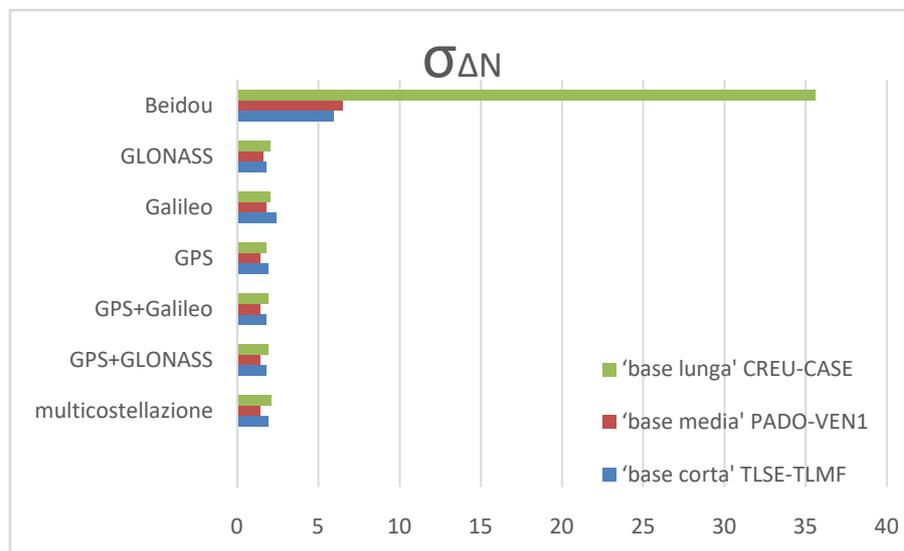
| <b>Precisione</b><br>“base lunga” CREU-CASE (lunghezza 60 km) |                     |                     |                     |                |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| <b>Costellazioni</b>  | $\sigma_{\Delta N}$ | $\sigma_{\Delta E}$ | $\sigma_{\Delta U}$ | <b>rigetti</b> |
| multicostellazione  | 2.1                 | 2.5                 | 5                   | 7%             |
| GPS+GLONASS   | 1.9                 | 2.4                 | 4.4                 | 5%             |
| GPS+Galileo   | 1.9                 | 2.5                 | 4.6                 | 6%             |
| GPS   | 1.8                 | 2.5                 | 5.1                 | 5%             |
| Galileo   | 2                   | 2.8                 | 7.8                 | 10%            |
| GLONASS   | 2                   | 2.2                 | 6.6                 | 11%            |
| Beidou  | <b>35.6</b>         | <b>27.5</b>         | <b>51.1</b>         | <b>34%</b>     |

Tabella 8: Precisioni raggiunte (in mm) e percentuale di rigetti per base lunga CREU-CASE

Dalle *Tablelle 6, 7, 8* si può osservare che non sempre la precisione si riduce all'aumentare della lunghezza della base. Infatti, si può notare che le precisioni raggiunte per la 'base media' (Padova-Venezia) risultano essere migliori, anche se di piccola entità, rispetto alla 'base corta'. Invece, per quanto concerne la 'base lunga', raddoppiando la distanza *Master-Rover*, le  $\sigma_i$  crescono di poco.

Si può notare come la ripetibilità sia millimetrica, con una deviazione standard massima che non raggiunge 1 cm, tranne che per la costellazione Beidou.

Gli istogrammi in figura 3.10, 3.11, 3.12 rappresentano per ogni componente (Nord, Est, Up), i valori degli errori quadratici medi al variare della lunghezza della base e della tipologia di costellazione.



*Figura 3.10: Errore quadratico medio in mm associato alla componente Nord*

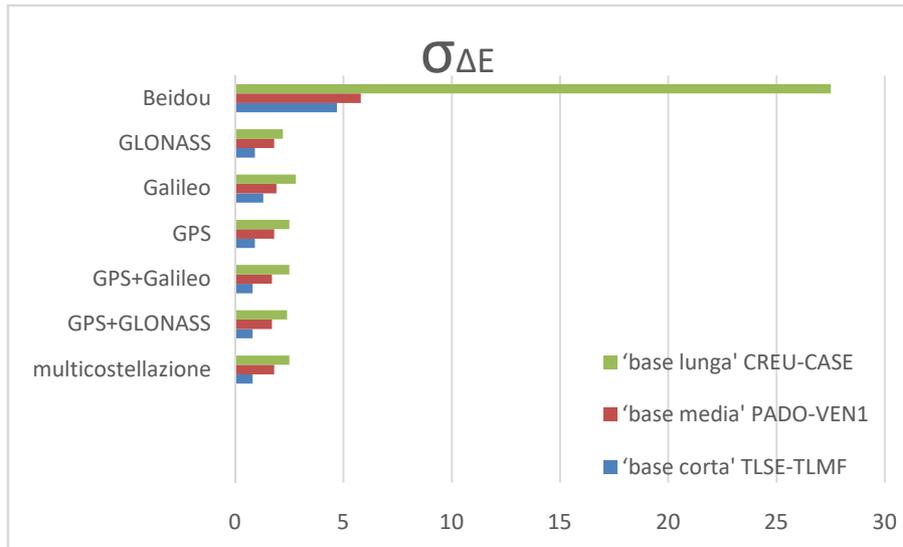


Figura 3.11: Errore quadratico medio in mm associato alla componente Est

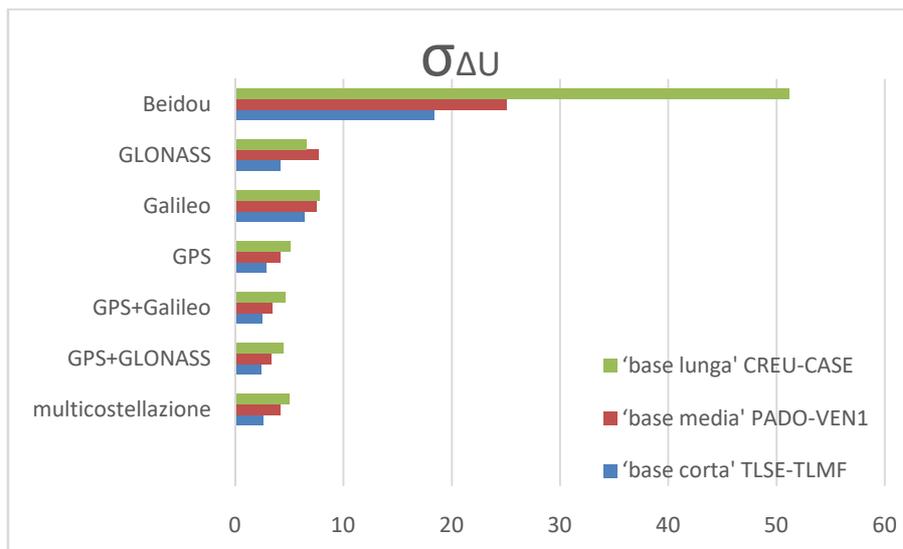


Figura 3.12: Errore quadratico medio in mm associato alla componente Up

Dai grafici e dalle tabelle, si può notare che il valore peggiore di  $\sigma$ , nel confronto tra le tre componenti locali per ogni baseline, è quello relativo alla componente Up. Questo risultato è in accordo col fatto che i sistemi GNSS sono generalmente più precisi in planimetria che in quota.

Osservando le tabelle ed i grafici risulta evidente che il valore massimo dell'errore quadratico medio per ogni componente locale è quello restituito dalla costellazione satellitare cinese Beidou.

L'ultima colonna delle *Tabelle 6, 7, 8* riporta le percentuali di rigetti: parametro di particolare importanza qualora si voglia definire la qualità restituita dai differenti sistemi. Particolarmente evidente è che la percentuale di rigetti cresce all'aumentare della distanza Master-Rover e si mantiene in genere al di sotto del 10% per tutte le combinazioni effettuate, tranne che per la costellazione cinese Beidou.

In *Tabella 9* si può notare che, a partire dal numero di dati elaborati per la costellazione Beidou, il numero di soluzioni rigettate per ognuna delle tre baseline è molto elevato:

| Costellazione satellitare Beidou |                       |                         |                       |         |
|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------|
| BASELINE                         | n° baseline elaborate | n°soluzioni considerate | n°soluzioni rigettate | rigetti |
| TLSE-TLMF                        | 269                   | 162                     | 107                   | 40%     |
| PADO-VEN1                        | 274                   | 168                     | 106                   | 39%     |
| CREU-CASE                        | 328                   | 218                     | 110                   | 34%     |

*Tabella 9: N° soluzioni rigettate per la costellazione Beidou*

Sulla base dei risultati ottenuti, è stato possibile trarre alcune conclusioni.

### GPS+GLONASS

Il miglior risultato in termini di precisione è stato raggiunto dalla combinazione 'classica' GPS+GLONASS e ciò stupisce: ci si aspettava che fosse l'utilizzo di tutte le costellazioni simultaneamente a dare i migliori risultati di ripetibilità; invece, con questa combinazione i valori delle deviazioni standard anche per lunghe distanze (>60 km) sono stati più contenuti.

### Galileo vs GPS e GLONASS

Nonostante la costellazione Galileo non sia ancora al completo, restituisce risultati dello stesso ordine di grandezza delle costellazioni statunitense e russa; dunque, si può supporre che al completamento della stessa (previsto nel 2020), essa potrà raggiungere anche precisioni maggiori.

In *Tabella 10* sono posti a confronto i valori delle precisioni raggiungibili con le costellazioni GPS, GLONASS e Galileo singolarmente:

| Lunghezza base | TLSE-TLMF (10 km)           |                             |                             | PADO-VEN1 (30 km)           |                             |                             | CREU-CASE (60 km)           |                             |                             |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Costellazione  | $\sigma_{\Delta N}$<br>[mm] | $\sigma_{\Delta E}$<br>[mm] | $\sigma_{\Delta U}$<br>[mm] | $\sigma_{\Delta N}$<br>[mm] | $\sigma_{\Delta E}$<br>[mm] | $\sigma_{\Delta U}$<br>[mm] | $\sigma_{\Delta N}$<br>[mm] | $\sigma_{\Delta E}$<br>[mm] | $\sigma_{\Delta U}$<br>[mm] |
| GPS            | 1.9                         | 0.9                         | 2.9                         | 1.4                         | 1.8                         | 4.2                         | 1.8                         | 2.5                         | 5.1                         |
| GLONASS        | 1.8                         | 0.9                         | 4.2                         | 1.6                         | 1.8                         | 7.7                         | 2                           | 2.2                         | 6.6                         |
| Galileo        | 2.4                         | 1.3                         | 6.4                         | 1.8                         | 1.9                         | 7.5                         | 2                           | 2.8                         | 7.8                         |

Tabella 10: Confronto precisioni raggiungibili da GPS e Galileo

A titolo di esempio, si riporta la sovrapposizione delle serie temporali di GPS e Galileo per la stazione di TLMF00FRA, da cui è possibile notare che la dispersione del sistema satellitare Galileo risulta maggiore di quella del GPS, pur mantenendo lo stesso andamento generale:

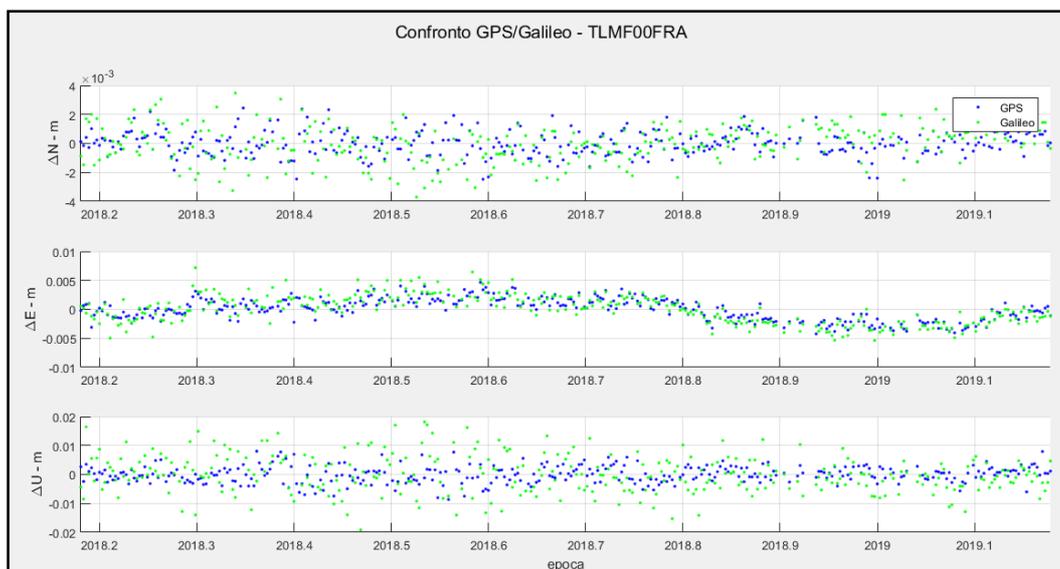


Figura 3.13: Confronto GPS/Galileo stazione TLMF00FRA

### GPS+GLONASS vs GPS+Galileo

Le combinazioni GPS+GLONASS e GPS+Galileo restituiscono differenze di  $\sigma_i$  piccolissima entità; ciò è dovuto al fatto che GLONASS e Galileo, raggiungono livelli di precisione comparabili tra loro, a fronte anche della medesima percentuale di rigetti:

| Lunghezza base | TLSE-TLMF<br>(10 km) |                     |                     | PADO-VEN1<br>(30 km) |                     |                     | CREU-CASE<br>(60 km) |                     |                     |
|----------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Costellazione  | $\sigma_{\Delta N}$  | $\sigma_{\Delta E}$ | $\sigma_{\Delta U}$ | $\sigma_{\Delta N}$  | $\sigma_{\Delta E}$ | $\sigma_{\Delta U}$ | $\sigma_{\Delta N}$  | $\sigma_{\Delta E}$ | $\sigma_{\Delta U}$ |
|                | [mm]                 | [mm]                | [mm]                | [mm]                 | [mm]                | [mm]                | [mm]                 | [mm]                | [mm]                |
| GPS+GLONASS    | 1.8                  | 0.8                 | 2.4                 | 1.4                  | 1.7                 | 3.3                 | 1.9                  | 2.4                 | 4.4                 |
| GPS+Galileo    | 1.8                  | 0.8                 | 2.5                 | 1.4                  | 1.7                 | 3.4                 | 1.9                  | 2.5                 | 4.6                 |

Tabella 11: Confronto precisioni raggiungibili dalle combinazioni GPS+GLONASS e GPS+Galileo

A titolo di esempio, si riporta la sovrapposizione delle serie temporali della combinazione GPS+GLONASS e GPS+Galileo per la stazione di TLMF00FRA, da cui si può notare che l'andamento delle serie è il medesimo:

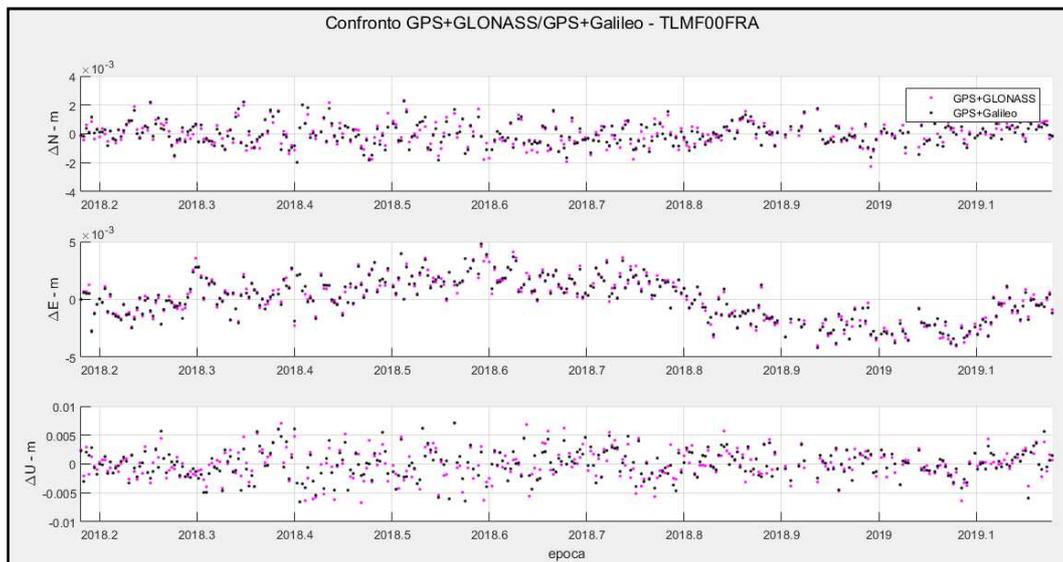


Figura 3.14: Confronto GPS+GLONASS/GPS+Galileo stazione TLMF00FRA

### Beidou

La costellazione Beidou è quella che restituisce i risultati peggiori: la componente altimetrica è la più scarsa, per basi di 60 km il valore dell'errore quadratico medio associato supera i 5 cm.

Le precisioni di questa costellazione si discostano di un ordine di grandezza dai migliori risultati ottenuti. In generale, per tutte le distanze considerate, il sistema satellitare cinese non offre buone performance.

È utile visualizzarne graficamente la differenza, prendendo in esame l'andamento delle serie temporali della costellazione Beidou sovrapposte a quelle restituite dalla combinazione GPS+GLONASS.

A titolo di esempio vengono considerati i risultati ottenuti per la stazione di VEN100ITA:

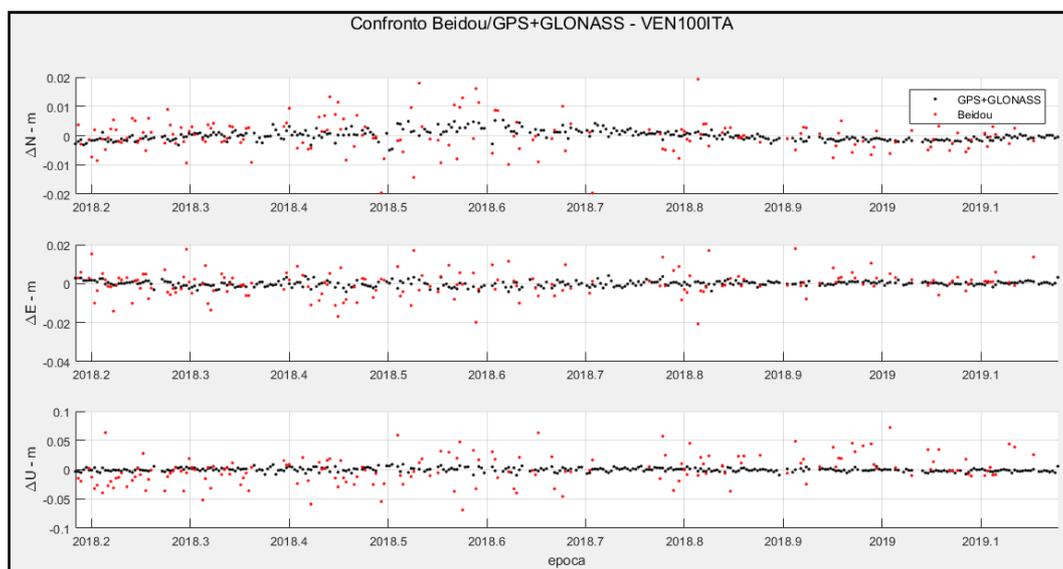


Figura 3.15: Confronto Beidou/GPS+GLONASS stazione VEN100ITA

In figura 3.15, si nota che la dispersione della costellazione Beidou è nettamente maggiore.

Dai risultati ottenuti e riportati nelle tabelle precedenti, risulta evidente come la costellazione Beidou presenti risultati molto peggiori rispetto alle altre. Si è scelto quindi, di analizzare in modo più approfondito le cause di tale comportamento e si è osservato che generalmente il numero di satelliti disponibili per l'elaborazione è molto inferiore rispetto alle altre costellazioni. Per la costellazione Beidou il numero di satelliti disponibili non si è mai mostrato superiore al minimo numero necessario per il posizionamento, cioè 4. Tale aspetto riduce la ridondanza di osservazioni ai fini del calcolo della posizione e rende più debole il fissaggio delle ambiguità di fase iniziali.

Quanto appena descritto è un dato rilevante: la stima della posizione con un numero limitato di satelliti è debole.

### Multicostellazione

L'analisi comparata dei valori ottenuti in termini di errore quadratico medio, indica che il sistema multicostellazione non fornisce il risultato migliore, che come già detto

è restituito dalla combinazione GPS+GLONASS. Nonostante ciò, in termini di ripetibilità e stabilità della soluzione, i risultati ottenuti sono comparabili con i migliori ottenuti e permettono di affermare che l'utilizzo simultaneo può raggiungere elevate precisioni sia in planimetria sia in altimetria.

È probabile che i risultati siano stati lievemente perturbati dalla presenza della costellazione Beidou, che, come evidenziato in precedenza, non fornisce risultati comparabili con le altre costellazioni.

Va sottolineato che l'acquisizione contemporanea di più sistemi è fondamentale perché permette di incrementare il numero di satelliti osservabili contemporaneamente fino a 20-30, anche in condizioni più critiche, di difficile ricezione del segnale.

### 3.4 Valutazioni sull'accuratezza

L'accuratezza rappresenta la capacità di un'osservazione di avvicinarsi al valore reale della grandezza ricercata. Nel caso in esame, l'accuratezza è stata determinata confrontando il valore assunto come riferimento con il valore medio del campione di dati considerato.

È stato eseguito il calcolo del valore medio per ogni componente locale. Tali valori, espressi in mm, sono riportati in *Tabella 12, 13 e 14* al variare della lunghezza della baseline:

| Accuratezza stazione TLMF00FRA |                 |                 |                 |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Costellazione                  | $\Delta N$ [mm] | $\Delta E$ [mm] | $\Delta U$ [mm] |
| Multicostellazione             | -2.7            | -0.3            | 26.5            |
| GPS+GLONASS                    | -2.5            | -0.2            | 26.2            |
| GPS+Galileo                    | -2.6            | -0.4            | 27.3            |
| GPS                            | -2.7            | -0.3            | 26.3            |
| GLONASS                        | -2.2            | 0.1             | 26.8            |
| Galileo                        | <b>-3.8</b>     | <b>3.4</b>      | <b>31.1</b>     |
| Beidou                         | -3.0            | 0.3             | 24.2            |

*Tabella 12: Valutazione accuratezza stazione TLMF00FRA*

| Accuratezza stazione VEN100ITA |                 |                 |                 |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Costellazione                  | $\Delta N$ [mm] | $\Delta E$ [mm] | $\Delta U$ [mm] |
| Multicostellazione             | 0.1             | 1.9             | -6.6            |
| GPS+GLONASS                    | -0.2            | 1.8             | -5.6            |
| GPS+Galileo                    | -1.3            | 2.1             | -7.6            |
| GPS                            | 0.1             | 1.9             | -6.6            |
| GLONASS                        | <b>3.6</b>      | 0.8             | -9.5            |
| Galileo                        | -0.3            | <b>2.4</b>      | <b>-23.1</b>    |
| Beidou                         | -0.7            | 3.5             | 4.2             |

Tabella 13: Valutazione accuratezza stazione VEN100ITA

| Accuratezza stazione CASE00ESP |                 |                 |                 |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Costellazione                  | $\Delta N$ [mm] | $\Delta E$ [mm] | $\Delta U$ [mm] |
| Multicostellazione             | -3.2            | 0.5             | 12.6            |
| GPS+GLONASS                    | -3.1            | 0.7             | 13.6            |
| GPS+Galileo                    | -2.8            | 0.4             | 14.0            |
| GPS                            | -2.6            | 0.4             | 13.1            |
| GLONASS                        | -4.4            | 2.0             | <b>19.5</b>     |
| Galileo                        | -3.3            | 0.6             | 19.2            |
| Beidou                         | <b>-6.2</b>     | <b>3.9</b>      | -1.1            |

Tabella 14: Valutazione accuratezza stazione CASE00ESP

I valori evidenziati di colore rosso in *Tabella 12*, *13* e *14* rappresentano quelli che più si discostano dal valore di riferimento.

Per una più facile interpretazione, i risultati sono stati rappresentati graficamente separando le componenti planimetriche  $\Delta N$ - $\Delta E$  da quella altimetrica  $\Delta U$ . Sono stati ottenuti due grafici per ogni baseline: uno per le componenti planimetriche ed uno per la componente altimetrica al variare della tipologia di elaborazione.

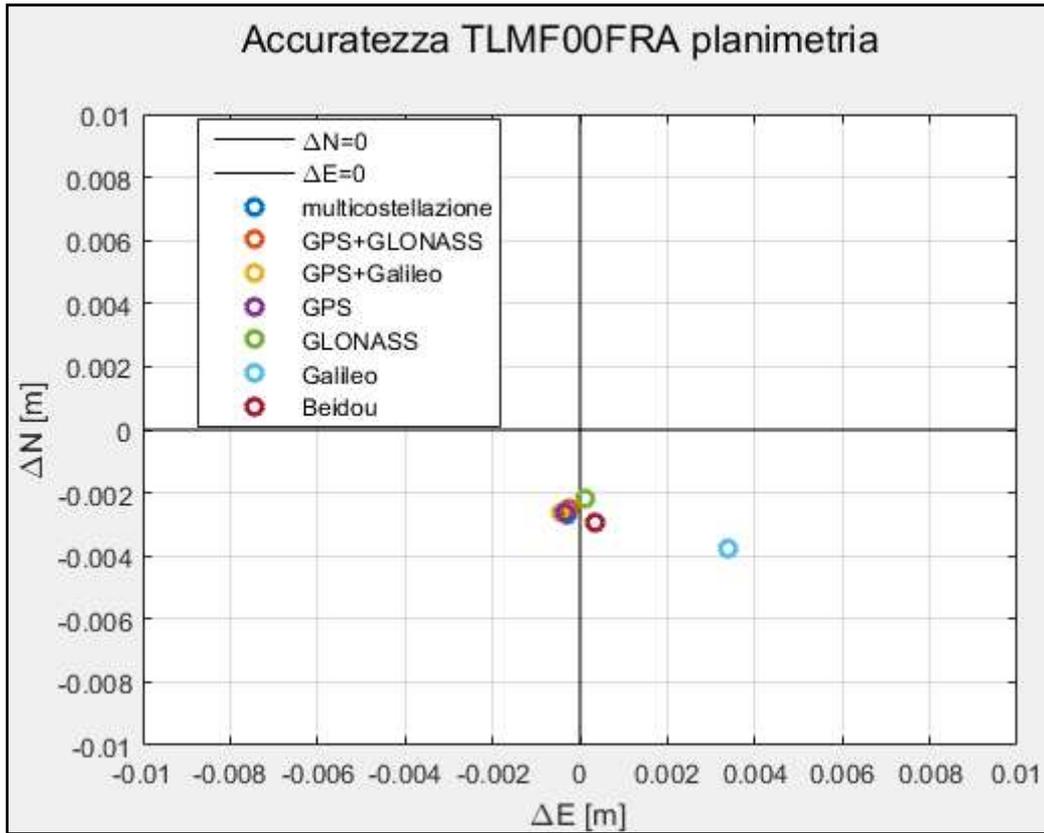


Figura 3.16: Componenti planimetriche al variare della tipologia di elaborazione per la stazione TLMF00FRA

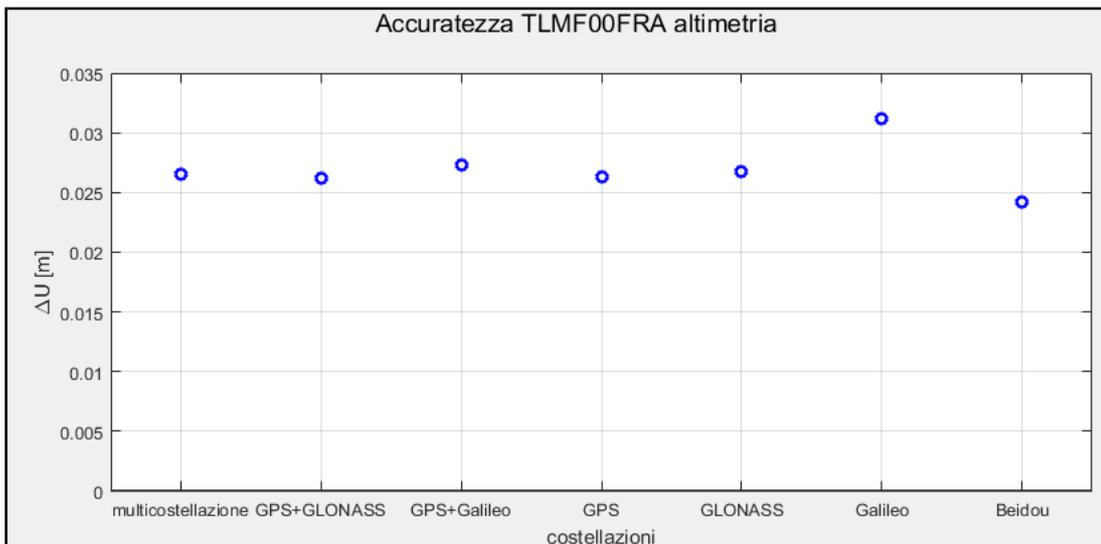


Figura 3.17: Componente altimetrica al variare della tipologia di elaborazione per la stazione TLMF00FRA

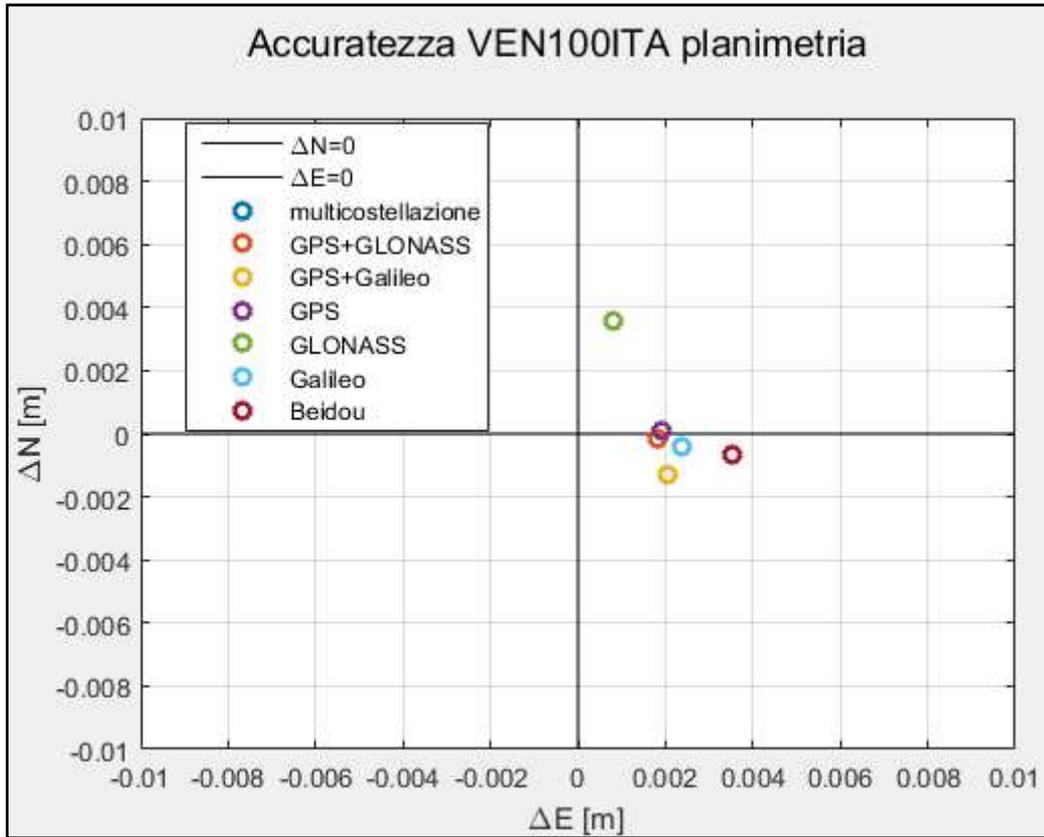


Figura 3.18: Componenti planimetriche al variare della tipologia di elaborazione per la stazione VEN100ITA

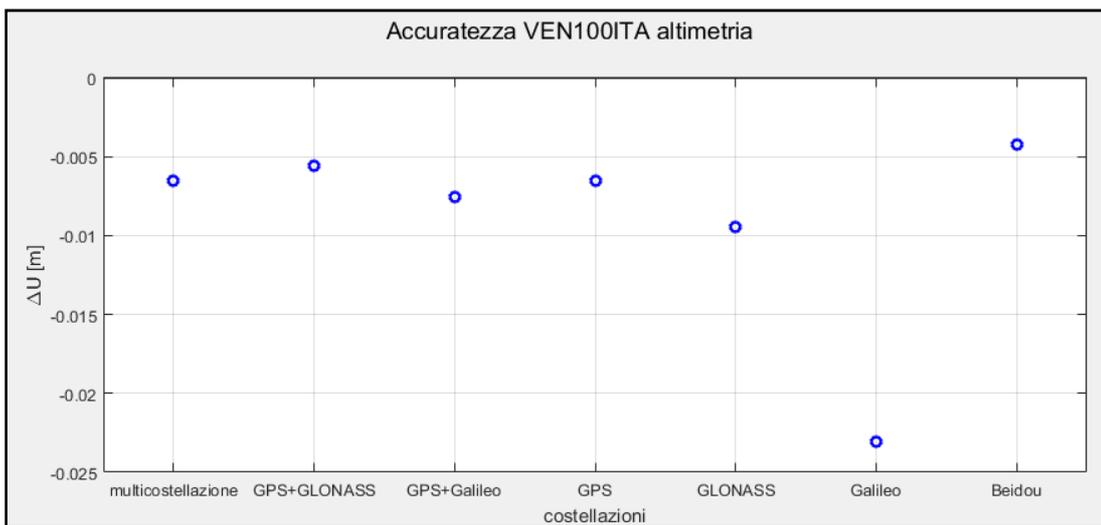


Figura 3.19: Componente altimetrica al variare della tipologia di elaborazione per la stazione VEN100ITA

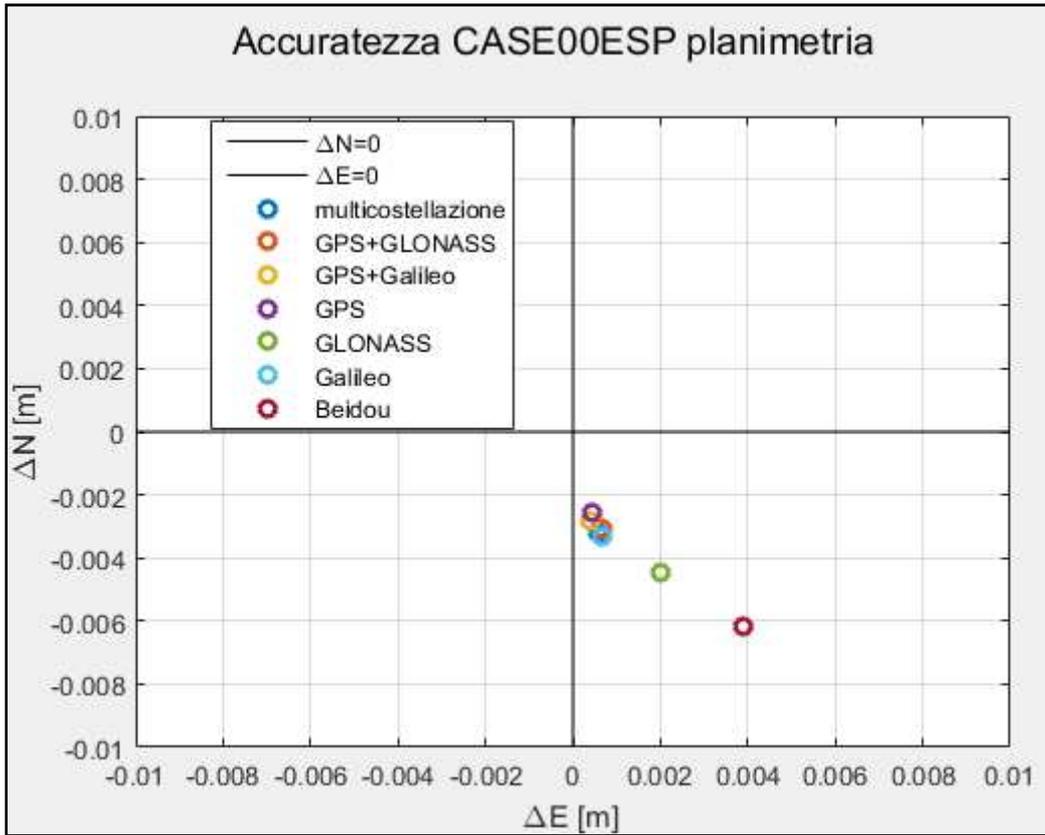


Figura 3.20: Componente planimetrica al variare della tipologia di elaborazione per la stazione CASE00ESP

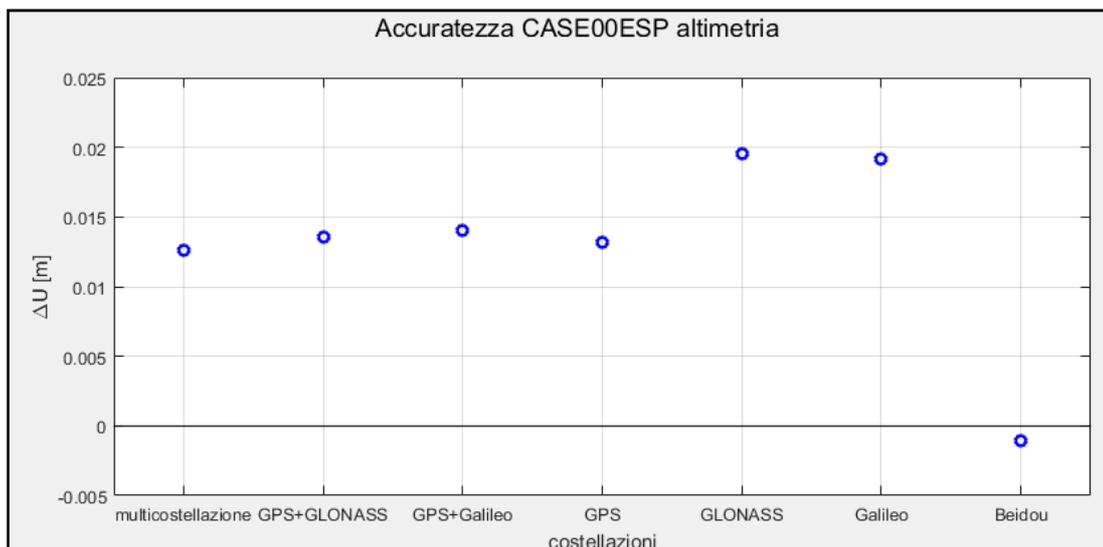


Figura 3.21: Componente altimetrica al variare della tipologia di elaborazione per la stazione CASE00ESP

Osservando i valori in *Tabella 12, 13 e 14* ed i grafici ad esse corrispondenti, si può affermare che:

- i risultati di accuratezza, nel confronto tra le tre componenti locali, per ogni baseline sono peggiori nella componente altimetrica;
- le accuratezze associate alle componenti planimetriche non seguono una regola generale, a seconda della tipologia di elaborazione risulta peggiore la componente Nord rispetto alla componente Est o viceversa;
- l'accuratezza nel posizionamento della stazione TLM00FRA ("base corta") ha restituito i valori più lontani dal valore di riferimento con la costellazione Galileo, in tutte le componenti geodetiche locali;
- i valori di accuratezza peggiori nel posizionamento della stazione VEN100ITA ("base media") sono rappresentati dalla costellazione GLONASS nella componente Nord e dalla costellazione Galileo nelle componenti Est ed Up;
- l'accuratezza nel posizionamento della stazione CASE00ESP ("base lunga") ha restituito i valori peggiori nelle componenti planimetriche con la costellazione cinese Beidou, mentre nella componente altimetrica con la costellazione GLONASS;
- le configurazioni di multicostellazione, GPS+GLONASS e GPS+Galileo raggiungono livelli di accuratezza comparabili tra loro.

## **Capitolo 4: Applicazione multi-GNSS con strumentazione a basso costo**

Con l'avvento di tecniche di posizionamento GNSS sempre più efficienti, l'impiego di queste strumentazioni negli ultimi anni ha manifestato un notevole incremento. Tale incremento è dovuto principalmente a due ragioni:

- aumento delle costellazioni satellitari visibili;
- riduzione dei costi e sviluppo di strumentazione low-cost.

L'evoluzione tecnologica ha favorito la produzione di prodotti a basso costo (circa qualche centinaio di euro) capaci di raggiungere precisioni simili a quelle degli strumenti di classe geodetica. Grazie alle ridotte dimensioni e al basso prezzo, i ricevitori GNSS a basso costo hanno aperto un nuovo scenario nel monitoraggio del territorio.

Molte sono state le sperimentazioni condotte su questa tipologia di strumentazione ed i risultati corrispondenti hanno sempre evidenziato una sensibilità di questi sistemi di ordine centimetrico.

I test condotti durante questa sperimentazione sono stati eseguiti in modalità RTK ed effettuati considerando principalmente la dipendenza dei risultati dal tempo di acquisizione e dalla distanza dalla stazione di riferimento.

Il caso di studio ha considerato l'impiego di una coppia di ricevitori a basso costo a doppia frequenza (ublox F9P) abbinato a due tipologie di antenne a basso costo (Harxon GPS1000 e Tallysman TW3882), su baseline di lunghezza variabile tra i 100 m e i 2000 m. I due ricevitori sono stati messi in collegamento tra loro tramite radio ad elevata potenza.

La sperimentazione è stata eseguita per valutare l'impatto della distanza sulle precisioni e sui tempi di fissaggio dell'ambiguità di fase.

### **4.1 Caratteristiche generali ricevitori ed antenne a basso costo utilizzate**

In questo paragrafo viene presentata la strumentazione a basso costo utilizzata nella sperimentazione, con le relative caratteristiche tecniche principali.

#### *Ublox F9P*

Uno dei ricevitori GNSS a doppia frequenza disponibili oggi sul mercato è il prototipo ublox F9P, creato dalla U-blox, società svizzera che sviluppa e vende chip

e moduli. È in grado di supportare i sistemi globali di navigazione satellitare (GNSS), inclusi GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou.



Figura 4.1: Prototipo ublox F9P

Caratteristiche generali dello ublox F9P:

- RTK multibanda con tempi di convergenza rapidi e prestazioni affidabili;
- precisione dell'ordine del cm;
- piccole dimensioni e molto efficiente dal punto di vista energetico.

Con questo ricevitore viene fornita in dotazione un'*antenna patch*: è l'antenna più comune per le applicazioni GNSS, di piccole dimensioni (qualche centimetro), generalmente in ceramica e montata su una piastra in metallo. È ideale per essere utilizzata su superfici piane e in luoghi aperti. Questa antenna mostra ottime performance in condizioni ottimali ed un buon rapporto qualità-prezzo.

#### Harxon GPS1000

Caratteristiche generali antenna Harxon GPS1000:

- supporta la ricezione dei segnali GPS, GLONASS, Beidou e Galileo;
- la stabilità del centro di fase dell'antenna garantisce l'accuratezza del posizionamento ad alto livello (certificato di calibrazione dell'antenna);
- capacità anti-interferenza per ambienti operativi con cattiva visibilità;
- attacco cavo antenna laterale, di facile utilizzo;
- piccole dimensioni e struttura rinforzata;
- costo: attorno ai 400€.

Ha capacità di ricezione dei segnali a bassa quota, con conseguente guadagno in condizioni di cattiva visibilità del cielo. Il suo design compatto e leggero la rende ottimale per applicazioni. La sua forma ricorda molto quella delle antenne di classe geodetica e ciò può far pensare che le sue prestazioni siano prossime ad esse.



*Figura4.2: Antenna Harxon GPS1000*

### Tallysman TW3882

Caratteristiche generali antenna Tallysman TW3882:

- supporta la ricezione dei segnali GPS, GLONASS, Beidou e Galileo;
- ideale per i sistemi di rilevamento RTK a doppia banda di frequenza L1/L2;
- include anche un filtro LNA, che offre una protezione avanzata contro segnali sub-armonici di alto livello;
- attacco cavo antenna coassiale, dunque deve essere previsto un apposito alloggiamento per un corretto utilizzo;
- piccolissime dimensioni, leggera;
- costo: attorno ai 300€.



*Figura 4.3: Antenna Tallysman TW3882*

Questa antenna è alloggiata in una custodia resistente alle intemperie di tipo industriale per favorirne il montaggio permanente; è disponibile nei modelli conico o

piatto, di colore grigio scuro o bianco. Le sue minute dimensioni ricordano molto l'antenna patch fornita in abbinamento allo ublox F9P.

Inoltre, si sottolinea che la gestione dei dati in sito è avvenuta con l'impiego di un RaspberryPi (un calcolatore implementato su una singola scheda elettronica, utilizzato per archiviare le soluzioni e collegato ad una chiavetta 4G).

Come già anticipato, i due ricevitori ublox F9P sono stati messi in comunicazione tra loro tramite radio ad elevata potenza ACTI-Link (con un raggio di copertura fino a 5 km di distanza in condizioni ottimali).

Si riporta in figura 4.4 lo schema della strumentazione impiegata:

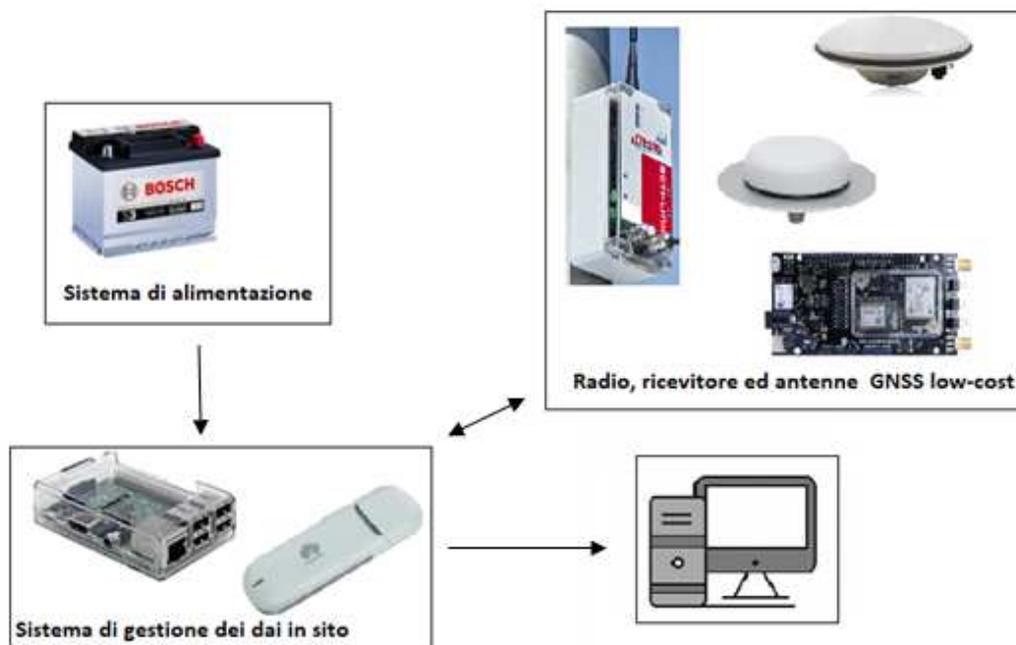


Figura 4.4: Illustrazione collegamenti strumentazione

## 4.2 Descrizione della sperimentazione condotta

La sperimentazione condotta consiste in una serie di test eseguiti con ricevitori GNSS a doppia frequenza a basso costo (ublox F9P) accoppiati con le antenne a basso costo precedentemente descritte.

Le misure in campagna sono state effettuate con approccio tradizionale, basato sul posizionamento relativo tra una stazione *Master* ed una *Rover*, operando in modalità RTK, con tempi di acquisizione non superiori a 30 minuti. Anche per questa

tipologia di sperimentazione sono stati acquisiti dati con intervallo di campionamento ad 1 Hz.

Al fine di eseguire i test, è stata materializzata la stazione Master sul tetto di un edificio ed a partire da questa, sono stati scelti cinque punti a distanza variabile tra 100 m e 2000 m, in cui è stata, di volta in volta, posizionata la stazione Rover mobile, come riportato in figura 4.5:



*Figura 4.5: Inquadramento dei punti: stazione Master e punti a distanza variabile*

Alla stazione Master è stato necessario assegnare delle coordinate assolute. Esse sono state ricavate dopo aver acquisito in modalità NRTK con ricevitore TOPCON GRS-1.



*Figura 4.6: Ricevitore GIS TOPCON GRS-1*

Le coordinate sono state assegnate allo ublox F9P tramite il software u-center di gestione del ricevitore, permettendone la configurazione.

Una volta installata ad hoc la strumentazione per la stazione Master, si è proceduto con la materializzazione dei punti utilizzati per il test, con opportuni chiodi topografici. Per l'installazione della stazione Rover sono stati impiegati due treppiedi, su cui sono state posizionate rispettivamente la basetta per l'antenna e quella per la radio.



*Figura 4.7: Materializzazione stazione Master sul tetto dell'edificio*



*Figura 4.8: Esempio materializzazione stazione Rover a 500 m*

Per ogni distanza si è scelto di valutare dapprima il tempo di fissaggio dell'ambiguità di fase e successivamente la ripetibilità della soluzione.

Il tempo medio di fissaggio dell'ambiguità di fase (tempo di fix), ovvero il tempo necessario affinché la soluzione passi da *float* a *fixed*, grazie alle correzioni inviate dalla stazione Master in tempo reale alla stazione Rover, è stato determinato ripetendo 10 volte la procedura, spegnendo e riaccendendo il ricevitore.

Per quanto concerne la determinazione del livello di precisione ottenibile dalla strumentazione *low-cost* esaminata, sono stati eseguiti 9 test da 30 minuti ciascuno per ognuno dei cinque punti. In particolare, i rilievi sono stati suddivisi in tre prove da 3 ripetizioni ciascuna. Tali ripetizioni sono state eseguite in giorni ed orari differenti, al fine di poter considerare una configurazione satellitare più varia possibile.

Si è scelto di eseguire i test su intervalli di tempo limitati in un'ottica di limitazione di consumo energetico della strumentazione.

Eseguiti i test con entrambe le antenne, sono state studiate le soluzioni ottenute dalle acquisizioni, archiviate sul RaspberryPi, e rappresentate in ambiente *Matlab*.

Da figura 4.9 a 4.18 sono riportate le serie temporali ottenute dai 9 test nelle componenti locali al variare della distanza.

I dati di ogni ripetizione vengono rappresentati con differenti colori e sovrapposti tra loro, sia con le antenne Harxon GPS1000 sia con le antenne Tallysman TW3882.

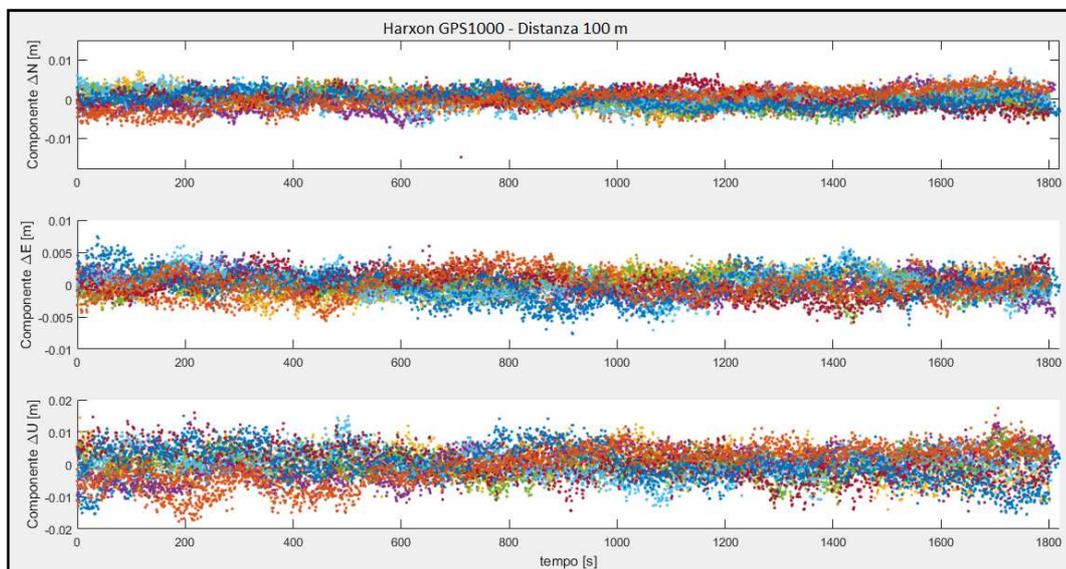
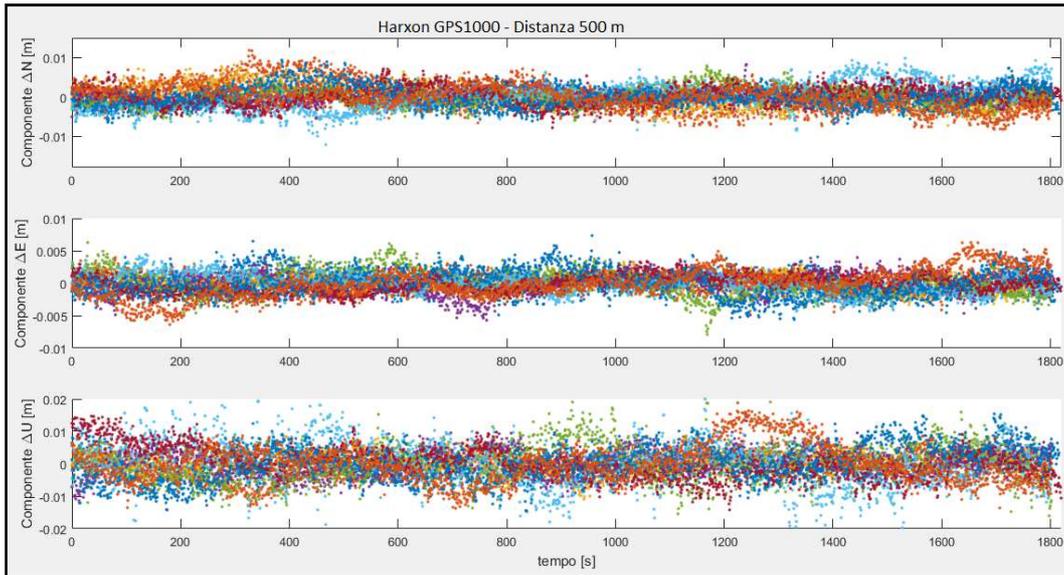
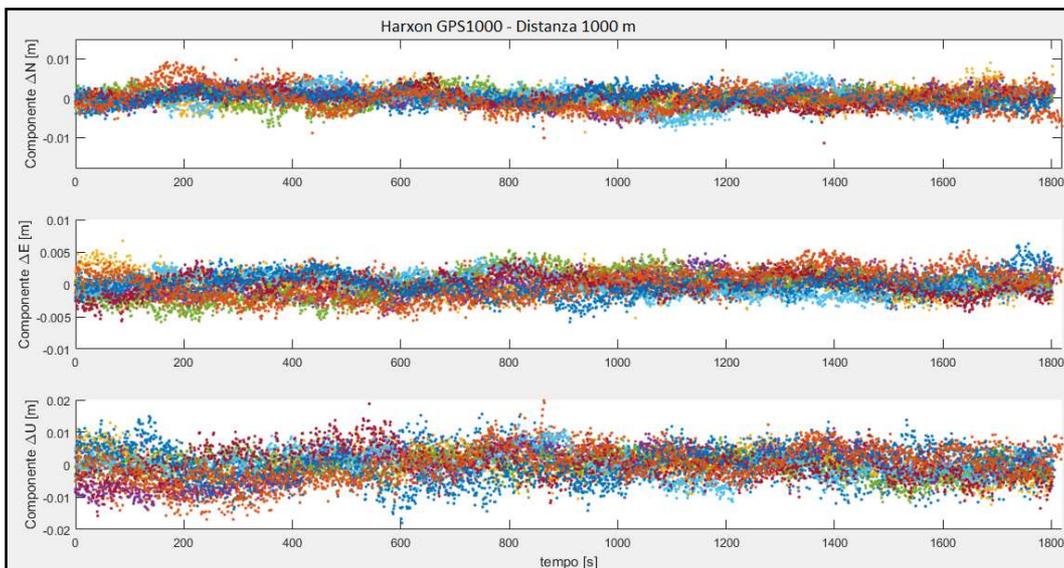


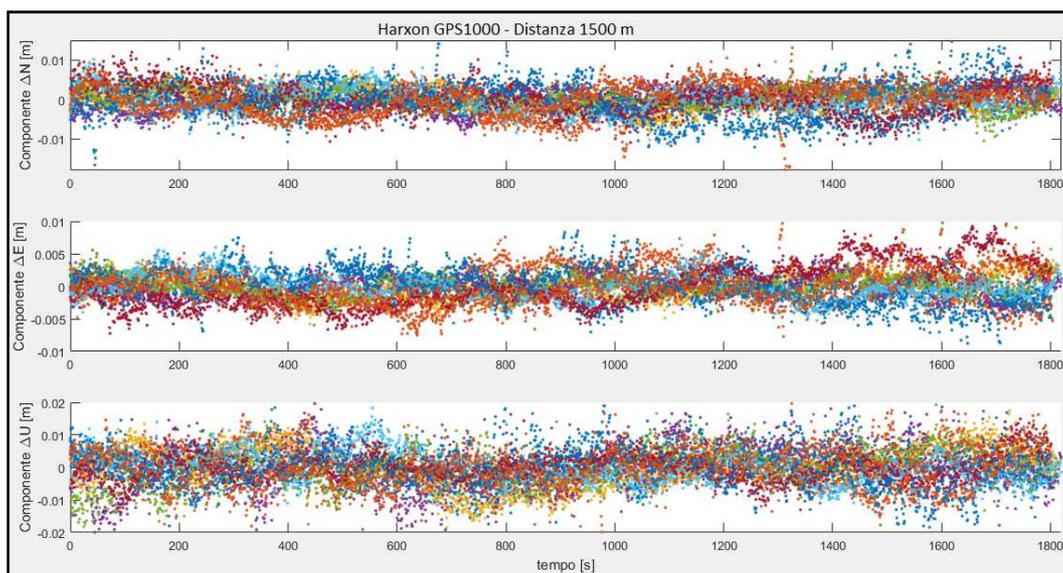
Figura 4.9: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 100 m



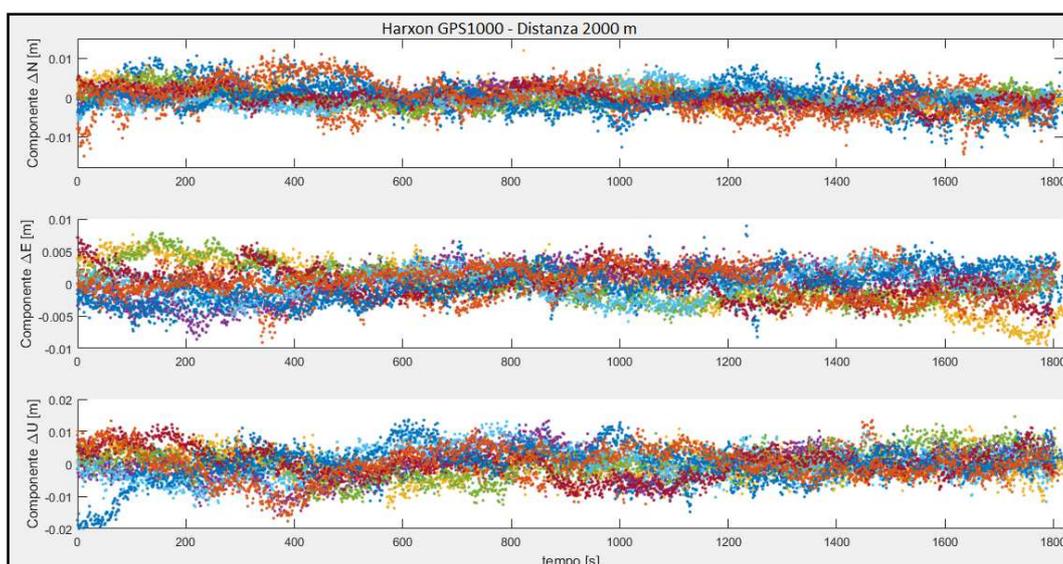
*Figura 4.10: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 500 m*



*Figura 4.11: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 1000 m*



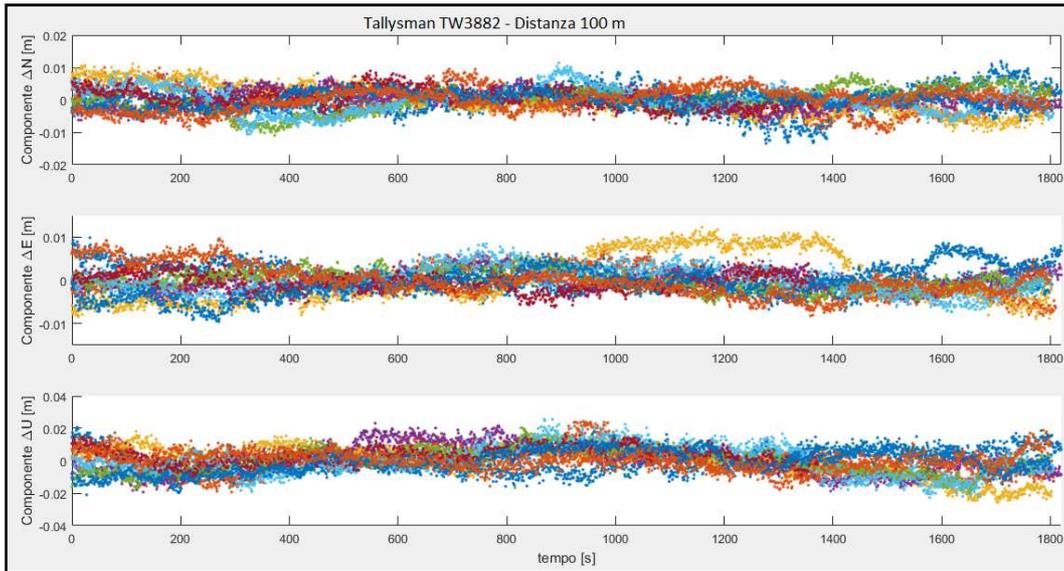
*Figura 4.12: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 1500 m*



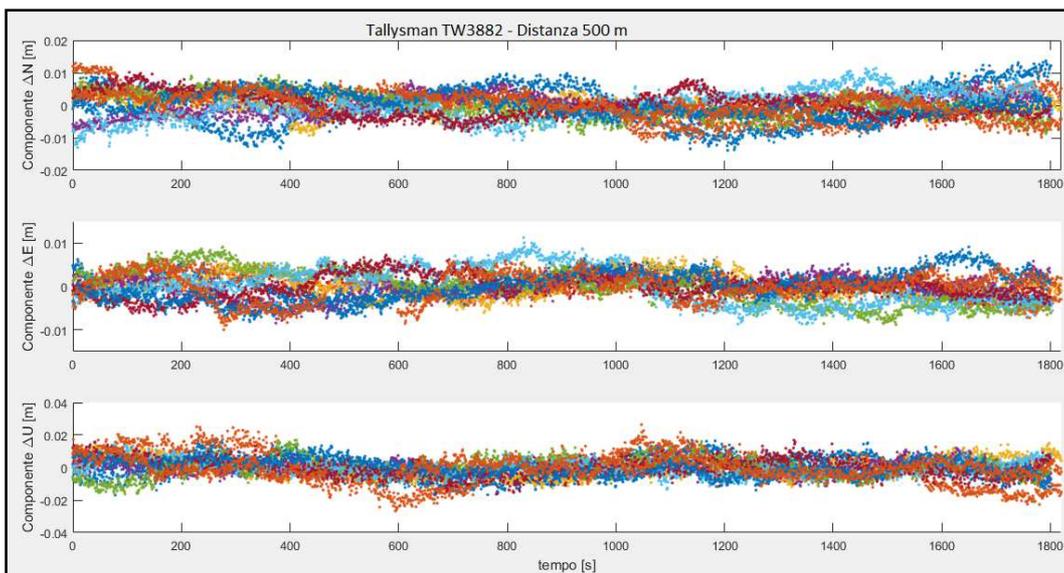
*Figura 4.13: Sovrapposizione serie temporali con Harxon GPS1000 a distanza 2000 m*

I test condotti a distanza variabile tra 100 m e 2000 m con antenna Harxon GPS1000 hanno restituito serie temporali caratterizzate da una dispersione di ordine centimetrico, sia nelle componenti planimetriche sia nella componente altimetrica, seppur quest'ultima di maggiore entità.

Si può osservare dalla sovrapposizione dei test la stabilità delle soluzioni, nonostante sia stato assunto un piccolo intervallo di acquisizione, sia che si tratti di piccole distanze sia per distanze superiori al chilometro.



*Figura 4.14: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 100 m*



*Figura 4.15: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 500 m*

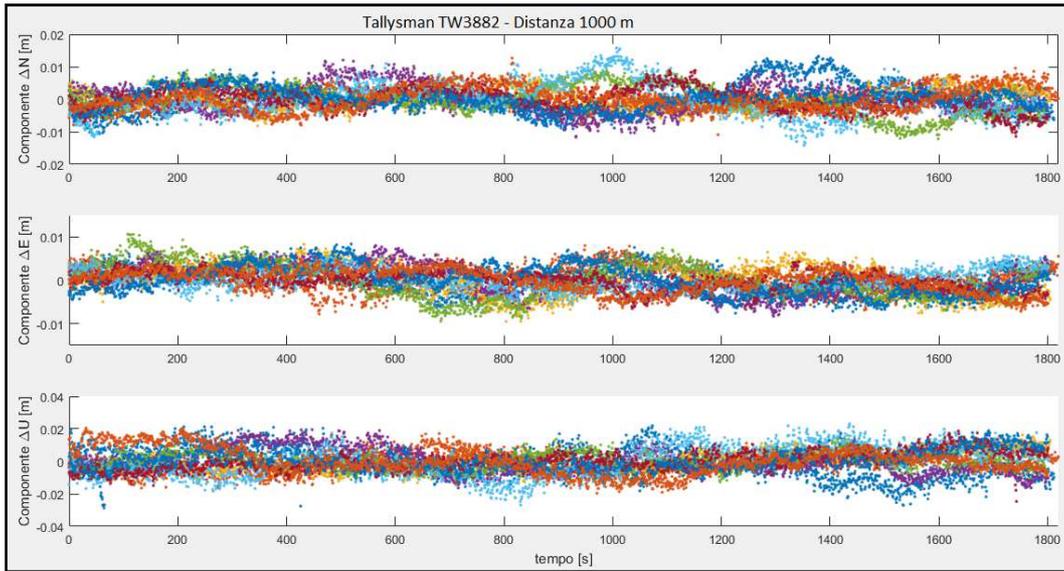


Figura 4.16: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 1000 m

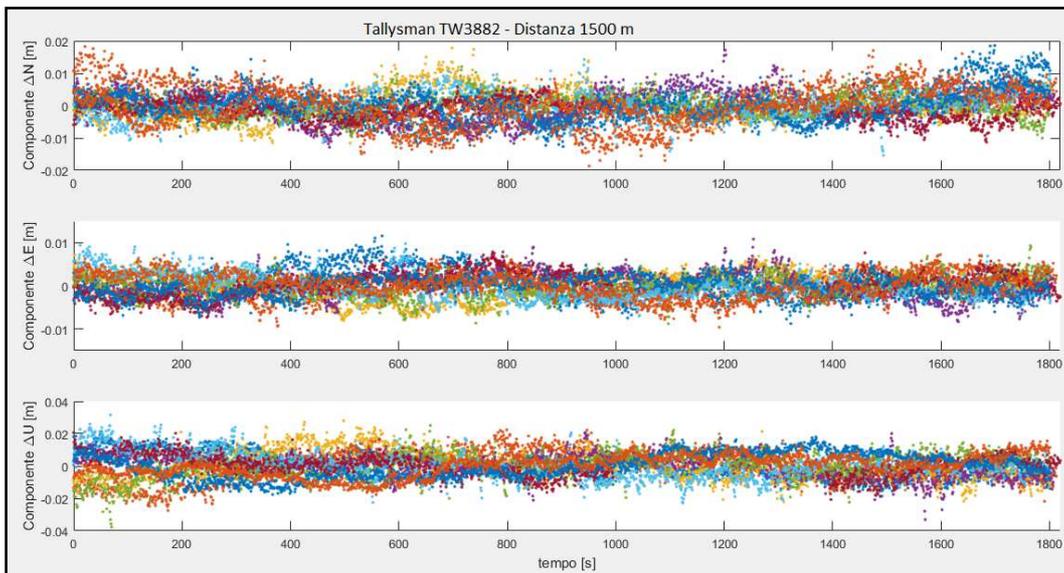


Figura 4.17: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 1500 m

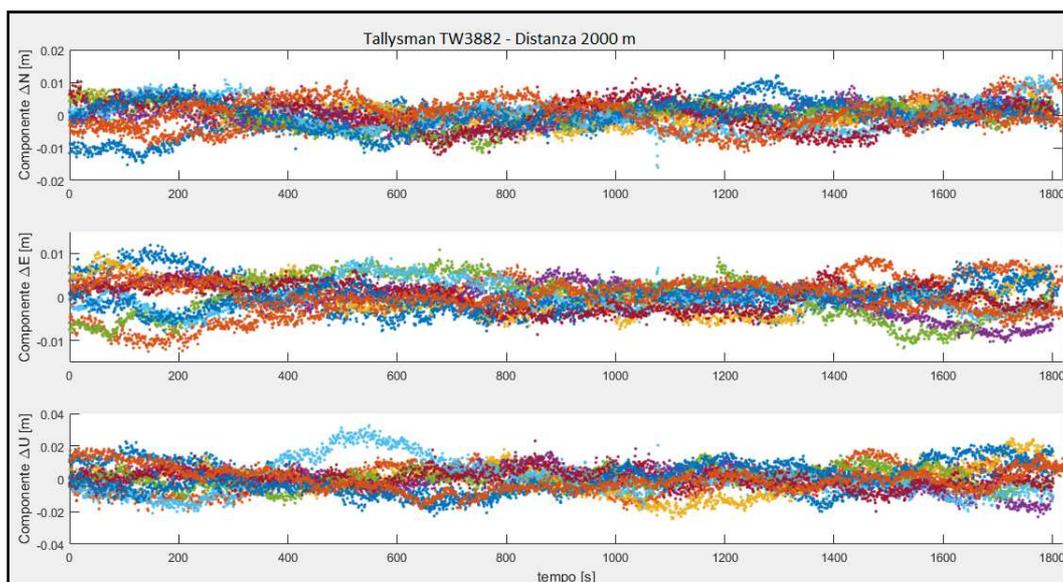


Figura 4.18: Sovrapposizione serie temporali con Tallysman TW3882 a distanza 2000 m

I test condotti a distanza variabile tra 100 m e 2000 m con antenna Tallysman TW3882 hanno restituito serie temporali con dispersione maggiore in tutte le componenti rispetto all'antenna Harxon GPS1000. Dalle figure precedenti è possibile osservare che gli le serie temporali presentano più volte evidenti andamenti distanti dalla coordinata reale.

### 4.3 Risultati su precisioni e tempo di fissaggio dell'ambiguità di fase

I risultati ottenuti dalla sperimentazione, sono riportati in *Tabella 15* e *16* al variare della distanza in cui è stata posizionata la stazione *Rover*.

Il lavoro era principalmente indirizzato alla valutazione dell'uso di queste tecnologie per uso di monitoraggio. In tale contesto, risulta quindi fondamentale valutare non tanto le soluzioni in termini di accuratezza, ma in termini di ripetibilità espresse in termini di deviazioni standard.

In *Tabella 15* e *16* sono riportati i valori delle deviazioni standard (espressi in mm) ottenuti dai test in campagna per l'antenna Harxon GPS1000 e per l'antenna Tallysman TW3882, nelle componenti locali N, E, U:

| Distanza [m] | $\sigma_N$ [mm] | $\sigma_E$ [mm] | $\sigma_U$ [mm] |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>100</b>   | 2.2             | 1.8             | 4.7             |
| <b>500</b>   | 2.6             | 1.6             | 4.7             |
| <b>1000</b>  | 2.2             | 1.7             | 4.5             |
| <b>1500</b>  | 3.3             | 2.3             | 5.6             |
| <b>2000</b>  | 2.9             | 2.5             | 4.7             |

Tabella 15: Deviazioni standard al variare della distanza con antenna Harxon GPS1000

In generale, i valori di deviazione standard calcolati hanno mostrato una stabilità ed affidabilità maggiore nelle componenti planimetriche N, E rispetto alla componente altimetrica U. Inoltre, la componente Est è risultata quella più precisa per ogni punto.

I valori di deviazione standard non aumentano all'aumentare della distanza: per la distanza di 1000 m si riscontra un miglioramento della soluzione in componenti N, U, ma non in componente E, rispetto ai 500 m. I valori più elevati di deviazione standard in componente Nord ed Up sono stati quelli corrispondenti ai 1500 m; mentre, per la componente Est il risultato peggiore è stato ottenuto alla distanza di 2000 m.

| Distanza [m] | $\sigma_N$ [mm] | $\sigma_E$ [mm] | $\sigma_U$ [mm] |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>100</b>   | 3.4             | 3.1             | 7.8             |
| <b>500</b>   | 3.9             | 3.0             | 5.9             |
| <b>1000</b>  | 3.7             | 2.9             | 7.0             |
| <b>1500</b>  | 4.5             | 2.7             | 7.6             |
| <b>2000</b>  | 4.0             | 3.6             | 7.7             |

Tabella 16: Deviazioni standard al variare della distanza con antenna Tallysman TW3882

Anche per l'antenna Tallysman TW3882 si può notare che le soluzioni hanno mostrato una stabilità ed affidabilità maggiore nelle componenti planimetriche N, E rispetto alla componente altimetrica U.

Dai risultati ottenuti si può osservare come l'antenna HarxonGPS1000 si comporti meglio rispetto all'antenna Tallysman TW3882.

In entrambi i casi, la componente Nord presenta una deviazione standard più elevata (seppur di poco) rispetto alla componente Est. Ciò probabilmente può essere dovuto alle posizioni sfavorevoli assunte dal ricevitore.

In conclusione, è possibile affermare che la distanza a questo livello di analisi è risultata una variabile poco incisiva.

L'andamento della precisione raggiungibile nelle tre componenti locali al variare della distanza dalla stazione Master è mostrato in figura 4.19 e 4.20:

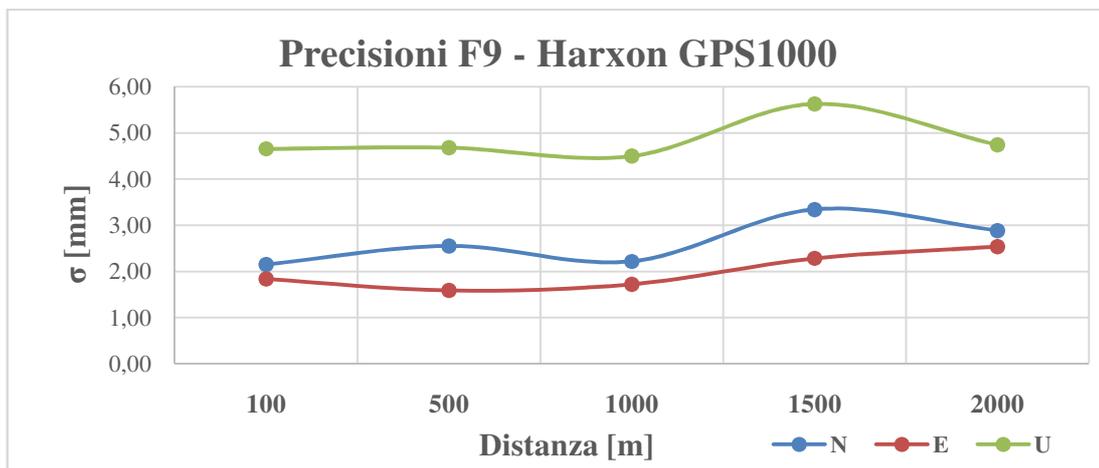


Figura 4.19: Errore quadratico medio al variare della distanza (Harxon+F9P)

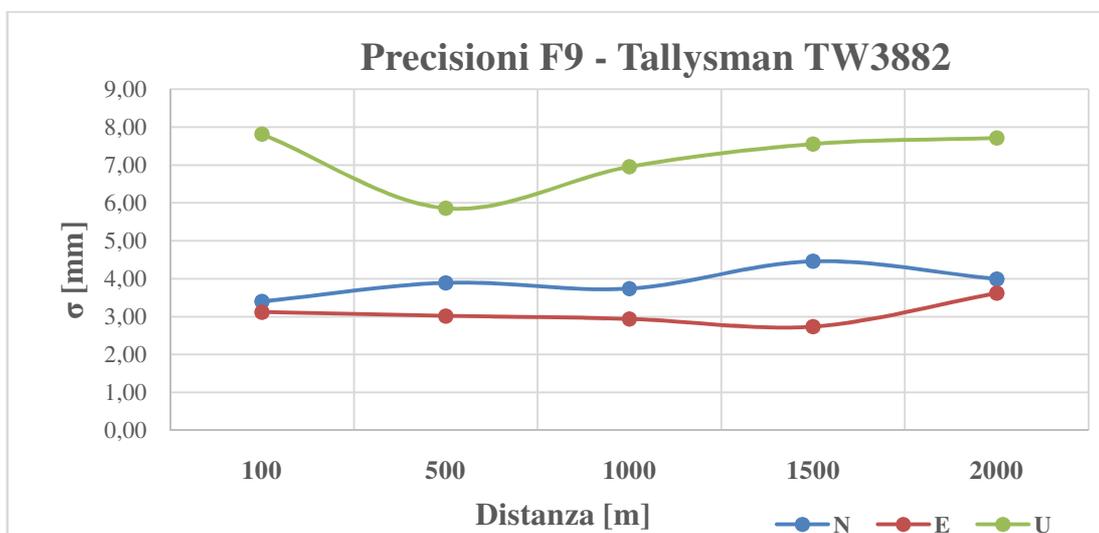


Figura 4.20: Errore quadratico medio al variare della distanza (Tallysman+F9P)

Per quanto concerne i tempi di fissaggio dell'ambiguità di fase, questi sono stati calcolati come media delle 10 misure eseguite per ognuna delle distanze esaminate.

I risultati ottenuti sono stati raggruppati in *Tabella 17* e messi a confronto in base al modello di antenna utilizzato:

| Distanza<br>[m] | Tempo di fix [s] |                  |
|-----------------|------------------|------------------|
|                 | Harxon GPS1000   | Tallysman TW3882 |
| <b>100</b>      | 32.6             | 37.3             |
| <b>500</b>      | 33.2             | 39.7             |
| <b>1000</b>     | 30.2             | 39.5             |
| <b>1500</b>     | 31.0             | 37.4             |
| <b>2000</b>     | 34.5             | 35.4             |

Tabella 17: Tempi di fissaggio dell'ambiguità di fase a confronto

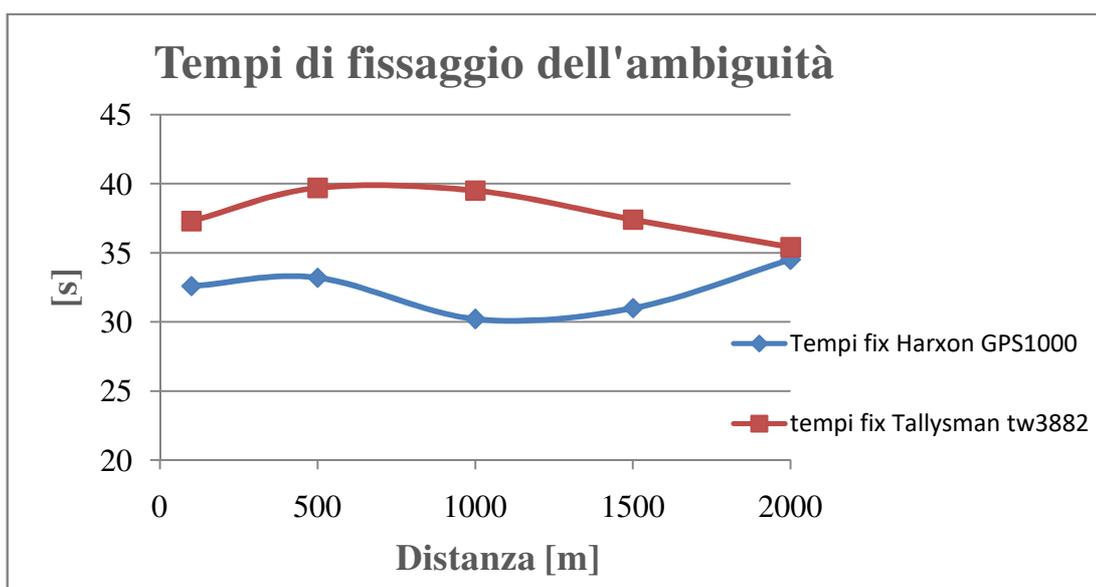


Figura 4.21: Andamento tempi di fix all'aumentare della distanza

Dalla Tabella 17 e dalla figura 4.21 si può osservare che la media generale dei tempi di fissaggio è risultata inferiore a 40 s.

È possibile affermare che le strumentazioni esaminate, viste le precisioni elevate raggiunte, hanno mostrato la loro idoneità ai fini del monitoraggio del territorio e di essere in grado di rilevare spostamenti di piccola entità.

#### 4.4 Test di calibrazione degli strumenti con slitta micrometrica

La sperimentazione condotta non si è basata solo sulla determinazione della ripetibilità delle soluzioni, ma anche sulla valutazione della sensibilità degli strumenti, tramite l'imposizione di spostamenti calibrati nelle tre direzioni N, E, U mediante slitta micrometrica.

La slitta adottata per l'esecuzione del test è dotata di viti micrometriche, tramite le quali è stato imposto uno spostamento pari ad 1 centimetro nelle componenti planimetriche N, E e pari a 2 centimetri in componente altimetrica U, con intervalli di circa 2 minuti, l'uno dall'altro; a conclusione della prova tutti gli spostamenti sono stati riportati a zero.



Figura 4.22: Test di calibrazione con slitta micrometrica

In figura 4.22 è mostrato l'andamento delle serie temporali nelle componenti geodetiche locali relative al test di calibrazione eseguito, dove le rette rosse indicano l'epoca in cui è stata effettuata l'imposizione degli spostamenti:

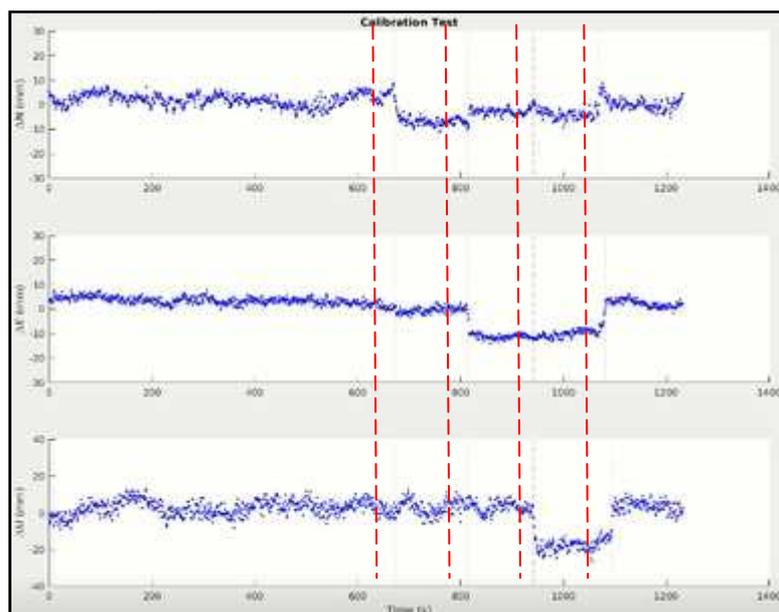


Figura 4.23: Calibration Test antenna Harxon GPS1000

A seguito di questo test, è possibile affermare che sono stati confermati i risultati ottenuti durante le misure in campagna e dunque, è possibile rilevare spostamenti di ordine centimetrico.

## *Conclusioni*

Come si evince dal titolo, il lavoro svolto in questa tesi è stato finalizzato alla valutazione dell'impatto che le differenti costellazioni possono avere nella determinazione della posizione di un qualsiasi punto

Lo studio è stato condotto al fine di conferire informazioni in merito alle precisioni ed alle accuratezze raggiungibili dalle costellazioni satellitari, prese singolarmente e simultaneamente.

I risultati ottenuti dalle elaborazioni sono stati molteplici. Risultato evidente è che la costellazione cinese Beidou non restituisce una ripetibilità comparabile con le altre costellazioni, con conseguente stima approssimativa della posizione. Per quanto concerne la costellazione europea Galileo, le precisioni sono risultate dello stesso ordine di grandezza delle costellazioni statunitense e russa.

Dai test condotti, le soluzioni con la multiconstellazione non sono state le migliori; presumibilmente, le soluzioni sono state perturbate dalla presenza della costellazione cinese Beidou. Inoltre, va sottolineato che le costellazioni Galileo e Beidou allo stato dell'arte non sono ancora giunte a completamento; pertanto, è possibile supporre che, a completamento avvenuto, la multiconstellazione potrà essere considerata la scelta preferenziale per il posizionamento di elevata precisione.

L'altro aspetto indagato ha riguardato la valutazione della ripetibilità delle soluzioni e dei tempi di fissaggio dell'ambiguità di fase ottenibili con strumentazione a basso costo, in modalità RTK e tempi di acquisizione limitati a 30 minuti. Dai risultati ottenuti, è possibile affermare che la strumentazione low-cost impiegata è in grado di rilevare spostamenti di ordine centimetrico.

## **Bibliografia**

- Prof. S. Gandolfi, *Dispense del Corso di Controllo e collaudo delle strutture e del territorio M*, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
  
- Prof. L. Vittuari, *Dispense del Corso di Topografia T*, Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile
  
- Alberto Cina 2014, *Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System). Per la Geomatica*
  
- European GNSS (Galileo) OPEN SERVICE, Signal-In-Space Interface Control Document, European Union, 2015
  
- Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, Global Positioning System Directorate(2013)
  
- GLONASS Interface Control Document, Edition 5.1, Mosca (2008)
  
- BeiDou Navigation Satellite System, Signal In Space Interface Control Document, China Satellite Navigation Office, 2013
  
- Leica Infinity Help*, versione 3.1 Italiano
  
- Stazioni permanenti *EUREF Permanent Network*, equipaggiamento e posizione [http://www.epncb.oma.be/\\_networkdata/stationlist.php](http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php)
  
- Cina A., Piras M. (2015), *Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results.*
  
- Descrizione *ublox F9P*:  
<https://www.u-blox.com/en/product/>
  
- Descrizione antenna *Harxon GPS1000*:  
<https://en.harxon.com/products-detail.php>
  
- Descrizione antenna *Tallysman TW3882*:  
<https://www.tallysman.com/product/tw3882-dual-band-gnss-antenna/>

## **Ringraziamenti**

*Probabilmente sarò anticonvenzionale nel riportare i ringraziamenti, ma questo ha un senso che solo in pochi potranno capire.*

*Innanzitutto, vorrei ringraziare me stessa, perché sono io che ho fatto gli esami, che ho passato giorni (e notti) sui libri per portare a casa dei CFU, che ho deciso di portare a compimento il mio grande sogno, quando tra un lavoro e l'altro trovavo magicamente il tempo di studiare.*

*Ringrazio la mia determinazione e la mia forza di volontà, perché non mi hanno mai abbandonata.*

*Ringrazio tutte le volte che ho pensato di mollare, perché è grazie a tutte quelle volte che non l'ho mai realmente fatto.*

*Ringrazio di non averci mai creduto fino in fondo, anche se posso ufficialmente dire che ogni tanto i sogni possono avverarsi.*

*Ringrazio la mia passione per i ponti, nota a tutti dal giorno dei giorni, che mi ha portata fino a qui.*

*Ringrazio anche tutti gli ostacoli e le sfide degli ultimi anni, perché solo così sono diventata una donna forte.*

*Ringrazio tutti quelli che non ci hanno creduto e che non sono rimasti, perché è grazie a loro se sono arrivata qui.*

*Ringrazio la fede, che è stata fondamentale nei miei momenti bui di smarrimento e non mi ha mai lasciata da sola.*

*Ringrazio il mio migliore amico Alessio, l'unico capace di calmarmi quando l'ansia prendeva il sopravvento a qualsiasi ora del giorno e della notte e l'unico a crederci sin dal primo giorno.*

*Ringrazio nonna Adelia, che con un sorriso è stata sempre capace di cambiarmi l'umore.*

*Ringrazio la mia famiglia per l'amore donatomi nei piccoli gesti quotidiani, anche nei momenti più delicati.*

*Ringrazio Federico per tutta la pazienza avuta nelle mie scelte folli e per aver imparato ad amare l'ingegneria di 'MegaCostruzioni' pur di vedermi felice.*

*Ringrazio Emanuele per avermi sopportata negli ultimi mesi con tutte le mie lamentele lungo i corridoi della facoltà.*

*Ringrazio Marco, che seppur lontano km, è stato fonte inesauribile di consigli per far funzionare ogni warning di Matlab.*

*Ringrazio Giuli, l'unica vera amica conosciuta tra i banchi di ingegneria e l'unica che è sempre riuscita a riportarmi sulla via nei momenti di disordine.*

*Ringrazio i miei amici per le serate di 'Hakunamatata' regalatemi, per non essere scappati quando la parlantina prendeva il sopravvento e per essere qui di fianco a me oggi.*

*Infine, ringrazio il Prof. Stefano Gandolfi e l'Ing. Luca Poluzzi per avermi sostenuta ed aiutata con indicazioni e correzioni preziose a portare a termine questo lavoro.*

*Noemi*