

Campo di velocità europeo dedotto da misure GPS

Andrea Nardo

31 luglio 2008

Indice

Introduzione	3
Sintesi	5
Abstract	11
1 Il segnale del satellite	15
1.0.1 Struttura del segnale	15
1.0.2 Elaborazione del segnale	17
2 Osservabili	21
2.1 Acquisizione	21
2.1.1 Pseudorange dedotte dal codice	21
2.1.2 Pseudorange dedotte dalla fase	22
2.1.3 Osservabile Doppler	23
2.1.4 Rumore e biases	24
2.2 Combinazioni di osservabili	25
2.2.1 Combinazioni lineari di osservabili di fase	25
2.2.2 Combinazioni di osservabili di fase e di codice	26
2.3 Effetti atmosferici	27
2.3.1 Velocità di fase e di gruppo	27
2.3.2 Rifrazione ionosferica	28
2.3.3 Rifrazione troposferica	33
2.3.4 Multipath	38
3 Modelli matematici per il posizionamento	41
3.1 Point positioning	41
3.1.1 Point positioning mediante l'osservabile di codice	41
3.1.2 Point positioning mediante osservazioni di fase	42
3.1.3 Posizionamento relativo	43
3.1.4 Correlazioni tra le combinazioni di fase	46

4	Stima dei parametri	51
4.0.5	Stima ai minimi quadrati	51
4.0.6	Linearizzazione	52
4.0.7	Modello linearizzato per il posizionamento puntuale con misure di codice	53
4.0.8	Modello linearizzato di posizionamento puntuale per mezzo di misure di fase	54
4.0.9	Modello linearizzato per il posizionamento relativo	56
5	Combinazione delle equazioni normali	59
5.1	Introduzione	59
5.2	Il modello di Gauss-Markoff	59
5.2.1	Metodo dei minimi quadrati	60
5.2.2	Linearizzazione	61
5.3	Il modello di Gauss-Markoff con vincoli sui parametri.	62
5.3.1	Minimi quadrati vincolati	62
5.4	Pre eliminazione dei parametri	63
5.5	Combinazione delle equazioni normali	64
5.5.1	Stima batch	65
5.5.2	Stima sequenziale	65
5.6	Trasformazione dei parametri.	66
5.7	Introduzione di parametri addizionali	67
5.8	Sistemi di equazioni normali vincolati	68
5.9	Applicazione	70
5.9.1	Un semplice modello di osservabile	70
5.9.2	Modello di osservabile basato su una trasformazione di similitudine	72
5.9.3	Vincoli	75
5.9.4	Vincoli interni	77
6	Reti GPS	79
6.1	Introduzione	79
6.2	Le linee guida EUREF per i LACs	79
6.3	L'attività del Local Analysis Center UPA	80
6.3.1	Software utilizzato	80
6.3.2	L'organizzazione dei dati in campagne	81
6.3.3	La creazione di una campagna	82
6.4	La procedura di elaborazione	83
6.4.1	Variabili d'ambiente	84
6.4.2	Opzioni di elaborazione	84
6.4.3	Scripts di attivazione	84
6.4.4	Controllo della CPU	84
6.4.5	La definizione della sequenza di elaborazione	84

6.5	Le strategie di elaborazione utilizzate da UPA LAC	85
6.5.1	Strategia per il posizionamento puntuale (Point Positioning)	86
6.5.2	Strategia per l'elaborazione con le doppie differenze.	92
6.5.3	Combinazione delle soluzioni giornaliere.	97
6.5.4	Calcolo del ritardo troposferico zenitale.	97
7	Riproccamento CEGRN	99
7.1	Introduzione.	99
7.2	Descrizione delle campagne.	99
7.3	Linee guida del riproccamento	100
7.3.1	Descrizione dell'elaborazione giornaliera	101
7.4	Stacking delle equazioni normali di campagna	102
7.4.1	Grafici dei parametri di Helmert	107
7.5	Soluzione multi-anno	119
7.5.1	Controllo della consistenza della soluzione multianno.	122
7.5.2	Confronto con le velocità EPN	123
7.5.3	Raffigurazione del campo di velocità CEGRN.	124
8	Determinazione del campo di velocità	127
8.1	Introduzione	127
8.2	Combinazione delle eq. normali della rete EUREF	127
8.2.1	Definizione del sistema di riferimento	127
8.2.2	Correzione delle discontinuità	132
8.2.3	Tabella delle discontinuità.	138
8.2.4	Il campo di velocità nel riferimento ITRF00	148
9	Infittimento del campo di velocità	161
9.1	Introduzione	161
9.2	Descrizione della strategia di combinazione	162
9.2.1	La definizione del sistema di riferimento	162
9.2.2	Software di combinazione	162
9.2.3	Classificazione dei vincoli.	162
9.2.4	Rimozione e imposizione di nuovi vincoli.	163
9.2.5	Vincoli relativi tra le velocità	164
9.2.6	Stima dei pesi relativi alle soluzioni individuali	164
9.2.7	Stima statistica della qualità della combinazione	165
9.2.8	Sull'utilizzo dei vincoli interni	165
9.3	Pre-processamento delle equazioni normali	165
9.3.1	Soluzioni preliminari multianno	166
9.3.2	Combinazione preliminare EUREF	167
9.3.3	Combinazione preliminare GP	181
9.3.4	Combinazione preliminare UPA	191
9.3.5	Soluzioni settimanali combinate	200
9.4	Soluzione multianno definitiva	201

9.4.1	Realizzazione del sistema di riferimento	201
9.4.2	Campo di velocità combinato in ITRF2005.	203
9.4.3	Effetto del termine annuale.	223
9.4.4	Trasformazione ITRF2005 - ETRF	230
9.4.5	Campo di velocità ETRF	230
9.5	Conclusioni	242
10	Campo di velocità CEGRN	245
10.1	Introduzione.	245
10.2	Descrizione della strategia di combinazione	245
10.2.1	Consistenza della soluzione CEGRN	246
10.3	Campo di velocità combinato	248
11	Interpolazione del campo di velocità.	249
11.1	Introduzione.	249
11.2	Algoritmo di interpolazione	249
11.2.1	Descrizione dell'algoritmo	249
11.2.2	Collocazione con errori casuali	252
11.2.3	Applicazione dell'algoritmo al campo di velocità	253
11.2.4	Matrice di covarianza del noise per un campo di velocità orizzontale.	254
11.2.5	Scalatura della matrice di covarianza del noise	254
11.2.6	Funzione di covarianza	255
11.2.7	Caratteristiche del campo di velocità	255
11.2.8	Varianza e covarianza empiriche	256
11.2.9	Determinazione della funzione di covarianza	257
12	Calcolo del tasso di deformazione	263
12.1	Introduzione	263
12.2	Il tasso di deformazione	263
12.3	Calcolo del tensore del tasso di deformazione: approccio discreto	264
12.4	Calcolo del gradiente del campo	265
12.4.1	Legame tra tensore di deformazione e gradiente del campo	265
12.4.2	Calcolo delle derivate parziali della matrice di covarianza	266
12.4.3	Calcolo dell'errore associato alle componenti del tensore del tasso di deformazione	268
12.4.4	Calcolo degli errori associati al tensore del tasso di deformazione diagonalizzato	269
12.5	Applicazione al campo di velocità combinato.	269
12.5.1	Regione considerata	270
12.5.2	Caratteristiche del campo approssimato	270
12.5.3	Tasso di deformazione nella regione mediterranea.	270
	Conclusioni	277

A Scripts	279
A.1 Driver per il download dei dati e il pre-processing dei files	279
A.2 Modulo chiamato dal driver	282
A.3 Script di comando per il quality checking dei files RINEX	304
A.4 Script perl l'interrogazione del server ftp igsch	305
A.5 Script per l'elaborazione automatica settimanale	307
A.6 Script per il trasferimento dei files SINEX al server FTP del BKG . .	311
A.7 Script per l'estrazione del bollettino settimanale	312
A.8 Modulo per l'int. del campo e il calcolo del t. di def.	315
B Process Control Files	365
B.1 PPP	365
B.2 RNX2SNX	367
C Elenco delle discontinuità e degli outliers	371

Introduzione

L'oggetto di questa tesi è l'applicazione della tecnologia GPS alla conoscenza delle deformazioni della crosta terrestre, allo scopo di poter utilizzare i dati ricavati da un insieme di stazioni GPS per una migliore comprensione dei fenomeni sismici. Questo progetto viene affrontato su diversi livelli, dal processamento settimanale dei dati alla combinazione delle equazioni normali al fine di determinare il campo di velocità per risalire al campo di deformazione della crosta terrestre.

Per quanto riguarda il processamento ci avvaliamo dell'esperienza ottenuta come Local Analysis Centre per la rete geodetica europea EUREF (il consorzio che mantiene aggiornato il sistema ITRF nella regione europea). In questo contesto ci occupiamo di elaborare i dati giornalieri di un cluster di 34 stazioni fisse GPS appartenenti alla rete EUREF. Oltre a questa attività effettuiamo per i nostri studi anche il processamento settimanale di un insieme di 54 stazioni, non tutte appartenenti alla rete EUREF e disposte sul territorio italiano ed austriaco. A questi due insiemi di stazioni corrispondono anche differenti scopi: per le stazioni EUREF l'obiettivo è quello di produrre, ogni settimana e partendo dai dati grezzi, le equazioni normali settimanali e le correzioni troposferiche giornaliere (calcolate tenendo fisse le coordinate delle stazioni ai loro valori medi settimanali); queste soluzioni sono poi inviate al Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) di Francoforte per la combinazione con le equazioni normali prodotte dai restanti 15 LACs.

I dati relativi alla rete non EUREF vengono da noi utilizzati per densificare quelli della rete EUREF con stazioni di qualità comparabile per poter studiare con maggiore dettaglio le deformazioni superficiali della crosta terrestre nelle regioni italiane ed austriache.

Per entrambe le reti il dato grezzo è costituito da misure GPS (di fase e di codice), con frequenza di trenta secondi, immagazzinate in files ASCII formattati secondo uno specifico standard internazionale (RINEX); tramite tale formato le osservazioni GPS vengono rese indipendenti dall'hardware che le ha generate. I dati che noi utilizziamo, relativi alla rete EUREF si trovano immagazzinati in 10 servers ftp europei, detti data centers, mentre per i dati non EUREF ricorriamo a server locali oppure prendiamo contatto con i gestori delle stazioni per approntare procedure batch per il trasferimento automatico dei dati sul nostro server FTP. Il download e la creazione dell'ambiente necessario all'elaborazione dei dati (cioè il setup e l'attivazione in sequenza di tutti i programmi dedicati all'elaborazione) vengono effettuati attraverso scripts PERL appositamente scritti.

Sintesi

Il processamento dei dati viene effettuato dal software **Bernese 5**, tale software dispone di due modalità di funzionamento: una interattiva e d una automatica, governata dal *Bernese Processing Engine* (BPE). L'utilizzo di Bernese in modalità automatica è assolutamente necessario per rendere efficiente e rigoroso l'elaborazione dei dati. La strategia di elaborazione è determinata da due enti: una sequenza di attivazione dei programmi di processamento (che si concretizza in un file ASCII detto Process Control File, PCF) ed un insieme di parametri (opzioni) dati in input ad ogni programma che compone la sequenza di elaborazione. In sostanza l'elaborazione è definita da un PCF che attiva in una sequenza ordinata vari scripts PERL, che a loro volta chiamano i programmi di basso livello, i cui argomenti sono specificati in appositi files di testo associati agli scripts PERL.

La versione 5 di Bernese viene fornita con i PCF e gli scripts PERL necessari all'elaborazione giornaliera di una reti di stazioni GPS. Tali files sono chiamati PPP e RNX2SNX: il primo effettua una stima preliminare delle coordinate a livello centimetrico, utilizzando osservazioni non differenziate, e genera files contenenti informazioni ausiliarie necessarie al corretto funzionamento del secondo PCF. Il secondo PCF è quello che effettivamente converte l'informazione contenuta nelle osservazioni nella stima delle coordinate e dei parametri di correzione troposferica. Il prodotto finale di RNX2SNX sono la matrice di covarianza relativa alle coordinate medie settimanali e le matrici di covarianza associate alle correzioni troposferiche giornaliere, sotto forma di otto files ASCII con formattazione particolare (formato SINEX). La strategia di elaborazione definita da RNX2SNX permette di 1) rigettare i RINEX che contengono gaps o residui troppo grandi, 2) determinare le ambiguità intere attraverso la strategia QIF, 3) calcolare una soluzione per le coordinate delle stazioni, vincolando il sistema di riferimento a quello ITRF2000 (ora ITRF2005) tramite un insieme di stazioni fiduciarie. Una volta prodotte le soluzioni giornaliere le equazioni normali associate vengo combinate mediante il programma ADDNEQ2 allo scopo di ottenere una soluzione settimanale. Infine, ottenuta la stima delle coordinate medie settimanale, queste stesse coordinate vengono utilizzate, fissandole, nella stima delle correzioni troposferiche giornaliere.

Per la determinazione del campo di velocità europeo affrontiamo il problema della combinazione multianno delle equazioni normali settimanali. In primo luogo viene affrontato il problema della combinazione delle equazioni settimanali della rete EUREF; la risoluzione di questo problema consiste nella determinazione di tutte le disconti-

nuità e gli outliers presenti nelle serie storiche delle stazioni EUREF, e nell'editing di un apposito file di input (file .STA) per il programma ADDNEQ2 che contenga le informazioni necessarie ad eliminare le discontinuità e gli outliers. Una volta ottenute delle serie storiche continue si può passare alla determinazione del campo di velocità e al suo infittimento per la regione italiana e austriaca attraverso l'utilizzo dell'informazione contenuta nelle equazioni normali settimanali relative al secondo insieme di stazioni da noi processate.

La rete EUREF, essendo una rete cartografica, non può essere utilizzata per misure di deformazione crostale, in quanto la distanza media tra le stazioni che la costituiscono è troppo elevata. Essa è però necessaria per definire in modo rigoroso il sistema di riferimento: consente di allineare le soluzioni derivanti dai dati di reti locali ad un sistema di riferimento comune (nel caso in questione utilizziamo la realizzazione più recente del sistema di riferimento terrestre: l'ITRF2005). Ogni soluzione settimanale EUREF deve essere combinata con la relativa soluzione settimanale della rete locale utilizzata per densificare il campo. Le due reti locali che utilizziamo per densificare il campo di velocità coprono parte del territorio italiano e la totalità del territorio austriaco. Un primo tentativo di combinazione delle equazioni normali EUREF ha rivelato che il software ADDNEQ2 non è particolarmente efficiente e stabile per effettuare questo compito. Si è reso necessario perciò passare all'utilizzo del software di combinazione CATREF. La strategia di combinazione è costituita da quattro passi: 1) rimozione dei vincoli dalle equazioni normali EUREF, UPA, GP, 2) combinazione preliminare multianno di ogni rete per individuare outliers e discontinuità, 3) combinazione settimanale delle equazioni normali UPA e GP per allineare le soluzioni settimanali, 4) combinazione multianno delle equazioni normali risultanti. I vincoli sono presenti nei sistemi di equazioni normali prodotti dai software di stima per il seguente motivo: i sistemi di equazioni normali derivanti da osservabili GPS hanno un deficit di rango 7, dovuto al fatto che le osservabili GPS non sono sensibili a traslazioni, rotazioni e cambiamenti di scala del sistema di riferimento. Da ciò risulta l'impossibilità di invertire il sistema delle equazioni normali. Questo problema viene risolto imponendo delle condizioni aggiuntive al sistema, nella forma di equazioni algebriche (imposizioni di vincoli). Tali vincoli possono agire sulle coordinate o sui parametri di traslazione, rotazione e scala che definiscono la trasformazione tra due sistemi di riferimento. L'imposizione di vincoli a questo tipo di sistemi di equazioni normali è equivalente alla definizione di un sistema di riferimento. Il software CATREF permette di imporre i vincoli sui parametri di traslazione, rotazione e scala, minimizzando tali parametri rispetto ad un sistema di riferimento definito a priori (minimi vincoli). Le discontinuità presenti nelle serie storiche vengono corrette stimando due posizioni e due velocità per il sito la cui serie storica è discontinua, e vincolando le velocità del sito prima e dopo la discontinuità. Tale procedura di trattamento delle discontinuità è risultata essere la più rigorosa in quanto tentativi di stimare e correggere le discontinuità nella posizione effettuati con ADDNEQ2 hanno dato risultati variabili, dovuti alla natura variabile delle serie storiche (outliers, gaps e andamenti non lineari ostacolano la stima delle discontinuità).

La rimozione dei vincoli è un passaggio critico: se risolviamo ogni sistema di equazioni normali settimanali e calcoliamo lo scarto quadratico medio (pesato, wrms) dei residui postfit delle posizioni (tridimensionale, orizzontale e verticale) e rappresentiamo in un grafico le serie temporali risultanti, possiamo investigare sull'eventuale presenza di outliers e sulla correttezza del procedimento di rimozione dei vincoli.

A. Kenyeres¹ afferma che valori di wrms molto grandi, dell'ordine dei centimetri, indicano la presenza di outliers, mentre valori molto piccoli (1 mm per il wrms della componente verticale) indicano che in vincoli non sono stati rimossi correttamente. Per la combinazione multianno EUREF troviamo un wrms che varia tra 3.5 e 2 mm, per quella GP un wrms compreso tra 5 e 2 mm e per quella UPA tra 4.5 e 2 mm. Per tutte e tre le soluzioni il wrms verticale è superiore a 2 mm. Valori maggiori per i wrms di GP e UPA erano attesi in quanto i dati grezzi da cui sono stati ottenuti i sistemi di equazioni normali non sono sottoposti ad una procedura di controllo automatica, come quelli della rete EUREF. Questo fatto si rivela anche nelle serie storiche dei parametri di Helmert (i parametri di trasformazione) che rivelano il carattere flottante delle soluzioni GP ed UPA, dovuta al basso numero di stazioni utilizzate per definire il sistema di riferimento. Tuttavia, anche in presenza di tali limiti la combinazione settimanale con le soluzioni EUREF riesce a garantire l'allineamento delle soluzioni con il sistema di riferimento definito dai seguenti siti:

BRUS A 13101M004	JOZE A 12204M001	POTS A 14106M003	TRAB A 20808M001
GLSV A 12356M001	MASI A 31303M002	ZIMM A 14001M004	TRO1 A 10302M006
GRAS A 10002M006	METS A 10503S011	RABT A 35001M002	VILL A 13406M001
HOFN A 10204M002	NOT1 A 12717M004		

Come ulteriore conferma della correttezza della definizione del sistema di riferimento sono stati calcolati i residui tra le velocità dei siti comuni alla nostra soluzione e alla soluzione ITRF05. I siti in comune sono 29 i valori medi dei residui sono:

Est [mm/yr]	Nord [mm/yr]
-0.11	0.07

Il numero totale di siti di cui è stata stimata la velocità è 247. Per utilizzare i dati di velocità nello studio delle deformazioni crostali è necessario sottrarre il moto rigido della placca. Per sottrarre il moto rigido sono state utilizzate i parametri di trasformazione ITRF2005 - ETRF ([37]). In un secondo tempo abbiamo effettuato l'elaborazione di 9 campagne, a cadenza annuale e di 2 anni, relative alla rete GPS CEGRN (intervallo temporale 1994 – 2007), utilizzando orbite ed EOPs riprocessati [50], distribuita nell'Europa centro-orientale. Le equazioni normali di campagna, combinate con le corrispondenti prodotte da altri centri di analisi, sono state combinate con le rispettive soluzioni settimanali EGU, allo scopo di ottenere una nuova soluzione che rappresentasse un campo di velocità densificato adatto a descrivere la cinematica della crosta terrestre nella regione europea mediterranea e centro-orientale. Il numero

¹http://www.epncb.oma.be/_organisation/projects/series_sp/cumulative_solution.php

di siti la cui velocità è stata determinata è di 296. Il campo di velocità residuo evidenzia che la regione centroeuropea è essenzialmente rigida (velocità inferiori a 1 mm/yr) mentre la regione mediterranea è caratterizzata da valori più elevati (superiori a 2 mm/yr). Abbiamo infine verificato che l'intervallo minimo di tempo considerato (2.5 anni, vedi [47]) è sufficiente a mediare gli effetti del termine annuale presente nelle serie storiche di molti siti. L'effetto del termine annuale è di 0.01 mm/yr per la componente est, e di 0.06 mm/yr per la componente nord.

La strategia di combinazione (con CATREF) è pienamente descritta nel cap. 9. In tale capitolo vengono inoltre riportate le tabelle di discontinuità, grafici di wrms e parametri di Helmert, e valori di ampiezza e fase iniziale del termine annuale.

Il campo di velocità così determinato viene utilizzato per determinare il tasso di deformazione della crosta. Il tensore di deformazione (orizzontale) è una matrice di quattro elementi che sono funzioni delle posizione. Tali elementi si esprimono come combinazioni lineari delle derivate parziali del campo di velocità rispetto alle coordinate est e nord. Si ha infatti che tali elementi si scrivono come:

$$\begin{aligned}\epsilon_{ee} &= \frac{\partial \hat{v}^e}{\partial e} \\ \epsilon_{en} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \hat{v}^n}{\partial e} + \frac{\partial \hat{v}^e}{\partial n} \right) \\ \epsilon_{nn} &= \frac{\partial \hat{v}^n}{\partial n}.\end{aligned}$$

Le derivate del campo vengono approssimate analiticamente per mezzo di un algoritmo di minima varianza (algoritmo di collocazione). Si ipotizza che il valore che il campo assume nel punto di interpolazione dipenda dai valori misurati del campo, pesati secondo la distanza. La formula di interpolazione si scrive come (vedi [5]):

$$\hat{s} = C_{st} (C_{tt} + C_{nn})^{-1} l$$

dove \hat{s} è il valore del campo nel punto di interpolazione, l rappresenta i valori osservati del campo (centrato), C_{tt} è la matrice di covarianza tra i valori osservati del campo, C_{st} è la matrice di cross-covarianza tra i valori osservati e i valori interpolati e C_{nn} è la matrice di covarianza del noise (moltiplicata per un fattore 10 per compensare l'effetto di random e flicker noise). La funzione peso è detta funzione di covarianza, ed esprime la covarianza tra i valori che il campo assume in due punti diversi. Tale funzione è rappresentata dalla funzione di Cauchy:

$$C_{ij} = \frac{w}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right)^2}$$

dipendente da due parametri w (varianza del campo) e d_0 (distanza di correlazione). La distanza di correlazione viene stimata attraverso un fit del covariogramma. Tale distanza inoltre non deve essere inferiore alla spaziatura media tra i siti (teorema del

campionamento), altrimenti l'interpolazione non fornisce risultati corretti. Il fit del covariogramma empirico porta ad assegnare alla lunghezza di correlazione il valore di 105 Km. Tale valore risulta inferiore di $\frac{1}{3}$ rispetto ai valori riportati nei lavori [49], [34], [33] e [36]. Per derivazione è possibile calcolare il tasso di deformazione. Il tensore del tasso di deformazione è stato calcolato derivando rispetto alle direzioni nord ed est l'approssimazione analitica sopra citata. I valori del tensore del tasso di deformazione così calcolato sono risultati essere in accordo con quelli determinati da [16]. Le alpi sudorientali mostrano un tasso di deformazione di $10 \div 15$ nstrain/yr, l'Italia centrale è caratterizzata da un tasso di estensione di circa 25 nstrain/yr, in direzione ortogonale alla catena apenninica. La Sardegna e la Corsica non rivelano tassi di deformazione apprezzabili. In generale l'accordo tra i valori del tasso di deformazione calcolati da noi e [16] è migliore nelle zone di maggior densità di siti. I risultati sono compatibili e tale fatto è di notevole importanza in quanto le due analisi differiscono per configurazione delle reti, software di elaborazione, software di combinazione e metodo di calcolo del tasso di deformazione. I risultati differiscono notevolmente solo per il distretto calabrese a causa scarsità di siti appartenenti a quell'area nella nostra soluzione. Infine, il buon accordo tra le due analisi rappresenta una conferma del valore della lunghezza di correlazione.

Poichè non era disponibile alcun programma per l'interpolazione del campo e il calcolo del tasso di deformazione, si è reso necessario implementare l'algoritmo di collocazione in un modulo python (riportato in appendice A.8).

Abstract

The aim of this thesis is the application of the GPS technology to the investigation of crustal deformations, in order to exploit data from a GPS network to improve the knowledge of seismic phenomena. We attack this problem at different levels: from weekly GPS data processing to normal equations stacking, in order to compute the velocity field and the deformations field of the crust.

As a EUREF LAC (Local Analysis Centre) we carry out the weekly processing following the EUREF guidelines: we process data from a cluster of 34 stations. Besides this, we process data from another (non EUREF) cluster of stations, deployed on the Italian and Austrian regions. The aim of this second processing activity is to densify the EUREF network using stations whose quality is comparable to the EUREF stations. For both of the networks raw data are made up of daily phase and code measurements, at 30 seconds sampled, stored as RINEX observation files. We download these data every week, using PERL scripts to automate the procedure. The data processing is also done in an automatic way, through Bernese 5 and the Bernese Processing Engine. To produce daily normal equations and coordinates estimates we use the processing strategy defined by RNX2SNX PCF. This Process Control File is made of a list of statements activating the Bernese programs; the main features of this procedure are 1) Rejecting of RINEX containing large gaps or big residuals, 2) Ambiguity resolution through quasi-ionosphere-free strategy, 3) alignment of the network to the ITRF2000 (ITRF2005, now) using a set of fiducial stations.

Weekly coordinates are estimated by stacking the daily normal equations; daily tropospheric delays are estimated by fixing the coordinates of the site to their weekly mean values. The velocity field is computed by a multi years solution. At this level we must ensure that all the discontinuities and the outliers are eliminated from the time series of each station. This is done by editing a Bernese input file (.STA) which stores all the information needed to remove discontinuities and reject outliers. Once continuous EUREF time series have been obtained, we densify the velocity field by using the information stored in Austrian and Italian regions normal equations files.

In order to estimate a reliable velocity field we solve the problem of multi-year normal equations stacking. First of all, we stack the EUREF weekly normal equations; in order to solve this issue it is necessary to screen the time series of each site in order to find all the offsets and the outliers. The information collected is stored in an input file (.STA file) for the Bernese 5 stacking programme ADDNEQ2. The EUREF normal equations (neq's) stacking is essential for the definition of the reference frame.

The second issue is the densification of the EUREF velocity field. This step is essential because the EUREF network is a cartographic network, so its data are not suitable to be used in crustal deformation studies. But this network can be densified using the data belonging to others GPS local networks through the stacking of their normal equations. In this view, each weekly (local) normal equation must be stacked with the related EUREF weekly normal equation, hence the resulting neq's must be stacked in a multi-year solution. We use weekly neq's belonging to two networks, namely UPA and GP, to densify the velocity field in the Italian and Austrian areas.

During the EUREF multi-year stacking the programme ADDNEQ2 showed poor speed performance and repeatedly crashed, so we decided to use a faster and more stable software. We moved to CATREF (Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames, see [51], [52] and [10]). The stacking strategy we used to carry out the multi-year densified solution is made of 4 steps:

1. Removal of the a-priori constraints from EUREF, UPA and GP weekly neq's, and imposition of new constraints.
2. Preliminary multi-year solution for each network, in order to find offsets and outliers.
3. Stacking of each UPA and GP neq with the related EUREF neq.
4. Multi-year stacking of the resulting neq's.

Step 1 is very important to define a reference frame which is common for each neq involved in a stacking procedure. It is well known the neq's deriving from GPS observables are not full rank: the rank deficit is 7 and is strictly related to the poor definition of the reference frame given by the GPS observables themselves, since they are not sensitive to changes due to translations, rotation and are also scale invariant. So the information used to define the reference frame must be introduced by means of pseudo-observation equations called constraints. Several kinds of constraints can be imposed: some of them acting on the coordinates and velocities of the sites, others acting on the translation, rotation and scale parameters. CATREF is based on the second kind of constraints (the so-called minimum constraints).

Offsets detected in the time series are treated through a piecewise approach: two sets of coordinates and velocities are estimated for the same site, using the data before and after the offset epoch and constraining the velocities (before and after) to the same value. The weighted RMS (WRMS) of the weekly solution versus the stacked solution is used to check the correctness of the constraints and outliers removal. Following A. Kenyeres ² we can say that WRMS of or greater than 1 cm reveals the presence of outliers, and that a very small WRMS value (under 1 mm for the vertical residuals) reveals a wrong constraint removal. In our case we have $WRMS_{EUREF} \in [2.0, 3.5]$ mm, $WRMS_{UPA} \in [2.0, 4.5]$ mm and $WRMS_{GP} \in [2.0, 5.0]$ mm. The WRMS of

²http://www.epncb.oma.be/_organisation/projects/series_sp/cumulative_solution.php

the vertical residuals is greater than 2 mm for the three multi-year solutions. We expected that WRMS of the UPA and GP stacking were greater than EUREF one because the raw data coming from UPA and GP are non checked as strictly as EUREF data. Moreover the plots of the Helmert parameters related to the UPA and GP neq's stacking reveal the inadequacy of reference frame definition, especially for the UPA neq's. However the weekly stacking of the EUREF, UPA and GP neq's seems to compensate this fact.

The combined reference frame is aligned to ITRF05 by minimum constraints imposed on the following subset of sites:

BRUS A 13101M004	JOZE A 12204M001	POTS A 14106M003	TRAB A 20808M001
GLSV A 12356M001	MAS1 A 31303M002	ZIMM A 14001M004	TRO1 A 10302M006
GRAS A 10002M006	METS A 10503S011	RABT A 35001M002	VILL A 13406M001
HOFN A 10204M002	NOT1 A 12717M004		

A further check of the correctness of the alignment of the combined frame to ITRF05 is performed by computing the residuals of the velocity on a subset of sites common to the combined frame and the ITRF05. The common sites are 29 and the averaged velocity residuals in East and North direction are:

East [mm/yr]	North [mm/yr]
-0.11	0.07

The total number of sites contained in the EUREF, UPA and GP multi-year solution is 247. ETRF velocities are computed using the transformation parameters reported in [37].

Later we did the processing of 9 annual and bi-annual measurement campaigns related to the CEGRN network (time span 1994 – 2007), using reprocessed satellite orbits and EOPs files (see [50]). The related neq's, stacked with the corresponding neq's computed by the others analysis centres participating in the CEGRN project, were stacked with the EUREF, UPA and GP neq's, resulting a multi-year solution which contains 296 sites. From this velocity field we can infer that the central European area is rigid (it shows horizontal ETRF velocity values smaller than 1 mm/yr) and that the Mediterranean area is characterized by ETRF velocity values greater than 2 mm/yr. Moreover we verified that the effect of the annual term, for a time span greater than 2.5 years, is negligible (see [47]). The averaged effect is 0.01 mm/yr and 0.06 mm/yr for the East and North components of the horizontal velocity.

The stacking strategy (with CATREF) is fully explained in chapter 9. Offsets tables, Helmert parameters and WRMS plots are given.

The velocity field was used to infer the strain rate. The horizontal strain rate tensor can be expressed as a linear combination of the partials of the velocity field, computed with respect to the East and North directions:

$$\begin{aligned}\epsilon_{ee} &= \frac{\partial \hat{v}^e}{\partial e}, \\ \epsilon_{en} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \hat{v}^n}{\partial e} + \frac{\partial \hat{v}^e}{\partial n} \right), \\ \epsilon_{nn} &= \frac{\partial \hat{v}^n}{\partial n}.\end{aligned}$$

The horizontal velocity field can be approximated analitically by means of least squares collocation. The least squares collocation is based on a knowledege of the statistical properties of the field. The interpolation formula can be written as (see [5]):

$$\hat{s} = C_{st} (C_{tt} + C_{nn})^{-1} l$$

where \hat{s} is the values of the field in the interpolation grid, l is the vector of the observed (centered) values of the field, C_{nn} is the noise covariance matrix (multiplied by a factor 10 to compensate for the effects of random and flicker noise) of the measurements, C_{tt} is the covariance matrix of the observed values of the field and C_{st} is the cross-covariance matrix between the interpolation points and the oservation points. If we suppose the velocity field is isotropic and homogeneous, the elements of the covariance and cross-covariance matrices can be represented by the Cauchy function:

$$C_{ij}^{e_n n} = \frac{w_{e_n n}}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right)^2}$$

where d_{ij} is the spherical distance between i and j sites, $w_{e_n n}$ are the variances of the East and North components of the velocity field and d_0 is the correlation length. The $w_{e_n n}$ values were computed through the empirical variance formula, and the d_0 value was estimating by fitting the (normalized) Cauchy function to the empirical correlogram. We found $d_0 = 105$ Km. This values is $\frac{1}{3}$ smaller than the values reported by [49], [34], [33] e [36]. The strain-rate tensor is built using the partials of the analitical approximation given by the least squares collocation formula, computed with respect to East and North direction. To check the correctness of the algorithm we compare our strain-rate values with those estimated by [16]. South-Eastern Alps are characterized by a deformation rate of $10 \div 15$ nstrain/yr, Central Italy shows an extension rate of 25 nstrain/yr. Sardinia and Corsica do not show significant deformation rates. The agreement between or results and [16] is better where our velocity field is more dense. This agreement is important because our processing and stacking software, our GPS network configuration and our strain-rate computation algorithm is different from [16]. Finally this agreeent suggests that the value of the correlation length we found is correct. Since we had not the strain-rate computation software, we coded the least squares collocation algorithm into a python module (see appendix A.8).

Capitolo 1

Il segnale del satellite

1.0.1 Struttura del segnale

Fondamenti fisici

La geodesia da satellite è basata sui dati che vengono trasmessi dai satelliti all'utilizzatore per mezzo di onde elettromagnetiche. Tali onde, come è noto, sono generate dal movimento di cariche elettriche. La propagazione delle onde elettromagnetiche è descritta dalle equazioni di *Maxwell*.

Durante la propagazione dell'onda, l'intensità del campo elettromagnetico decresce con l'aumentare della distanza dalla sorgente. L'attenuazione viene normalmente espressa in decibels (**dB**). Per definizione, un'attenuazione di n **dB** indica che il campo elettromagnetico iniziale è diminuito di un fattore di $10^{-0.1n}$. Perciò un'attenuazione di 3 **dB** riduce l'intensità del segnale a circa metà del valore iniziale. Alcune delle quantità utilizzate per descrivere le onde elettromagnetiche sono riportate in tabella

Grandezza	Simbolo	Dimensioni
Frequenza circolare	f	<i>ciclo</i> s^{-1}
Fase	φ	<i>ciclo</i>
Lunghezza d'onda	λ	m <i>ciclo</i> $^{-1}$
Periodo	P	s
Velocità della luce	c	m s^{-1}

Il numero intero di cicli equivale a un multiplo di 2π radianti. E' noto che f , P , c , e λ sono legate dalle relazioni

$$f = 2\pi \frac{1}{P} = \frac{c}{\lambda}. \quad (1.1a)$$

La frequenza circolare istantanea si può definire come derivata della fase rispetto al tempo

$$f = \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.2)$$

e integrando la frequenza tra gli istanti t_0 e t si ottiene che

$$\varphi = \int_{t_0}^t f dt. \quad (1.3)$$

Assumendo che la frequenza sia costante, ponendo la fase iniziale $\varphi(t_0) = 0$ e tenendo conto dell'intervallo di tempo t_ϱ che il segnale impiega per percorrere la distanza tra la sorgente e il ricevitore, si può esprimere la fase del segnale osservata dal ricevitore come

$$\varphi = f(t - t_\varrho) = f\left(t - \frac{\varrho}{c}\right) \quad (1.4)$$

Se il ricevitore o la sorgente sono in moto, la frequenza del segnale ricevuto è spostata rispetto a quella del segnale emesso a causa dell'effetto Doppler. In sostanza la frequenza ricevuta f_r differisce dalla frequenza f_e del segnale emesso per una quantità Δf , la quale, esclusi gli effetti relativistici, è proporzionale alla velocità radiale del satellite rispetto al ricevitore:

$$\Delta f = f_r - f_e = -\frac{1}{c}v_\varrho f_e. \quad (1.5)$$

I satelliti GPS orbitano a una velocità media di $r = na \approx 3.9 \text{ km s}^{-1}$. Assumendo che il ricevitore sia fermo e trascurando la rotazione terrestre, nel momento di maggior vicinanza l'effetto Doppler è nullo. La massima velocità lungo la linea di vista viene raggiunta quando il satellite attraversa l'orizzonte, ed è di circa 0.9 km s^{-1} . Assumendo che la frequenza trasmessa sia $f_e = 1.5 \text{ GHz}$, lo shift Doppler sarebbe di $\Delta f = 4.5 \cdot 10^3 \text{ Hz}$. Questo shift risulta in un cambiamento della fase di 4.5 cicli dopo 1 millisecondo, corrispondente ad un cambiamento di distanza di 90 cm.

Componenti del segnale

Gli oscillatori a bordo dei satelliti generano una frequenza fondamentale f_0 con la stabilità dell'ordine di 10^{-13} per un giorno (per i satelliti del blocco II). Le due portanti L1 e L2 vengono generate moltiplicando la frequenza fondamentale per due costanti moltiplicative intere. Le informazioni riguardanti il clock del satellite vengono inviate al ricevitore modulando opportunamente le due portanti con un codice costituito da una sequenza di due stati (+1 e -1, corrispondenti ai valori binari 0 e 1). Il risultato è che in corrispondenza del cambio dello stato del codice si ha uno spostamento di 180° della fase della portante. I codici vengono sovrapposti a due sequenze pseudo casuali (C/A e P, con frequenze $f_0/10$ e f_0 , rispettivamente). Se la portante non modulata ha la forma analitica

$$Li(t) = a_i \cos(f_i t) \quad (1.6)$$

allora le due portanti modulate possono essere rappresentate dalle seguenti funzioni

$$L1(t) = a_1 P(t)W(t)D(t) \cos(f_1 t) + a_1 C/A(t)D(t) \sin(f_1 t) \quad (1.7a)$$

$$L2(t) = a_2 P(t)W(t)D(t) \cos(f_2 t) \quad (1.7b)$$

dove $C/A(t)$ e $P(t)$ rappresentano i codici C/A e P, $W(t)$ è un codice ausiliario che viene utilizzato quando il segnale viene degradato per scopi militari, e $D(t)$ rappresenta il messaggio di navigazione.

Componente	Frequenza (MHz)
Frequenza fondamentale	$f_0 = 1.023$
Portante L1	$154f_0 = 1575.42$
Portante L2	$120f_0 = 1227.60$
Codice P	$f_0 = 10.23$
Codice C/A	$f_0/10 = 1.023$
Codice W	$f_0/20 = 0.5115$
Messaggio di navigazione	$f_0/204600 = 50 \cdot 10^{-6}$

Messaggio di navigazione

Il messaggio di navigazione contiene le informazioni riguardanti lo stato di salute del satellite, il clock e l'orbita. Il messaggio è composto da 1500 bits suddivisi in 5 sezioni. Ogni sezione viene trasmessa in 6 secondi e contiene 10 words di 30 bits. Il tempo di trasmissione di una singola word è di 0.6 secondi. Un ricevitore impiega almeno 30 secondi per agganciare un satellite e ricevere il messaggio di navigazione.

Ogni sezione inizia con una word contenente un pattern di sincronizzazione e alcuni messaggi diagnostici. La seconda word di ogni sezione (hand over word, HOW) contiene il time of the week (TOW) per l'epoca d'izino della sezione immediatamente successiva (il TOW è un multiplo di 1.5 s, contato a partire dall'inizio della settimana GPS corrente).

La prima sezione contiene il numero della settimana GPS, una predizione sull'accuratezza del range, indicatori sulla salute del satellite e sull'età dei dati, una stima del ritardo di gruppo del segnale e i tre coefficienti per il polinomio quadratico che modella la correzione del clock del satellite.

La seconda e la terza sezione contengono le effemeridi del satellite. I contenuti della quarta e quinta sezione variano da messaggio a messaggio. L'informazione di queste sezioni è contenuta in 25 pagine e viene trasmessa in 12.5 minuti. La quarta sezione contiene prevalentemente informazioni di uso militare, associate a informazioni sulla ionosfera, sul TEC (Total Electron Content), sul tempo UTC e dati orbitali di bassa accuratezza riguardanti i satelliti che non fanno parte della costellazione nominale di 24 satelliti. La quinta sezione contiene le informazioni relative alle orbite e allo stato di salute dei 24 satelliti che costituiscono la costellazione GPS. Dal momento che la quarta e la quinta sezione vengono trasmesse da ogni satellite, è possibile ottenere i dati orbitali di tutti i satelliti.

1.0.2 Elaborazione del segnale

Il segnale trasmesso dal satellite ha la forma analitica descritta dall'eq. (???) ed è costituito da 3 componenti, indicate simbolicamente da (L1, C/A, D), (L1, Y, D) e

(L2, Y, D). La potenza del segnale del codice C/A sulla portante L1 è il doppio della potenza del codice Y sulla portante L1. Lo stesso rapporto tra le potenze esiste tra il codice Y sulle portanti L1 e L2. L'obiettivo dell'elaborazione del segnale GPS è la ricostruzione di tutte le componenti del segnale, includendo la ricostruzione della portante e l'estrazione dei codici che contengono le correzioni del clock del satellite e il messaggio di navigazione.

Schema del ricevitore

Esiste una grande varietà di ricevitori in commercio, dedicati a compiti diversi (navigazione, surveying etc.) e con caratteristiche differenti. Essi tuttavia sono basati su alcuni principi comuni.

Il ricevitore contiene le componenti per la ricezione e l'elaborazione del segnale. Un'antenna omnidirezionale riceve i segnali di tutti i satelliti e, dopo averli preamplificati, li trasmette alla sezione a radiofrequenza (RF) del ricevitore. Notiamo che non esiste interferenza tra i segnali dei vari satelliti, in quanto i codici PRN sono diversi per ogni satellite, ed hanno una crosscorrelazione molto bassa. L'antenna può essere stata progettata solo per ricevere la portante L1, oppure per ricevere entrambe le portanti L1 ed L2. È importante che il centro di fase dell'antenna coincida nella miglior maniera possibile con il centro geometrico, e che tale centro di fase sia insensibile alla rotazione e all'inclinazione. Questo è molto importante soprattutto nelle applicazioni di tipo cinematico, quando l'antenna deve essere spostata mentre riceve il segnale. Oltre a questo, l'antenna dovrebbe essere progettata in modo tale da filtrare i segnali a bassa elevazione o quelli spuri prodotti dalle riflessioni del segnale sugli oggetti circostanti (multipath).

Il microprocessore controlla l'intero sistema e consente la navigazione in tempo reale attraverso l'osservabile pseudorange, eseguendo i comandi impartiti da un dispositivo di controllo (ad es. una tastiera). Il ricevitore infine contiene un dispositivo di memoria, necessario per immagazzinare le osservabili e i messaggi di navigazione, in modo da renderli disponibili per un'elaborazione successiva.

Sezione a radiofrequenza

La sezione RF è il cuore del ricevitore. Dopo essere stato trasmesso dall'antenna, il segnale dei vari satelliti vengono discriminati analizzando il codice C/A.

I vari segnali vengono elaborati utilizzando canali separati. I ricevitori più vecchi impiegano tecniche analogiche, mentre quelli più recenti impiegano tecniche digitali di elaborazione del segnale. Alcuni ricevitori permettono di elaborare solamente la portante L1, mentre quelli che possono elaborare sia L1 sia L2 permettono di combinare i due segnali in modo da poter eliminare gli effetti della rifrazione ionosferica.

Una delle caratteristiche più importanti della sezione a radiofrequenza consiste nel numero di canali, che si riflette sul numero di satelliti che possono essere inseguiti simultaneamente. I ricevitori più vecchi possiedono un limitato numero di canali e consentono di osservare più satelliti con lo stesso canale sequenziando le osservazioni

a 20 ms. I ricevitori più moderni assegnano un canale ad ogni satellite: questo genere di ricevitori sono meno sensibili alle perdite di segnale, ma i vari canali possono essere affetti da biases diversi, anche se questo inconveniente può essere ridotto attraverso un'attenta calibrazione dei canali.

Gli elementi fondamentali della sezione a radiofrequenza sono gli oscillatori utilizzati per generare la frequenza di riferimento, i moltiplicatori necessari per ottenere frequenze diverse, e i mixers. Lo scopo dei mixers è quello di prendere due oscillazioni y_1 e y_2 , caratterizzate da ampiezze a_1 , a_2 e da frequenze f_1 e f_2 , e moltiplicarle matematicamente, per ottenere

$$y = y_1 y_2 = a_1 \cos(f_1 t) a_2 \cos(f_2 t) = \frac{a_1 a_2}{2} [\cos((f_1 - f_2)t) + \cos((f_1 + f_2)t)] \quad (1.8)$$

risultando in una oscillazione composta da una parte a bassa frequenza ed una ad alta frequenza. Dopo aver applicato un filtro passa-basso, la parte ad alta frequenza viene eliminata e viene elaborata solo la parte a bassa frequenza $f_2 - f_1$ (Frequenza intermedia IF). Tale frequenza è più facile da elaborare rispetto alla parte ad alta frequenza.

Tecniche di elaborazione

Le misure di pseudorange vengono effettuate confrontando il segnale ricevuto con un segnale di riferimento attraverso tecniche di crosscorrelazione. Per mezzo di queste tecniche è possibile rimuovere la modulazione del codice per ottenere la portante (soggetta a spostamento Doppler). Tale portante viene poi confrontata con una replica del segnale (generata dal ricevitore) per ottenere la differenza di fase (frazionaria) tra i due segnali.

Tecniche di correlazione del codice premettono di estrarre tutte le componenti del segnale del satellite: letture dell'orologio, messaggio di navigazione e portante non modulata. L'unico requisito è la conoscenza del codice PRN. Dalla correlazione tra il segnale del satellite e la replica del segnale (modulata tramite il codice PRN) si ricava il tempo di volo del segnale dall'antenna del satellite al centro di fase dell'antenna del ricevitore (trascurando gli errori di clock). Dopo aver rimosso il codice PRN, il segnale contiene ancora il messaggio di navigazione, che viene decodificato e rimosso da un filtro passa-alto. Il risultato finale è la portante affetta da effetto Doppler, sulla quale può essere effettuata una misura di fase

Capitolo 2

Osservabili

2.1 Acquisizione

Sostanzialmente le osservabili GPS consistono in distanze, dedotte da misure di tempo oppure da misure di fase ottenute dal confronto tra il segnale ricevuto e una replica del segnale generata dal ricevitore. Diversamente dalle misure effettuate normalmente sulla superficie terrestre, il sistema GPS è basato sul concetto di osservabili a una via, che presuppone l'esistenza di due orologi diversi per effettuare una singola misura. Questo fatto comporta che le misure sono intrinsecamente affette da biases di clock, e perciò ci si riferisce alla distanza dedotta da tali misure con il termine "pseudodistanza" (pseudorange).

2.1.1 Pseudoranges dedotte dal codice

Denotiamo con t^s la lettura dell'orologio del satellite al tempo di emissione del segnale, e con t_r la lettura dell'orologio del ricevitore all'istante di ricezione del segnale. Analogamente i ritardi dell'orologio del satellite e dell'orologio del ricevitore rispetto al tempo GPS verranno indicati con i simboli δ^s e δ_r . Ricordiamo che l'istante t^s è trasmesso attraverso il codice PRN. La differenza tra le letture degli orologi è equivalente all'intervallo di tempo durante il quale il segnale di riferimento si allinea con il segnale del satellite (nella procedura di correlazione del codice). Quindi,

$$\Delta t = t_r - t^s = [t_r(GPS) - \delta_r] - [t^s(GPS) - \delta^s] = \Delta t(GPS) - \Delta\delta \quad (2.1)$$

dove $\Delta t(GPS) = t_r(GPS) - t^s(GPS)$ e $\Delta\delta = \delta^s - \delta_r$. L'errore δ^s del clock del satellite può essere modellato per mezzo di un polinomio con i coefficienti estratti dalla prima sezione del messaggio di navigazione. Assumendo che la correzione δ^s venga applicata, allora $\Delta\delta$ coincide con l'opposto dell'errore di clock del ricevitore. L'intervallo di tempo Δt , moltiplicato per la velocità della luce c permette di esprimere la pseudodistanza R

$$R = c\Delta t = c\Delta t(GPS) + c\Delta\delta = \rho + c\Delta\delta \quad (2.2)$$

Si noti che il codice C/A si ripete ogni millisecondo. Tale intervallo di tempo corrisponde ad una distanza di 300 km. Dato che i satelliti orbitano a 20000 km dalla terra, le misure pseudorange dedotte dal codice C/A sono ambigue. Tale ambiguità può essere facilmente eliminata introducendo coordinate a priori approssimate del ricevitore.

La distanza ϱ corrisponde dal tempo di volo del segnale, cioè corrisponde alla distanza tra la posizione occupata dal satellite all'istante di trasmissione $t^s(GPS)$ e la posizione occupata dall'antenna del ricevitore all'istante di ricezione $t_r(GPS)$. Dal momento che ϱ è funzione di due epoche diverse, è spesso rappresentata dalla sua espansione in serie di Taylor, calcolata rispetto all'istante di emissione del segnale

$$\varrho = \varrho(t^s, t_r) = \varrho(t^s, (t^s + \Delta t)) = \varrho(t^s) + \dot{\varrho}(t^s) \quad (2.3)$$

dove $\dot{\varrho}$ indica la derivata temporale di ϱ , cioè la velocità radiale del satellite rispetto all'antenna del ricevitore.

La massima velocità radiale di un satellite rispetto ad un ricevitore fermo è di circa 0.9 km s^{-1} , e il tempo di volo del segnale è approssimativamente di 0.07 s, perciò il termine correttivo dell'equazione precedente è pari a 60 m. Misure pseudorange del codice C/A consentono precisioni di 3 m, mentre misure del codice P consentono precisioni di 0.3 m.

2.1.2 Pseudoranges dedotte dalla fase

Conveniamo di indicare con $\varphi^s(t)$ la fase della portante di frequenza f^s ricevuta e ricostruita, e con $\varphi_r(t)$ la fase della portante generata dal ricevitore alla frequenza di riferimento f_r . L'istante t è un'epoca, espressa in tempo GPS, contata a partire dall'epoca iniziale $t_0 = 0$. Ricordando che

$$\varphi = f(t - t_\varrho) = f\left(t - \frac{\varrho}{c}\right) \quad (2.4)$$

e sostituendo, si ha che

$$\varphi^s(t) = f^s t - f^s \frac{\varrho}{c} - \varphi_0^s \quad (2.5)$$

$$\varphi_r(t) = f_r t - \varphi_{0r}. \quad (2.6)$$

Le fasi iniziali $\varphi_0^s, \varphi_{0r}$ sono diretta conseguenza degli errori di clock e possono esprimersi come

$$\varphi_0^s = f^s \delta^s \quad (2.7)$$

$$\varphi_{0r} = f_r \delta_r. \quad (2.8)$$

Quindi la differenza tra le fasi è data da

$$\varphi_r^s(t) = \varphi^s(t) - \varphi_r(t) = -f^s \frac{\varrho}{c} - f^s \delta^s + f_r \delta_r + (f^s - f_r)t. \quad (2.9)$$

La deviazione delle frequenze f^s e f_r dalle frequenze nominali è dell'ordine di frazioni di Hz. Infatti la stabilità in frequenza è circa $\frac{df}{f} = 10^{-12}$. La frequenza nominale è $f = 1.5$ GHz e quindi l'errore in frequenza è $df = 1.5 \cdot 10^{-3}$ Hz. Tale errore può essere trascurato perchè durante la propagazione del segnale ($\Delta t = 0.07$ s) l'errore massimo presente nella fase data dalla precedente equazione è di circa 10^{-4} cicli, ed è sotto il livello del rumore. Gli errori di clock sono dell'ordine dei millisecondi. Imponendo che $f^s = f_r = f$ si può scrivere

$$\varphi_r^s(t) = -f \frac{\rho}{c} - f \Delta \delta \quad (2.10)$$

dove $\Delta \delta = \delta^s - \delta_r$. Se l'assunzione che la frequenza della portante rimanga stabile non è corretta o che gli oscillatori siano instabili, allora è necessario modellare le deviazioni dai valori nominali con delle funzioni polinomiali.

Ogni volta che un ricevitore aggancia il segnale di un satellite all'epoca t_0 , esso compie una misura della fase (frazionaria) del segnale stesso. Ciò significa che il numero intero di cicli N tra il satellite e il ricevitore è sconosciuto. E' possibile, tuttavia, risalire a tale informazione se il contatto tra il satellite e il ricevitore non subisce interruzioni. In tal caso il numero iniziale di cicli N rimane costante e vale la relazione

$$\varphi_r^s(t) = \Delta \varphi_r^s|_{t_0}^t + N \quad (2.11)$$

dove $\Delta \varphi_r^s|_{t_0}^t$ indica la fase frazionaria, l'unica quantità che è possibile misurare. Combinando le precedenti equazioni e ponendo $\Phi = -\Delta \varphi_r^s|_{t_0}^t$ si ottiene la relazione tra l'osservabile e il range

$$\Phi = \frac{1}{\lambda} \rho + \frac{c}{\lambda} \Delta \delta + N \quad (2.12)$$

dove è stata introdotta la lunghezza d'onda λ . Moltiplicando questa equazione per λ è possibile passare dal numero di cicli alla distanza geometrica. Dal momento che la fase può essere misurata con una precisione di 0.01 cicli, la distanza geometrica può essere determinata con precisione millimetrica.

2.1.3 Osservabile Doppler

Lo spostamento Doppler è linearmente dipendente dalla velocità radiale, e quindi può essere utilizzato per la determinazione in tempo reale della velocità. Derivando rispetto al tempo possiamo scrivere

$$D = \lambda \dot{\Phi} = \dot{\rho} + c \Delta \dot{\delta}. \quad (2.13)$$

Oltre a questo tipo di osservabile è possibile utilizzare lo spostamento Doppler integrato, che consiste in una differenza di fasi che viene scalata per ottenere una differenza di pseudorange.

2.1.4 Rumore e biases

Le osservabili di fase e di codice sono affette da errori sistematici e casuali. Le sorgenti di errore possono essere contenute in tre gruppi: quelle relative al satellite, quelle relative alla propagazione del segnale, e quelle dovute al ricevitore.

Sorgente	effetto
Satellite	Clock bias, errori orbitali
Propagazione del segnale	Rifrazione ionosferica e troposferica
Ricevitore	Variazione del centro di fase, clock bias, multipath

Alcuni degli errori sistematici possono essere modellati e danno luogo a termini addizionali nelle equazioni di osservazione. Alcuni effetti sistematici possono essere eliminati da opportune combinazioni di osservabili. Differenziando le osservabili rispetto ad un satellite si eliminano i biases dipendente dal satellite, differenziando rispetto al ricevitore si annullano i biases dovuti al ricevitore stesso. Differenziando rispetto a satelliti e ricevitori si ottengono delle osservabili che, in larga misura, sono indipendenti dai biases dei ricevitori e dei satelliti. La differenziazione delle osservabili consente anche di ridurre gli errori dovuti alla propagazione del segnale nel mezzo nella troposfera, ma questo solo se si considerano linee di base piccole, perchè in tal caso i punti agli estremi di una linea di base sono affetti (quasi) dagli stessi errori troposferici (dal momento che il segnale si propaga in una regione dell'atmosfera ristretta). Gli effetti ionosferici, invece, sono completamente eliminati dalla doppia differenziazione (pichè dipendono dalla frequenza del segnale). Più difficile da correggere è l'errore prodotto dalle riflessioni spurie del segnale (multipath). Tale disturbo dipende dalle caratteristiche del luogo in cui è posizionato il ricevitore, e quindi può essere ridotto dalla scelta del luogo e da un accurata progettazione dell'antenna. Esso inoltre è dipendente dalla frequenza, e questo fatto implica che le misure di fase sono meno affette da tale fonte di errore rispetto alle misure di codice. Il rumore associato alla misura, unitamente ai biases dipendenti dal satellite e alla propagazione del segnale, viene espresso dallo User Equivalent Range Error (UERE). L'UERE viene trasmesso nel messaggio di navigazione, e assieme al DOP (Dilution Of Precision) consente una stima dell'accuratezza ottenibile in Point Positioning.

Il random noise contiene l'errore casuale associato alla misura e le componenti casuali dovute al multipath. Tale errore si riflette sulla misura di distanza come riportato in tabella

Range	Rumore
C/A	10 – 300 cm
P	10 – 30 cm
Fase	0.2 – 5 mm

2.2 Combinazioni di osservabili

Le osservabili GPS vengono dedotte dal codice contenuto nel segnale o nella fase della portante del segnale. Ricordiamo che il codice P è modulato su entrambe le portanti, mentre il codice C/A solo sulla portante L1. Di conseguenza, per una singola epoca, è possibile misurare le distanze R_{L1} , R_{L2} , le fasi Φ_{L1} e Φ_{L2} e i corrispondenti spostamenti Doppler D_{L1} e D_{L2} . Inoltre le osservabili della portante L1 possono essere derivate dal codice C/A o dal codice P.

2.2.1 Combinazioni lineari di osservabili di fase

Generalmente una combinazione lineare di osservabili di fase si scrive come

$$\varphi = n_1\varphi_1 + n_2\varphi_2 \quad (2.14)$$

dove n_1 e n_2 sono numeri arbitrari. Effettuando la sostituzione $\varphi_i = f_i t$ si ottiene

$$\varphi = n_1 f_1 t + n_2 f_2 t = f t. \quad (2.15)$$

Quindi la frequenza della combinazione lineare è

$$f = n_1 f_1 + n_2 f_2 \quad (2.16)$$

e la lunghezza d'onda è

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.17)$$

è la lunghezza d'onda della combinazione lineare.

Nel caso del sistema GPS risultano di comune utilizzo le osservabili narrow lane

$$\Phi_{L1+L2} = \Phi_{L1} + \Phi_{L2} \quad (2.18)$$

e wide lane

$$\Phi_{L1-L2} = \Phi_{L1} - \Phi_{L2}. \quad (2.19)$$

Le lunghezze d'onda corrispondenti sono

$$\lambda_{L1+L2} = 10.7 \text{ cm} \quad (2.20)$$

$$\lambda_{L1-L2} = 86.2 \text{ cm}. \quad (2.21)$$

Un'altra combinazione lineare (combinazione Lc) si ottiene scegliendo

$$n_1 = 1 \quad n_2 = -\frac{f_{L2}}{f_{L1}} \quad (2.22)$$

da cui

$$\Phi_{Lc} = \Phi_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \Phi_{L2}. \quad (2.23)$$

La combinazione Lc viene utilizzata per ridurre gli effetti della ionosfera, mentre le combinazioni narrow lane e wide lane sono usate per determinare l'ambiguità N. Il livello del rumore aumenta a seguito della combinazione lineare, se infatti supponiamo che entrambe le fasi siano affette dallo stesso rumore, osserviamo, in base alla propagazione degli errori, che il rumore delle combinazioni lineari narrow lane e wide lane è superiore di un fattore $\sqrt{2}$ rispetto al rumore delle singole componenti.

2.2.2 Combinazioni di osservabili di fase e di codice

Le osservabili di fase possono servire per lisciare le osservabili di codice. L'applicazione più comune di tale combinazione è la determinazione della traiettoria in tempo reale. Ipotizziamo di avere la misura su entrambe le frequenze al tempo t_1 , ciò significa che disponiamo delle misure di pseudodistanza derivanti dal codice e dalla fase

$$R_{L1}(t)/\lambda_{L1}, \quad R_{L2}(t)/\lambda_{L2}, \quad \Phi_{L1}(t_1), \quad \Phi_{L2}(t_2)$$

qui le misure di codice sono scalate per la lunghezza d'onda. Nel seguito intenderemo che $R_{L1}(t) = R_{L1}(t)/\lambda_{L1}$ e $R_{L2}(t) = R_{L2}(t)/\lambda_{L2}$. Possiamo formare le combinazioni lineari

$$R(t_1) = \frac{f_{L1}R_{L1}(t_1) - f_{L2}R_{L2}(t_1)}{f_{L1} + f_{L2}} \quad (2.24)$$

$$\Phi(t_1) = \Phi_{L1}(t_1) - \Phi_{L2}(t_1) \quad (2.25)$$

dalla prima equazione si deduce che il rumore dell'osservabile $R(t_1)$ è ridotto di un fattore 0.7 rispetto al rumore associato alla misura di una singola osservabile di codice. Nella seconda equazione, invece, l'incremento del rumore del fattore $\sqrt{2}$ è trascurabile perchè il rumore dell'osservabile pseudorange di fase è inferiore rispetto all'osservabile pseudorange di codice. Notiamo inoltre che entrambe le combinazioni lineari hanno la stessa frequenza f . Possiamo formare le combinazioni lineari precedenti per ogni epoca di osservazione, e possiamo estrapolare i valori pseudorange di codice in base all'equazione

$$R(t_i)_{ex} = R(t_1) + (\Phi(t_i) - \Phi(t_1)). \quad (2.26)$$

Il valore liscio dell'osservabile R_1 si ottiene mediando il valore estrapolato e quello osservato

$$R(t_i)_{sm} = \frac{R(t_i)_{ex} + R(t_i)}{2}. \quad (2.27)$$

Dalla formula precedente si può ricavare un algoritmo ricorsivo

$$R(t_i) = \frac{f_{L1}R_{L1}(t_i) - f_{L2}R_{L2}(t_i)}{f_{L1} + f_{L2}} \quad (2.28)$$

$$\Phi(t_i) = \Phi_{L1}(t_i) - \Phi_{L2}(t_i) \quad (2.29)$$

$$R(t_i)_{ex} = R(t_{i-1})_{sm} + (\Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1})) \quad (2.30)$$

$$R(t_i)_{sm} = \frac{R(t_i)_{ex} + R(t_i)}{2} \quad (2.31)$$

che vale sotto le condizioni iniziali $R(t_1) = R(t_1)_{ex} = R(t_1)_{sm}$ per $i > 1$.

L'algoritmo è valido se non si è in presenza di grandi errori. Nel caso si incorra in sganciamenti di fase è necessario introdurre un fattore w per pesare le osservazioni

$$R(t_i)_{sm} = wR(t_i) + (1 - w)(R(t_{i-1})_{sm} + \Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1})). \quad (2.32)$$

Il fattore w dipende dal tempo: vale 1 per la prima epoca di osservazione e poi si riduce costantemente. Nel caso di uno cycle slip il fattore w viene posto nuovamente al valore 1.

2.3 Effetti atmosferici

2.3.1 Velocità di fase e di gruppo

Consideriamo una singola onda elettromagnetica che si propaga nello spazio con lunghezza d'onda λ e frequenza f . La velocità di fase è data da

$$v_{ph} = \lambda f \quad (2.33)$$

nel sistema GPS questa è la velocità di propagazione delle portanti L1 e L2. Per un gruppo di onde che differiscono lievemente nelle frequenze, la propagazione dell'energia loro associata è data dall'equazione

$$v_{gr} = -\frac{df}{d\lambda} \lambda^2. \quad (2.34)$$

Questa è la velocità di propagazione delle misure di codice. La relazione tra velocità di fase e velocità di gruppo si ottiene per differenziazione

$$dv_{ph} = f d\lambda + \lambda df \quad (2.35)$$

da cui si ottiene

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{dv_{ph}}{d\lambda} - \frac{f}{\lambda} \quad (2.36)$$

ed infine

$$v_{gr} = -\lambda \frac{dv_{ph}}{d\lambda} + f\lambda \quad (2.37)$$

$$v_{gr} = v_{ph} - \lambda \frac{dv_{ph}}{d\lambda}. \quad (2.38)$$

In queste equazioni è implicita la dispersione, cioè la dipendenza della velocità di fase dalla frequenza. le velocità di fase e di gruppo sono uguali in mezzi non dispersivi, e coincidono con la velocità della luce nel vuoto.

La propagazione dell'onda in un mezzo dispersivo è descritta dall'indice di rifrazione n , che viene posto in relazione alla velocità di propagazione da

$$v = \frac{c}{n}. \quad (2.39)$$

Equazioni analoghe valgono per le velocità di fase e di gruppo

$$v_{ph} = \frac{c}{n_{ph}} \quad (2.40)$$

$$v_{gr} = \frac{c}{n_{gr}}. \quad (2.41)$$

Differenziando la velocità di fase

$$\frac{dv_{ph}}{d\lambda} = -\frac{c}{n_{ph}^2} \frac{dn_{ph}}{d\lambda} \quad (2.42)$$

da cui

$$\frac{c}{n_{gr}} = \frac{c}{n_{ph}} + \lambda \frac{c}{n_{ph}^2} \frac{dn_{ph}}{d\lambda} \quad (2.43)$$

ed equivalentemente

$$\frac{1}{n_{gr}} = \frac{1}{n_{ph}} \left(1 + \lambda \frac{1}{n_{ph}} \frac{dn_{ph}}{d\lambda} \right) \quad (2.44)$$

e ricordando che $(1 + \varepsilon)^{-1} \approx 1 - \varepsilon$ si ottiene

$$n_{gr} = n_{ph} - \lambda \frac{dn_{ph}}{d\lambda} \quad (2.45)$$

che si può esprimere anche in funzione della frequenza f come

$$n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df} \quad (2.46)$$

2.3.2 Rifrazione ionosferica

La ionosfera, che si estende in vari strati tra 50 km e 1000 km sopra la superficie terrestre, è un mezzo dispersivo per il segnale radio GPS. L'indice di rifrazione per la fase si può rappresentare in funzione della frequenza f con una serie

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (2.47)$$

I coefficienti c_i dipendono dalla densità elettronica N_e lungo il percorso del segnale. Troncando la serie al termine quadratico si ha

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (2.48)$$

differenziando

$$dn_{ph} = -\frac{2c_2}{f^3} df \quad (2.49)$$

e sostituendo si ottiene

$$n_{gr} = 1 + \frac{c_2}{f^2} - f \frac{2c_2}{f^3} \quad (2.50)$$

da cui

$$gr = 1 - \frac{c_2}{f^2}. \quad (2.51)$$

Come si può osservare gli indici di rifrazione per il gruppo e la fase differiscono dall'unità per la stessa quantità, ma con segno opposto. Di solito il coefficiente c_2 è legato alla densità elettronica dalla relazione

$$c_2 = -40.3N_e. \quad (2.52)$$

dal momento che $n_{gr} > n_{ph}$ ($v_{gr} < v_{ph}$), si ha che in presenza della ionosfera l'osservabile di codice è rallentata, mentre quella di gruppo è avanzata. Ne segue che la distanza dedotta dal codice è superiore al valore vero, mentre quella ottenuta dalla fase è inferiore.

Dal principio di Fermat la distanza misurata si esprime come

$$s = \int n ds \quad (2.53)$$

dove l'integrale è calcolato sul cammino del segnale. La distanza geometrica s_0 può essere calcolata ponendo l'indice di rifrazione uguale a 1

$$s_0 = \int ds_0. \quad (2.54)$$

La rifrazione ionosferica si calcola come differenza

$$\Delta^{iono} = \int n ds - \int ds_0. \quad (2.55)$$

Per la fase la rifrazione ionosferica si esprime come

$$\Delta_{ph}^{iono} = \int \left(1 + \frac{c_2}{f^2}\right) ds - \int ds_0 \quad (2.56)$$

mentre per il codice

$$\Delta_{gr}^{iono} = \int \left(1 - \frac{c_2}{f^2}\right) ds - \int ds_0. \quad (2.57)$$

Possiamo semplificare l'equazione precedente se integriamo lungo il cammino geometrico: in tal caso $ds = ds_0$ e le formule diventano

$$\Delta_{ph}^{iono} = \int \frac{c_2}{f^2} ds \quad \Delta_{gr}^{iono} = - \int \frac{c_2}{f^2} ds \quad (2.58)$$

ed esprimendo il coefficiente c_2 in funzione della densità elettronica

$$\Delta_{ph}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 \quad \Delta_{gr}^{iono} = \frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 \quad (2.59)$$

Il contenuto totale di elettroni (Total Electron Content) è definito da

$$TEC = \int N_e ds_0 \quad (2.60)$$

da cui si ha

$$\Delta_{ph}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} TEC \quad \Delta_{gr}^{iono} = \frac{40.3}{f^2} TEC. \quad (2.61)$$

notiamo che la dimensione di queste correzioni è una lunghezza. Di solito il TEC si misura in unità di 10^{16} elettroni per m^2 . Per il codice C/A una unità di TEC si traduce in un ritardo di 0.16 m.

Il TEC rappresenta il contenuto totale di elettroni lungo il cammino che congiunge il satellite al ricevitore, sostanzialmente il numero di elettroni contenuti nella colonna di sezione unitaria che si estende tra il satellite e il ricevitore. Di solito il TEC viene espresso tramite il contenuto verticale totale di elettroni (TVEC) scalato per una opportuna funzione della distanza zenitale. In formula

$$\Delta_{ph}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \frac{TVEC}{\cos z'} \quad \Delta_{gr}^{iono} = \frac{40.3}{f^2} \frac{TVEC}{\cos z'}. \quad (2.62)$$

Dove z' rappresenta la distanza zenitale del satellite calcolata al punto sub-ionosferico. La relazione tra z' e la distanza zenitale osservata z_0 è data da

$$\sin z' = \frac{R_E}{R_E + h_m} \sin z_0, \quad (2.63)$$

dove R_E rappresenta il raggio medio della terra, h_m l'altezza media della ionosfera (dai 300 ai 400 km).

Abbiamo visto che la variazione della misura della distanza introdotta dalla ionosfera dipende direttamente dal TEC. Questa quantità è affetta da variazioni dovute all'attività delle macchie solari (11 anni) e a variazioni stagionali e giornaliere. Dipende inoltre dall'elevazione e dall'azimuth del satellite e dalla posizione del ricevitore. L'effetto dovuto alla ionosfera sulla misura può variare da 0.15 m a 50.0 m.

Calcolo degli effetti del TEC

Il modello di Klobuchar utilizza i coefficienti contenuti nella quarta sezione del messaggio di navigazione per calcolare le correzioni ionosferiche. Il ritardo è dato dall'equazione

$$\Delta T_v^{iono} = A_1 + A_2 \cos \left(\frac{2\pi (t - A_3)}{A_4} \right) \quad (2.64)$$

dove

$$A_1 = 5 \text{ ns} \quad (2.65)$$

$$A_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \varphi_{IP}^m + \alpha_3 \varphi_{IP}^{m^2} + \alpha_4 \varphi_{IP}^{m^3} \quad (2.66)$$

$$A_3 = 14^h \text{ (tempo locale)} \quad (2.67)$$

$$A_4 = \beta_1 + \beta_2 \varphi_{IP}^m + \beta_3 \varphi_{IP}^{m^2} + \beta_4 \varphi_{IP}^{m^3}. \quad (2.68)$$

I valori A_1 e A_3 sono costanti, mentre A_2 e A_4 vengono trasmessi al satellite dal centro di controllo e poi diffusi agli utilizzatori mediante il messaggio di navigazione. Il parametro t rappresenta il tempo locale del punto ionosferico, e può essere dedotto dall'epoca di osservazione t_{UT} (tempo universale) e dalla longitudine geomagnetica λ_{IP}

$$t = \frac{\lambda_{IP}}{15} + t_{UT} \quad (2.69)$$

La quantità φ_{IP}^m , infine, rappresenta la distanza sferica tra il polo geomagnetico e il punto ionosferico. Se il polo geomagnetico ha coordinate (φ_p, λ_p) e il punto ionosferico $(\varphi_{IP}, \lambda_{IP})$ vale la relazione

$$\cos \varphi_{IP}^m = \sin \varphi_{IP} \sin \varphi_p + \cos \varphi_{IP} \cos \varphi_p \cos(\lambda_{IP} - \lambda_p) \quad (2.70)$$

dove le coordinate del polo geomagnetico sono

$$\varphi_p = 78.3^\circ \text{ N} \quad (2.71)$$

$$\lambda_p = 291.0^\circ \text{ E}. \quad (2.72)$$

Il calcolo della correzione ionosferica, secondo il modello di Klobuchar, può essere effettuata tramite i seguenti passi:

- Calcolo dell'azimuth a e dell'angolo zenitale z_0 all'epoca t_{UT} .
- Scelta dell'altezza media della ionosfera e calcolo della distanza ricevitore-punto ionosferico.
- Calcolo delle quantità $(\varphi_{IP}, \lambda_{IP})$ tramite le quantità a, z, s .
- Calcolo di φ_{IP}^m .
- Calcolo dei coefficienti A_i sulla base della conoscenza delle quantità α_i, β_i dedotte dal messaggio di navigazione.
- Calcolo di ΔT_v^{Iono} . Calcolo del ritardo effettivo tramite la formula $\Delta T^{Iono} = \frac{1}{\cos z} \Delta T_v^{Iono}$. La conversione in lunghezza si ottiene moltiplicando quest'ultima quantità per la velocità della luce.

Eliminazione degli effetti del TEC

La difficoltà principale dei modelli di correzione ionosferica è dovuta alle variazioni temporali dei parametri da cui dipendono i modelli stessi. Il metodo più efficace per ovviare a questo problema consiste nell'eliminazione del ritardo ionosferico utilizzando due segnali a frequenze distinte. Proprio per questo il sistema GPS funziona su due frequenze separate. Ricordiamo che le distanze sono affette dal ritardo ionosferico secondo le relazioni

$$R_{L1} = \rho + c\Delta\delta + \Delta^{Iono}(f_{L1}) \quad (2.73)$$

$$R_{L2} = \rho + c\Delta\delta + \Delta^{Iono}(f_{L2}). \quad (2.74)$$

Formiamo la combinazione lineare

$$R_{L1,L2} = n_1 R_{L1} + n_2 R_{L2} \quad (2.75)$$

dove n_1 e n_2 sono fattori da determinare. Imponiamo che tali coefficienti permettano di cancellare il ritardo ionosferico, si ha

$$n_1 \Delta^{Iono}(f_{L1}) + n_2 \Delta^{Iono}(f_{L2}) = 0. \quad (2.76)$$

Scegliendo $n_1 = 1$ si ottiene

$$n_2 = \frac{\Delta^{Iono}(f_{L1})}{\Delta^{Iono}(f_{L2})} \quad (2.77)$$

da cui

$$n_2 = -\frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2}. \quad (2.78)$$

Utilizzando questa scelta si ha (combinazione ione free per il codice)

$$R_{L1,L2} = R_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2} R_{L2}. \quad (2.79)$$

Per la fase si può scrivere

$$\lambda_{L1} \Phi_{L1} = \varrho + c\Delta\delta + \lambda_{L1} N_{L1} - \Delta^{Iono}(f_{L1}) \quad (2.80)$$

$$\lambda_{L2} \Phi_{L2} = \varrho + c\Delta\delta + \lambda_{L2} N_{L2} - \Delta^{Iono}(f_{L2}) \quad (2.81)$$

o equivalentemente

$$\Phi_{L1} = \frac{\varrho}{\lambda_{L1}} + f_{L1} \Delta\delta + N_{L1} - \frac{1}{\lambda_{L1}} \Delta^{Iono}(f_{L1}) \quad (2.82)$$

$$\Phi_{L2} = \frac{\varrho}{\lambda_{L2}} + f_{L2} \Delta\delta + N_{L2} - \frac{1}{\lambda_{L2}} \Delta^{Iono}(f_{L2}). \quad (2.83)$$

La combinazione lineare è

$$\Phi_{L1,L2} = n_1 \Phi_{L1} + n_2 \Phi_{L2} \quad (2.84)$$

da cui si ottiene

$$\begin{aligned} \Phi_{L1,L2} = & \varrho \left(\frac{n_1}{\lambda_{L1}} + \frac{n_2}{\lambda_{L2}} \right) + \Delta\delta (n_1 f_{L1} + n_2 f_{L2}) \\ & + n_1 N_{L1} + n_2 N_{L2} \\ & - \frac{n_1}{\lambda_{L1}} \Delta^{Iono}(f_{L1}) - \Delta^{Iono}(f_{L2}). \end{aligned} \quad (2.85)$$

Imponendo la condizione

$$\frac{n_1}{\lambda_{L1}} \Delta^{Iono}(f_{L1}) + \Delta^{Iono}(f_{L2}) \quad (2.86)$$

con la scelta $n_1 = 1$, si ottiene

$$n_2 = -\frac{\lambda_{L2} \Delta^{Iono}(f_{L1})}{\lambda_{L1} \Delta^{Iono}(f_{L2})} \quad (2.87)$$

equivalentemente

$$n_2 = -\frac{f_{L2}}{f_{L1}}. \quad (2.88)$$

La combinazione lineare priva di effetti ionosferici è quindi

$$\Phi_{L1,L2} = \Phi_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \Phi_{L2}. \quad (2.89)$$

Come si vede esistono infinite combinazioni lineari del tipo iono free. La scelta del coefficiente n_1 è in realtà ristretta perchè il rumore associato a tale combinazione è sempre aumentato rispetto al rumore delle singole fasi. Evidenziamo infine che l'eliminazione del ritardo troposferico non è completa, in quanto abbiamo trascurato i termini di ordine superiore nelle serie che descrivono gli indici di rifrazione e abbiamo ipotizzato che il cammino ottico coincidesse con il cammino geometrico satellite-ricevitore. Notiamo infine che, per quanto riguarda le fasi, l'ambiguità associata alla combinazione iono free non è più un numero intero, dal momento che

$$N = n_1 N_{L1} + n_2 N_{L2} = N_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1}} N_{L2} \quad (2.90)$$

2.3.3 Rifrazione troposferica

La troposfera è un mezzo non dispersivo rispetto alle onde radio fino ad una frequenza di 15 GHz. Questo fatto implica che non è possibile eliminare il ritardo troposferico utilizzando segnali a frequenze diverse. Il ritardo troposferico è definito dall'equazione

$$\Delta^{Trop} = \int (n - 1) ds \quad (2.91)$$

in modo analogo alla formula ionosferica. Approssimando il cammino ottico con quello geometrico e definendo

$$N^{Trop} = 10^{-6}(n - 1) \quad (2.92)$$

si ha

$$\Delta^{Trop} = 10^{-6} \int N^{Trop} ds. \quad (2.93)$$

La quantità N^{Trop} si divide nella parte secca e umida, e perciò

$$N^{Trop} = N_d^{Trop} + N_w^{Trop} \quad (2.94)$$

ottenendo le relazioni

$$\Delta_w^{Trop} = 10^{-6} \int N_w^{Trop} ds \quad (2.95)$$

$$\Delta_d^{Trop} = 10^{-6} \int N_d^{Trop} ds \quad (2.96)$$

e

$$\Delta^{Trop} = \Delta_w^{Trop} + \Delta_d^{Trop} \quad (2.97)$$

$$= 10^{-6} \int N_w^{Trop} ds + 10^{-6} \int N_d^{Trop} ds. \quad (2.98)$$

Il 90% del ritardo è dovuto alla componente secca, mentre il restante 10% è dovuto alla componente umida. Esistono diversi modelli delle componenti troposferiche,. Ad esempio per la componente secca solitamente si usa l'equazione

$$N_{d,0}^{Trop} = \bar{c}_1 \frac{p}{T} \quad \bar{c}_1 = 77.64 \text{ K mbar}^{-1} \quad (2.99)$$

dove p è la pressione in millibar e T la temperatura in Kelvin. La componente umida di solito si rappresenta come

$$N_{w,0}^{Trop} = \bar{c}_2 \frac{e}{T} + \bar{c}_3 \frac{e}{T^2} \quad \bar{c}_2 = -12.96 \text{ K mbar}^{-1} \quad \bar{c}_3 = 3.718 \text{ K}^2 \text{ mbar}^{-1} \quad (2.100)$$

dove e è la pressione parziale del vapor d'acqua.

Il modello di Hopfield

Utilizzando dati reali raccolti su tutto il pianeta, Hopfield ha creato un modello per rappresentare la rifrattività della componente secca come funzione dell'altezza h sopra la superficie

$$N_d^{Trop}(h) = N_{d,0}^{Trop} \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^4 \quad (2.101)$$

assumendo che l'atmosfera sia rappresentata da un modello politropico di spessore

$$h_d = 40.136 + 148.72(T - 273.16) \text{ m}. \quad (2.102)$$

Il ritardo dovuto alla parte secca è quindi

$$\Delta_d^{Trop} = 10^{-6} N_{d,0}^{Trop} \int \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^4 ds \quad (2.103)$$

trascurando la curvatura del cammino ottico e calcolando l'integrale lungo la verticale

$$\Delta_d^{Trop} = \frac{10^{-6}}{h_d^4} N_{d,0}^{Trop} \int (h_d - h)^4 dh \quad (2.104)$$

$$\Delta_d^{Trop} = \frac{10^{-6}}{h_d^4} N_{d,0}^{Trop} \left[-\frac{1}{5} (h_d - h) \Big|_{h=0}^{h=h_d} \right] \quad (2.105)$$

ed infine

$$\Delta_d^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} N_{d,0}^{Trop} h_d \quad (2.106)$$

che rappresenta la parte secca del ritardo troposferico. La parte umida è più difficile da modellare a causa delle grandi variazioni spaziali e temporali della quantità di vapore acqueo in atmosfera. Il modello di Hopfield assume che la parte secca e la parte umida siano descritte dalla stessa funzione

$$N_w^{Trop}(h) = N_{w,0}^{Trop} \left[\frac{h_w - h}{h_w} \right]^4 \quad (2.107)$$

dove $h_d = 11000$ m. Da misure sperimentali effettuate con radio sonde si sono trovati i seguenti vincoli per h_d e h_w

$$\begin{aligned} 40 \text{ km} &\leq h_d \leq 45 \text{ km} \\ 10 \text{ km} &\leq h_w \leq 13 \text{ km.} \end{aligned} \quad (2.108)$$

Integrando l'equazione precedente si ottiene

$$\Delta_w^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} N_{w,0}^{Trop} h_w \quad (2.109)$$

e quindi il ritardo troposferico zenitale si scrive come

$$\Delta^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} \left[N_{d,0}^{Trop} h_d + N_{w,0}^{Trop} h_w \right] \quad \text{m.} \quad (2.110)$$

Tale ritardo deve essere mappato ad una distanza zenitale arbitraria per mezzo di un fattore moltiplicativo

$$\Delta^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} \left[N_{d,0}^{Trop} h_d m_d(E) + N_{w,0}^{Trop} h_w m_w(E) \right] \quad \text{m} \quad (2.111)$$

dove E è l'elevazione e $m_d(E)$ e $m_w(E)$ sono le mapping functions, rispettivamente per la parte secca e la parte umida. Le mapping functions si possono rappresentare nella seguente forma

$$m_d(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} \quad (2.112)$$

$$m_w(E) = \frac{1}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}}. \quad (2.113)$$

Scrivendo

$$\Delta_d^{Trop}(E) = \frac{10^{-6}}{5} \frac{N_{d,0}^{Trop} h_d}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} \quad (2.114)$$

$$\Delta_w^{Trop}(E) = \frac{10^{-6}}{5} \frac{N_{w,0}^{Trop} h_w}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}} \quad (2.115)$$

ed esprimendo tutte le quantità in funzione di pressione e temperatura, si ottiene

$$\Delta_d^{Trop}(E) = \frac{10^{-6}}{5} \frac{77.64 \frac{p}{T}}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} \quad (2.116)$$

$$\Delta_w^{Trop}(E) = -\frac{10^{-6}}{5} \frac{12.96T + 3.718 \cdot 10^5}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}} \frac{e}{T^2} 11000. \quad (2.117)$$

Misurando p , T , e e l'angolo E si può calcolare il ritardo troposferico come

$$\Delta^{Trop}(E) = \Delta_w^{Trop}(E) + \Delta_d^{Trop}(E) \text{ m.} \quad (2.118)$$

Modelli di Hopfield modificati

Riscriviamo la funzione empirica

$$N_d^{Trop}(h) = N_{d,0}^{Trop} \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^4 \quad (2.119)$$

utilizzando le lunghezze r dei vettori posizione al posto delle altezze h . Sia R_E il raggio terrestre e $r_d = R_E + h_d$ e $r = R_E + h$. La rifrattività troposferica assume la forma

$$N_d^{Trop}(r) = N_{d,0}^{Trop} \left[\frac{r_d - r}{r_d - R_E} \right]^4. \quad (2.120)$$

Introducendo la quantità di vapore acqueo e la mapping function si ottiene

$$\Delta_d^{Trop} = 10^{-6} \int_{r=R_E}^{r=r_d} N_d^{Trop}(r) \frac{1}{\cos z(r)} dr \quad (2.121)$$

per la parte secca. Sia z l'angolo zenitale al punto di osservazione, allora vale la relazione

$$\sin z(r) = \frac{R_E}{r} \sin z_0. \quad (2.122)$$

Ne segue che

$$\cos z(r) = \sqrt{1 - \frac{R_E^2}{r^2} \sin^2 z_0}. \quad (2.123)$$

Sostituendo

$$\Delta_d^{Tropo}(z) = \frac{10^{-6} N_{d,0}^{Tropo}}{(r_d - R_E)^4} \int_{r=R_E}^{r=r_d} \frac{r(r_d - r)^4}{\sqrt{r^2 - R_E^2 \sin^2 z_0}} dr \quad (2.124)$$

e assumendo lo stesso modello per la componente umida

$$\Delta_w^{Tropo}(z) = \frac{10^{-6} N_{w,0}^{Tropo}}{(r_w - R_E)^4} \int_{r=R_E}^{r=r_d} \frac{r(r_w - r)^4}{\sqrt{r^2 - R_E^2 \sin^2 z_0}} dr \quad (2.125)$$

ricordando che $E = 90 - z$.

Espandendo in serie di Taylor l'integrando, e ponendo

$$r_i = \sqrt{(R_E + h_i)^2 - (R_E \cos E)^2} - R_E \sin E \quad i = d, w \quad (2.126)$$

Il ritardo troposferico in metri si può esprimere nella seguente maniera

$$\Delta_i^{Trop}(E) = 10^{-12} N_{i,0}^{Trop} \left[\sum_{k=1}^9 \frac{\alpha_{k,i}}{k} r_i^k \right] \quad (2.127)$$

dove

$$\begin{aligned} \alpha_{1,i} &= 1 & \alpha_{6,i} &= 4a_i b_i (a_i^2 + 3b_i) \\ \alpha_{2,i} &= 4a_i & \alpha_{7,i} &= b_i^2 (6a_i^2 + 4b_i) \\ \alpha_{3,i} &= 6a_i^2 + 4b_i & \alpha_{8,i} &= 4a_i b_i^3 \\ \alpha_{4,i} &= 4a_i (a_i^2 + 3b_i) & \alpha_{9,i} &= b_i^4 \\ \alpha_{5,i} &= a_i^4 + 12a_i^2 + 6b_i^2 \end{aligned} \quad (2.128)$$

con

$$a_i = -\frac{\sin E}{h_i} \quad b_i = -\frac{\cos^2 E}{2h_i R_E} \quad (2.129)$$

Il modello di Sastamoinen

La rifrattività può essere dedotta dalle leggi dei gas. Utilizzando tale approccio Sastamoinen ha proposto il modello

$$\Delta_i^{Trop} = \frac{0.002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2 z \right] \quad (2.130)$$

dove z è l'angolo zenitale, p la pressione atmosferica in millibar, T la temperatura in Kelvin e e la pressione parziale del vapor d'acqua in millibar. Utilizzando valori medi per queste quantità si trova che il ritardo troposferico verticale è di circa 2.3 m. Tale modello può essere corretto aggiungendo due termini correttivi dipendenti dall'altezza del ricevitore e dall'angolo zenitale. Bauersima ha dato la formula

$$\Delta_i^{Trop} = \frac{0.002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (2.131)$$

dove i termini correttivi B e δR vengono ricavati interpolando delle tabelle.

Il modello di Marini

Nel modello di Marini le mapping function sono rappresentate dalla seguente funzione

$$m_d(E) = \frac{1 + \frac{a_d}{1 + \frac{b_d}{1 + c_d}}}{\sin E + \frac{a_d}{\sin E + \frac{b_d}{\sin E + c_d}}} \quad (2.132)$$

con i coefficienti definiti come

$$\begin{aligned} a_d &= [1.2320 + 0.0139 \cos \varphi - 0.0209h + 0.00215(T - 283)] \cdot 10^{-3} \quad (2.133) \\ b_d &= [3.1612 - 0.1600 \cos \varphi - 0.0331h + 0.00206(T - 283)] \cdot 10^{-3} \\ c_d &= [71.244 - 4.293 \cos \varphi - 0.149h + 0.0021(T - 283)] \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

dipendenti dalla latitudine φ e dall'altezza h del sito di osservazione e dalla temperatura T . Per la parte umida i coefficienti sono

$$\begin{aligned} a_w &= [0.583 - 0.011 \cos \varphi - 0.052h + 0.0014(T - 283)] \cdot 10^{-3} \quad (2.134) \\ b_w &= [1.402 - 0.102 \cos \varphi - 0.101h + 0.0020(T - 283)] \cdot 10^{-3} \\ c_w &= [45.85 - 1.91 \cos \varphi - 1.29h + 0.015(T - 283)] \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Il modello di Niell utilizza la stessa rappresentazione per le mapping functions, solo che le fa dipendere da tre coefficienti. I coefficienti relativi alla parte secca dipendono da altezza, latitudine e giorno di osservazione, mentre quelli per la parte umida dipendono solo dalla latitudine. I coefficienti sono tabulati e devono essere interpolati per ricavare i loro valori a latitudini e giorni arbitrari.

2.3.4 Multipath

Il multipath è un disturbo creato da superfici riflettenti poste in vicinanza del ricevitore, anche se in misura minore tali riflessioni possono verificarsi sul satellite. Supponiamo che il segnale arrivi al ricevitore seguendo tre cammini distinti, uno diretto e gli altri due dovuti a riflessione. La conseguenza principale è che i tre cammini avranno diverse fasi, e tali fasi differiranno in proporzione alle lunghezze dei tre cammini. In realtà non esiste un modello di multipath a causa dell'estrema varietà di geometrie dei luoghi. In ogni caso l'effetto del multipath può essere stimato utilizzando un'opportuna combinazione di misure sulle frequenze L1 e L2. Il principio è basato sul fatto che la troposfera, gli errori di clock e gli effetti relativistici influenzano le misure di codice e di fase della stessa quantità, mentre gli errori introdotti da ionosfera e multipath dipendono dalla frequenza. Ne segue che differenziando le combinazioni iono free è possibile discriminare l'effetto del multipath.

I segnali provenienti da satelliti a bassa elevazione sono maggiormente affetti da multipath rispetto a quelli ad alta elevazione. L'errore prodotto da tale fenomeno può arrivare fino a 100 m nelle vicinanze di edifici. Di solito gli effetti prodotti dal multipath si dividono in tre categorie: 1) scattering del segnale dovuto a manufatti distribuiti su una vasta area, causa di errori di circa 10 m, 2) rifrazione speculare dovuta ad oggetti posti vicino all'antenna, causa di errori dell'ordine di 2 – 6 m, fluttuazioni a bassa frequenza dovute alla superficie di specchi d'acqua, causa di un errore di circa 10 m. In alcuni casi il multipath può causare la perdita del segnale.

L'effetto del multipath sulla fase può essere indagato nella seguente maniera:

supponiamo di rappresentare il segnale diretto e quello indiretto tramite le funzioni

$$\begin{aligned} a \cos \varphi \\ \beta a \cos(\varphi + \Delta\varphi) \end{aligned} \quad (2.135)$$

dove a e φ rappresentano l'ampiezza e la fase del segnale diretto. Notiamo che l'ampiezza del segnale indiretto è diminuita di un fattore β a seguito della riflessione. La fase del segnale riflesso è ritardata della quantità $\Delta\varphi$ in relazione alla configurazione geometrica. La sovrapposizione dei segnali è data da

$$a \cos \varphi + \beta a \cos(\varphi + \Delta\varphi).$$

Applicando il teorema del coseno si ha

$$a \cos \varphi + \beta a \cos \varphi \cos \Delta\varphi - \beta a \sin \varphi \sin \Delta\varphi$$

,e equivalentemente

$$(1 + \beta \cos \Delta\varphi)a \cos \varphi - (\beta \sin \Delta\varphi)a \sin \varphi.$$

Il segnale risultante può essere rappresentato nella forma

$$\beta_M a \cos(\varphi + \Delta\varphi_M)$$

dove il pedice M indica il multipath. Il teorema del coseno porge

$$(\beta_M \cos \Delta\varphi_M)a \cos \varphi - (\beta_M \sin \Delta\varphi_M)a \sin \varphi.$$

Confrontando i coefficienti di $a \sin \varphi$ e $a \cos \varphi$ si trovano le seguenti relazioni

$$\begin{aligned} \beta_M \sin \Delta\varphi_M &= \beta \sin \Delta\varphi \\ \beta_M \cos \Delta\varphi_M &= 1 + \beta \cos \Delta\varphi \end{aligned}$$

che rappresentano due equazioni per le due incognite β_M e $\Delta\varphi_M$. Quadrando e sommando le due equazioni si ha

$$\beta_M = \sqrt{1 + \beta + 2\beta \cos \Delta\varphi}$$

mentre dividendo le due equazioni si ottiene

$$\tan \Delta\varphi_M = \frac{\beta \sin \Delta\varphi}{1 + \beta \cos \Delta\varphi}.$$

Il fattore β può variare tra 0 e 1. Se si pone $\beta = 0$ (ciò nessuna riflessione del segnale) si ottiene $\beta_M = 1$ e $\Delta\varphi_M = 0$; se si pone $\beta = 1$ si ha

$$\beta_M = \sqrt{2(1 + \cos \Delta\varphi)} = 2 \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$$

e per la fase

$$\tan \Delta\varphi_M = \frac{\sin \Delta\varphi}{1 + \cos \Delta\varphi} = \tan \frac{\Delta\varphi}{2}$$

e infine

$$\Delta\varphi_M = \frac{\Delta\varphi}{2}.$$

Nella tabella seguente sono riportati alcuni esempi numerici

$\Delta\varphi$	β_M	$\Delta\varphi_M$
0°	2	0°
90°	$\sqrt{2}$	45°
180°	0	90°

Si può notare che il massimo effetto del multipath sulle misure di fase avviene per $\Delta\varphi_M = 90^\circ = 1/4$ di ciclo. Convertendo la differenza di fase in lunghezza si ha una variazione nella distanza di 5 cm, valore che può aumentare se si utilizzano combinazioni lineari di fase.

Sia ora Δs la differenza di cammino ottico. Supponiamo che la superficie riflettente sia il terreno, allora

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\lambda} \Delta s = \frac{2h}{\lambda} \sin E$$

dove h rappresenta la distanza del ricevitore sulla superficie ed E è l'elevazione del satellite. Osserviamo che il multipath è periodico perchè l'elevazione E varia nel tempo. La frequenza del multipath è

$$f = \frac{d(\Delta\varphi)}{dt} = \frac{2h}{\lambda} \cos E \frac{dE}{dt}.$$

Sostituendo i valori tipici $E = 45^\circ$ e $\frac{dE}{dt} = 0.07$ mrad/s si ottiene, per la portante L1

$$f = 0.521 \cdot 10^{-3} h \quad \text{m}$$

Da questa formula si deduce che un'antenna posta a 2 m di altezza è soggetta ad un errore di multipath di periodo pari a 16 min. Gli effetti del multipath sulle portanti nel posizionamento relativo con linee di base corte producono errori dell'ordine del centimetro.

Capitolo 3

Modelli matematici per il posizionamento

3.1 Point positioning

3.1.1 Point positioning mediante l'osservabile di codice

Modello

Abbiamo visto che la pseudodistanza dedotta da misure di codice può essere rappresentata da

$$R_i^j(t) = \varrho_i^j(t) + c\Delta\delta_i^j(t). \quad (3.1)$$

Qui $R_i^j(t)$ è la pseudodistanza tra il ricevitore i e il satellite j , $\varrho_i^j(t)$ è la distanza geometrica e c la velocità della luce. L'errore di clock (comprensivo del ricevitore e del satellite) è rappresentato da $\delta_i^j(t)$ e rappresenta il bias rispetto al tempo GPS.

Le coordinate del punto sono presenti implicitamente nella distanza $\varrho_i^j(t)$, in base all'equazione

$$\varrho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2} \quad (3.2)$$

dove $X^j(t)$, $Y^j(t)$, $Z^j(t)$ sono le coordinate del satellite all'epoca t e X_i , Y_i , Z_i sono le tre incognite corrispondenti alle coordinate del punto di osservazione. Consideriamo ora il significato del bias $\Delta\delta_i^j(t)$; consideriamo una sola epoca, in tal caso l'equazione di osservazione contiene 4 incognite. Supponiamo che le coordinate del ricevitore siano costanti, in tal caso per ogni satellite osservato avremo un'equazione di osservazione contenente 4 incognite, ne segue il numero di incognite totali sarà sempre $4 + (\text{numero di satelliti osservati}) < (\text{numero di osservazioni})$. Per ovviare a questo problema è necessario ricorrere all'informazione relativa al clock contenuta nel messaggio di navigazione. Allora il bias del satellite può considerarsi conosciuto in base alla conoscenza dei coefficienti a_0 , a_1 e a_2

$$\delta^j(t) = a_0 + a_1(t - t_c) + a_2(t - t_c)^2. \quad (3.3)$$

dove t_c rappresenta il tempo di riferimento.

Il bias satellite-ricevitore si scrive come

$$\Delta\delta_i^j(t) = \delta^j(t) - \delta_i(t) \quad (3.4)$$

e quindi l'equazione di osservazione si può riscrivere come

$$R_i^j(t) - c\delta^j(t) = \varrho_i^j(t) - c\delta_i(t) \quad (3.5)$$

dove i termini del membro di sinistra sono conosciuti.

Configurazioni base

Le configurazioni base sono quelle situazioni in cui il numero delle osservazioni è maggiore o uguale al numero delle incognite. Se indichiamo con n_j il numero di satelliti e n_t il numero di epoche di osservazione allora il numero totale di equazioni di osservazione sarà dato dal prodotto $n_t n_j$. Nel point positioning statico (cioè con ricevitori fissi) il numero delle incognite è $3 + n_t$. Dunque la configurazione base è definita dalla relazione

$$n_t n_j \geq 3 + n_t \quad (3.6)$$

che si può riscrivere come

$$n_t \geq \frac{3}{n_j - 1}. \quad (3.7)$$

Il numero minimo di satelliti necessario ad ottenere una soluzione è $n_j = 2$ che implica $n_t \geq 3$ epoche di osservazione. Se $n_j = 4$ si può ottenere la soluzione con $n_t \geq 1$, cioè si può risolvere il problema per 4 incognite ad una singola epoca se sono osservabili contemporaneamente 4 satelliti. Se il ricevitore è in movimento allora il numero di incognite relative alle coordinate sale a $3n_t$ e la configurazione base è definita dalla disequazione

$$n_j n_t \geq 4n_t \quad (3.8)$$

che porge immediatamente $n_j \geq 4$. Questo fatto implica che la posizione (e la velocità) di un ricevitore in movimento può essere determinata solo se vengono inseguiti contemporaneamente almeno 4 satelliti.

3.1.2 Point positioning mediante osservazioni di fase

Modello

La pseudodistanza può essere determinata anche per mezzo di osservazioni di fase. Ricordiamo che la fase è legata alla distanza dall'equazione

$$\Phi_i^j(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_i^j(t) + N_i^j + f^j \Delta\delta_i^j(t). \quad (3.9)$$

Qui $\Phi_i^j(t)$ rappresenta la fase della portante in cicli, λ è la lunghezza d'onda e $\varrho_i^j(t)$ è la distanza geometrica. L'ambiguità N_i^j è un numero intero indipendente dal tempo.

Il termine f^j rappresenta la frequenza del segnale del satellite e $\Delta\delta_i^j(t)$ rappresenta il bias combinato degli orologi del ricevitore e del satellite. Rendendo espliciti i singoli bias degli orologi si può scrivere

$$\Phi_i^j(t) - f^j\delta^j(t) = \frac{1}{\lambda}\varrho_i^j(t) + N_i^j - f^j\delta_i(t). \quad (3.10)$$

Configurazioni base

Osserviamo che rispetto al point positioning il numero di ingognite è aumentato della quantità n_j a causa della presenza delle ambiguità. Per il point positioning statico la configurazione base è definita dalla disequazione

$$n_t n_j \geq 3 + n_j + n_t \quad (3.11)$$

da cui

$$n_t \geq \frac{n_j + 3}{n_j - 1}. \quad (3.12)$$

Il numero minimo di satelliti necessario ad ottenere una soluzione è $n_j = 2$ che corrisponde ad almeno 5 epoche di osservazione. Altre soluzioni si ottengono per $n_j = 3$, $n_t \geq 3$ e $n_j = 5$, $n_t \geq 2$.

Per il point positioning cinematico la configurazione base è definita da

$$n_t n_j \geq n_j + 4n_t \quad (3.13)$$

equivalente a

$$n_t \geq \frac{n_j}{n_j - 4}. \quad (3.14)$$

Il numero minimo di satelliti necessario ad ottenere una soluzione è $n_j = 5$, con i satelliti osservati per $n_t \geq 5$ epoche. Altre soluzioni si hanno per $n_j = 6$, $n_t \geq 3$ e $n_j = 8$, $n_t \geq 2$.

3.1.3 Posizionamento relativo

L'obiettivo del posizionamento relativo è la determinazione delle coordinate di un punto sconosciuto rispetto ad alcuni punti conosciuti che, nella maggior parte delle applicazioni sono stazionari. In altre parole il posizionamento relativo ha come compito la determinazione del vettore che congiunge due punti (detto linea di base). Sia A il punto di coordinate conosciute, B il punto di coordinate sconosciute e \mathbf{b}_{AB} il vettore linea di base. Siano \mathbf{X}_A e \mathbf{X}_B i vettori posizione, allora vale la relazione vettoriale

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{X}_A + \mathbf{b}_{AB} \quad (3.15)$$

dove

$$\mathbf{b}_{AB} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_B - \mathbf{X}_A \\ \mathbf{Y}_B - \mathbf{Y}_A \\ \mathbf{Z}_B - \mathbf{Z}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{X}_A \\ \Delta\mathbf{Y}_A \\ \Delta\mathbf{Z}_A \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Le coordinate dei punti di riferimento devono essere date nel sistema WGS-84. Il posizionamento relativo può essere effettuato sia con misure di codice sia con misure di fase. Risulta inoltre maggiormente efficace se vengono effettuate osservazioni contemporanee sia nei punti conosciuti sia in quelli sconosciuti. Assumendo l'esistenza di osservazioni simultanee, è possibile combinare linearmente le combinazioni lineari delle equazioni di osservazione (singole differenza, doppie differenza, triple differenze).

Differenze di osservabili di fase

Singole differenze In questa combinazione lineare sono interessati due punti ed un satellite. Indicando i due punti con le lettere A e B e il satellite con il pedice j possiamo scrivere le equazioni di osservazione nella seguente forma

$$\Phi_A^j(t) - f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_A^j(t) + N_A^j - f^j \delta_A(t) \quad (3.17)$$

$$\Phi_B^j(t) - f^j \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_B^j(t) + N_B^j - f^j \delta_B(t)$$

la differenza tra le due equazioni è

$$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} [\varrho_B^j(t) - \varrho_A^j(t)] + N_B^j - N_A^j - f^j [\delta_B(t) - \delta_A(t)]. \quad (3.18)$$

questa ultima equazione viene detta equazione delle singole differenze. Tutte le quantità del membro di destra sono incognite. Osserviamo che nel processo di stima delle incognite è impossibile separare le ambiguità e gli errori di clock dei ricevitori, pertanto si introducono le quantità

$$N_{AB}^j = N_B^j - N_A^j \quad (3.19)$$

$$\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t). \quad (3.20)$$

Utilizzando la notazione

$$\Phi_{AB}^j(t) = \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) \quad (3.21)$$

$$\varrho_{AB}^j(t) = \varrho_B^j(t) - \varrho_A^j(t) \quad (3.22)$$

si ha

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t) \quad (3.23)$$

che rappresenta la forma finale dell'equazione delle singole differenze. Rispetto all'equazione non differenziata è scomparso il bias del clock del satellite.

Doppie differenze Considerando due punti A e B e due satelliti j e k , possiamo scrivere due equazioni alle singole differenze

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t) \quad (3.24)$$

$$\Phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k - f^k \delta_{AB}(t).$$

Per ottenere le doppie differenze sottraiamo tra di loro queste due equazioni, supponendo che le frequenze dei segnali dei due satelliti siano uguali ($f^j = f^k$)

$$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} [\varrho_{AB}^k(t) - \varrho_{AB}^j(t)] + N_{AB}^k - N_{AB}^j. \quad (3.25)$$

utilizzando la notazione compatta si ottiene infine

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk}. \quad (3.26)$$

In questa equazione si cancellano gli errori di orologio dei ricevitori. Osserviamo che la cancellazione risulta dall'assunzione che le osservazioni siano simultanee e che le frequenze dei segnali siano uguali.

Triple differenze Fino ad ora abbiamo considerato osservazioni relative ad una sola epoca t . La differenziazione delle equazioni alle doppie differenze rispetto a due epoche distinte permette di cancellare i termini di ambiguità. Siani t_1 e t_2 due epoche di osservazione, le equazioni alle doppie differenze sono

$$\Phi_{AB}^j(t_1) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t_1) + N_{AB}^{jk} \quad (3.27)$$

$$\Phi_{AB}^j(t_2) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t_2) + N_{AB}^{jk} \quad (3.28)$$

da cui si può formare l'equazione di osservazione alle triple differenze

$$\Phi_{AB}^j(t_2) - \Phi_{AB}^j(t_1) = \frac{1}{\lambda} [\varrho_{AB}^{jk}(t_2) - \varrho_{AB}^{jk}(t_1)] \quad (3.29)$$

e in notazione compatta

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t_{12}). \quad (3.30)$$

Notiamo che $\Phi_{AB}^{jk}(t_{12})$ e $\varrho_{AB}^{jk}(t_{12})$ sono composti da 8 termini:

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) &= \Phi_B^k(t_2) - \Phi_B^j(t_2) - \Phi_A^k(t_2) + \Phi_A^j(t_2) \\ &\quad - \Phi_B^k(t_1) + \Phi_B^j(t_1) + \Phi_A^k(t_1) - \Phi_A^j(t_1) \end{aligned} \quad (3.31)$$

e

$$\varrho_{AB}^{jk}(t_{12}) = \varrho_B^k(t_2) - \varrho_B^j(t_2) - \varrho_A^k(t_2) + \varrho_A^j(t_2) \quad (3.32)$$

$$- \varrho_B^k(t_1) + \varrho_B^j(t_1) + \varrho_A^k(t_1) - \varrho_A^j(t_1). \quad (3.33)$$

Le triple differenze, in quanto indipendenti dalle ambiguità, non sono affette dagli sganciamenti di fase (cycle slips).

3.1.4 Correlazioni tra le combinazioni di fase

In generale esistono due tipi di correlazione, fisica e matematica. La correlazione fisica, per esempio, è quella che riguarda le fasi Φ_A^j e Φ_B^j del segnale del satellite j ricevute nei due punti A e B . Le due misure sono correlate fisicamente in quanto si riferiscono allo stesso satellite.

L'operazione di differenziazione delle osservabili introduce, dal punto di vista matematico, delle correlazioni tra le stime dei parametri. Nel seguito assumiamo che ogni misura di fase sia affetta da errori distribuiti normalmente (cioè con valori di aspettazione nulli e varianza σ^2). Introduciamo il vettore delle fasi Φ , allora si ha

$$\text{cov}(\Phi) = \sigma^2 \mathbf{I} \quad (3.34)$$

dove \mathbf{I} è la matrice unità.

Singole differenze

Se consideriamo due punti A e B e un satellite j abbiamo

$$\Phi_{AB}^j(t) = \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t). \quad (3.35)$$

Formando le singole differenze per un altro satellite otteniamo

$$\Phi_{AB}^k(t) = \Phi_B^k(t) - \Phi_A^k(t). \quad (3.36)$$

Le singole differenze si possono rappresentare in notazione matriciale ponendo

$$\mathbf{SD} = \mathbf{C}\Phi \quad (3.37)$$

dove

$$\mathbf{SD} = \begin{bmatrix} \Phi_{AB}^j(t) \\ \Phi_{AB}^k(t) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_A^j(t) \\ \Phi_B^j(t) \\ \Phi_A^k(t) \\ \Phi_B^k(t) \end{bmatrix}. \quad (3.40)$$

La covarianza delle singole differenze è data da

$$\text{cov}(\mathbf{SD}) = \mathbf{C}\text{cov}(\Phi)\mathbf{C}^T \quad (3.41)$$

da cui si ottiene

$$\text{cov}(\mathbf{SD}) = \mathbf{C}\sigma^2\mathbf{I}\mathbf{C}^T = \sigma^2\mathbf{C}\mathbf{C}^T \quad (3.42)$$

dove

$$\mathbf{C}\mathbf{C}^T = 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 2\mathbf{I} \quad (3.43)$$

e quindi

$$\text{cov}(\mathbf{SD}) = 2\sigma^2\mathbf{I}. \quad (3.44)$$

Questo fatto mostra che le singole differenze non sono correlate. Le dimensioni della matrice unità corrispondono al numero di singole differenze all'epoca t . Considerando più di un'epoca la matrice di covarianza è ancora una matrice unità di dimensioni pari al numero totale di singole differenze.

Doppie differenze

Consideriamo i tre satelliti i, j e k . Per due punti A e B all'epoca t le doppie differenze sono

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) \quad (3.45)$$

$$\Phi_{AB}^{jl}(t) = \Phi_{AB}^l(t) - \Phi_{AB}^j(t) \quad (3.46)$$

In forma matriciale

$$\mathbf{DD} = \mathbf{C} \mathbf{SD} \quad (3.47)$$

dove

$$\mathbf{DD} = \begin{bmatrix} \Phi_{AB}^{jk}(t) \\ \Phi_{AB}^{jl}(t) \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

e le singole differenze sono rappresentate dal vettore

$$\mathbf{SD} = \begin{bmatrix} \Phi_{AB}^j(t) \\ \Phi_{AB}^k(t) \\ \Phi_{AB}^l(t) \end{bmatrix}. \quad (3.50)$$

La matrice di covarianza per le doppie differenze è data da

$$\text{cov}(\mathbf{DD}) = \mathbf{C} \text{cov}(\mathbf{SD}) \mathbf{C}^T \quad (3.51)$$

e da cui si ha

$$\text{cov}(\mathbf{DD}) = 2\sigma^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}. \quad (3.52)$$

Osserviamo che la matrice non è diagonale e, quindi, le doppie differenze sono correlate. La matrice dei pesi $\mathbf{P}(t)$ è definita dall'inversa della matrice di covarianza

$$\mathbf{P}(t) = [\text{cov}(\mathbf{DD})]^{-1} = \frac{1}{2\sigma^2} \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

dove sono state usate le doppie differenze relative ad un'unica epoca. Se n_{DD} è il numero di doppie differenze all'epoca t , la matrice di correlazione è data da

$$\mathbf{P}(t) = \frac{1}{2\sigma^2} \frac{1}{n_{DD} + 1} \begin{bmatrix} n_{DD} & -1 & -1 & \dots \\ -1 & n_{DD} & & \dots \\ -1 & & & \\ \dots & & & n_{DD} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

dove la dimensione della matrice è $n_{DD} \times n_{DD}$. Assumiamo di disporre di 4 equazioni alle doppie differenze, allora la matrice di correlazione è data da

$$\mathbf{P}(t) = \frac{1}{2\sigma^2} \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix}. \quad (3.55)$$

Questa matrice vale per una singola epoca di osservazione. Se si considerano epoche t_1, t_2, t_3, t_4 la matrice di correlazione diventa diagonale a blocchi

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(t_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{P}(t_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{P}(t_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{P}(t_4) \end{bmatrix}. \quad (3.56)$$

Le matrici $\mathbf{P}(t_i)$ non hanno necessariamente le stesse dimensioni perchè ad epoche diverse può corrispondere un diverso numero di equazioni di osservazione.

Triple differenze

La covarianza delle triple differenze si applica applicando la legge di propagazione della covarianza all'equazione

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \Phi_{AB}^k(t_2) - \Phi_{AB}^j(t_2) - \Phi_{AB}^k(t_1) + \Phi_{AB}^j(t_1). \quad (3.57)$$

Consideriamo prima le triple differenze relative alle stesse epoche e con in comune lo stesso satellite j , si ha

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) &= \Phi_{AB}^k(t_2) - \Phi_{AB}^j(t_2) - \Phi_{AB}^k(t_1) + \Phi_{AB}^j(t_1) \\ \Phi_{AB}^{jl}(t_{12}) &= \Phi_{AB}^l(t_2) - \Phi_{AB}^j(t_2) - \Phi_{AB}^l(t_1) + \Phi_{AB}^j(t_1). \end{aligned} \quad (3.58)$$

Introducendo le matrici

$$\mathbf{TD} = \begin{bmatrix} \Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) \\ \Phi_{AB}^{jl}(t_{12}) \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

$$\mathbf{SD} = \begin{bmatrix} \Phi_{AB}^j(t_1) \\ \Phi_{AB}^k(t_1) \\ \Phi_{AB}^l(t_1) \\ \Phi_{AB}^j(t_2) \\ \Phi_{AB}^k(t_2) \\ \Phi_{AB}^l(t_2) \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

possiamo utilizzare la notazione matriciale

$$\mathbf{TD} = \mathbf{C SD} \quad (3.62)$$

per ottenere la matrice di covarianza

$$\text{cov}(\mathbf{TD}) = \mathbf{C cov}(\mathbf{SD}) \mathbf{C}^T \quad (3.63)$$

da cui

$$\text{cov}(\mathbf{TD}) = 2\sigma^2 \mathbf{CC}^T \quad (3.64)$$

ed infine

$$\text{cov}(\mathbf{TD}) = 2\sigma^2 \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}. \quad (3.65)$$

In generale le triple differenze $\mathbf{TD}^{jk}(t_{12})$ sono composte dalle due doppie differenze (con i segni dati dalla tabella) relative ai satelliti j e k calcolate al tempo t_1 le stesse due doppie differenze, ma relative al tempo t_2 . Lo stesso fatto vale per le triple differenze $\mathbf{TD}^{jl}(t_{12})$

Epoca	t_1			t_2		
	j	k	l	j	k	l
$\mathbf{TD}^{jk}(t_{12})$	1	-1	0	-1	1	0
$\mathbf{TD}^{jl}(t_{12})$	1	0	-1	-1	0	1

Se consideriamo tre epoche t_1, t_2, t_3 si ha la seguente tabella

Epoca	t_1			t_2			t_3			\mathbf{CC}^T	
	j	k	l	j	k	l	j	k	l		
$\mathbf{TD}^{jk}(t_{12})$	1	-1	0	-1	1	0	0	0	0	4	-2
$\mathbf{TD}^{jk}(t_{23})$	0	0	0	1	-1	0	-1	1	0	-2	4
$\mathbf{TD}^{jk}(t_{12})$	1	-1	0	-1	1	0	0	0	0	4	-1
$\mathbf{TD}^{jl}(t_{12})$	0	0	0	1	0	-1	-1	0	1	-1	4

Posizionamento statico relativo

Consideriamo una survey statica composta da una singola linea di base definita dai punti A e B . I due punti rimangono fermi durante tutta la sessione di osservazione. Assumiamo che entrambi i siti possano osservare gli stessi satelliti alle stesse epoche;

il numero di satelliti sarà indicato con n_j e il numero di epoche di osservazione con n_t . Esprimiamo l'equazione delle singole differenze per ogni epoca e per ogni satellite

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t). \quad (3.66)$$

Il numero totale di osservazioni è dato dal prodotto $n_t n_j$, ed è sottoposto al vincolo

$$n_t n_j \geq 3 + n_j + n_t \quad (3.67)$$

da cui segue

$$n_t \geq \frac{n_j + 3}{n_j - 1}. \quad (3.68)$$

Osserviamo che se $n_j = 1$ non è possibile ricavare una soluzione perchè il denominatore dell'equazione precedente si annulla. Per 2 satelliti si ha $n_t \geq 5$ e per il caso usuale di 4 satelliti si ha $n_t \geq \frac{7}{3}$, da cui $n_t \geq 3$.

Per le doppie differenze sono necessari due satelliti osservati contemporaneamente, ne segue che per n_j satelliti si hanno $n_j - 1$ equazioni alle doppie differenze relative ad una singola epoca. In tal modo il numero totale di equazioni di osservazione diventa $(n_j - 1)n_t$. Dunque si avrà il vincolo definito da

$$(n_j - 1)n_t \geq 3 + (n_j - 1). \quad (3.69)$$

Da cui segue

$$n_j \geq \frac{n_j + 2}{n_j + 1}. \quad (3.70)$$

Perciò il numero minimo di satelliti $n_j = 2$ porge $n_t \geq 4$. Nel caso di 4 è necessario disporre di osservazioni relative ad almeno 2 epoche distinte. Per evitare di utilizzare equazioni di osservazione linearmente dipendenti tra di loro si utilizza un satellite di riferimento. Supponiamo che le misure siano effettuate osservando i satelliti 6, 9, 11, 12, con il satellite 6 usato come riferimento. Allora per ogni epoca possiamo formare le doppie differenze (9-6), (11-6), (12-6).

Per le triple differenze ogni equazione di osservazione contiene le tre incognite relative alle coordinate. Dal momento che per ogni tripla differenza sono necessarie 2 epoche, il numero di equazioni di osservazione linearmente indipendenti sarà $n_t - 1$. Perciò

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \varrho_{AB}^{jk}(t_{12}) \quad (3.71)$$

con il vincolo

$$(n_j - 1)(n_t - 1) \geq 3 \quad (3.72)$$

da cui

$$n_j \geq \frac{n_j + 2}{n_j - 1}. \quad (3.73)$$

Al numero minimo di satelliti $n_j = 2$ corrisponde $n_t \geq 4$. Se $n_j = 2$ allora $n_t \geq 2$.

Capitolo 4

Stima dei parametri

4.0.5 Stima ai minimi quadrati

La tecnica matematica più comune di stima delle coordinate è quella fornita dai minimi quadrati. Le equazioni di osservazione vengono linearizzate attraverso un'espansione in serie di Taylor effettuata rispetto ai parametri da stimare. Questo fatto implica la conoscenza approssimativa a priori dei parametri da stimare. La serie di Taylor permette di esprimere il sistema delle equazioni di osservazione linearizzato come

$$\mathbf{l} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (4.1)$$

dove

\mathbf{l} ... è il vettore delle osservazioni

\mathbf{A} ... è la matrice delle derivate parziali (design matrix)

\mathbf{x} ... è il vettore delle incognite.

Introducendo la varianza a priori e la matrice di covarianza

σ^2 ... varianza a priori

Σ ...matrice di covarianza

si può formare la matrice

$$\mathbf{Q}_l = \frac{1}{\sigma^2}\Sigma, \quad (4.2)$$

da cui si ottiene la matrice dei pesi

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_l^{-1}. \quad (4.3)$$

Se sono disponibili n osservazioni e devono essere stimate u incognite, allora la matrice \mathbf{A} avrà dimensioni $(n \times u)$. Se $n > u$ il sistema è sovradeterminato e non consistente a causa degli errori di misura. Rappresentando gli errori di misura con il vettore \mathbf{n} e sommandolo al vettore delle osservazioni si ottiene l'equazione

$$\mathbf{l} + \mathbf{n} = \mathbf{A}\mathbf{x}. \quad (4.4)$$

La soluzione di questo sistema è unica, nel senso dei minimi quadrati, e si trova imponendo che la somma dei quadrati dei residui sia minima, cioè

$$\mathbf{n}^T \mathbf{P} \mathbf{n} = \text{minimo.} \quad (4.5)$$

Tale condizione si esplicita nelle equazioni normali

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (4.6)$$

con la soluzione

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (4.7)$$

che può essere semplificata ponendo

$$\mathbf{x} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{g} \quad (4.8)$$

dove $\mathbf{G} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$ e $\mathbf{g} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$. La matrice \mathbf{Q}_x segue dall'equazione $\mathbf{x} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$, applicando la legge di propagazione della covarianza

$$\mathbf{Q}_x = (\mathbf{G}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P}) \mathbf{Q}_l (\mathbf{G}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P})^T \quad (4.9)$$

e sostituendo $\mathbf{Q}_l = \mathbf{P}^{-1}$ si ottiene

$$\mathbf{Q}_x = \mathbf{G}^{-1} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (4.10)$$

4.0.6 Linearizzazione

Osserviamo che l'unica funzione presente nelle equazioni di osservazione in cui i parametri suscettibili di stima non compaiono linearmente è quella che rappresenta la distanza geometrica

$$\varrho_i^j(t) = \sqrt{((X^j(t) - X_i)^2 + ((Y^j(t) - Y_i)^2 + ((Z^j(t) - Z_i)^2)} = f(X_i, Y_i, Z_i). \quad (4.11)$$

Assumendo di conoscere le coordinate approssimate (X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0}) del punto possiamo scrivere la distanza approssimata come

$$\varrho_{i0}^j(t) = \sqrt{((X^j(t) - X_{i0})^2 + ((Y^j(t) - Y_{i0})^2 + ((Z^j(t) - Z_{i0})^2)} = f(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0}). \quad (4.12)$$

Utilizzando i valori approssimati le coordinate incognite si possono scrivere come

$$\begin{aligned} X_i &= X_{i0} + \Delta X_i \\ Y_i &= Y_{i0} + \Delta Y_i \\ Z_i &= Z_{i0} + \Delta Z_i \end{aligned} \quad (4.13)$$

dove ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i rappresentano le nove incognite del modello linearizzato. Sostituendo queste variabili nell'equazione della distanza e sviluppando in serie di Taylor

si ha

$$\begin{aligned}
f(X_i, Y_i, Z_i) &= f(X_{i0} + \Delta X_i, Y_{i0} + \Delta Y_i, Z_{i0} + \Delta Z_i) = \\
&f(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0}) + \frac{\partial f(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})}{\partial X_{i0}} \Delta X_i \\
&+ \frac{\partial f(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})}{\partial Y_{i0}} \Delta Y_i + \frac{\partial f(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})}{\partial Z_{i0}} \Delta Z_i + \dots
\end{aligned} \tag{4.14}$$

La serie di Taylor viene troncata al primo termine, altrimenti si perderebbe la dipendenza lineare dai parametri ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i . La forma esplicita delle derivate parziali è

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})}{\partial X_{i0}} &= -\frac{X^j(t) - X_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \\
\frac{\partial f(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})}{\partial Y_{i0}} &= -\frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \\
\frac{\partial f(X_{i0}, Y_{i0}, Z_{i0})}{\partial Z_{i0}} &= -\frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

e rappresentano le coordinate del vettore unità che punta verso il satellite. La forma linearizzata della distanza è

$$\varrho_i^j(t) = \varrho_{i0}^j(t) - \frac{X^j(t) - X_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta Z_i \dots \tag{4.16}$$

4.0.7 Modello linearizzato per il posizionamento puntuale con misure di codice

Nel seguito diamo una descrizione semplificata del modello, includendo solo gli errori di clock e tralasciando gli effetti di troposfera e ionosfera. L'equazione di osservazione per il codice è

$$R_j^i(t) = \varrho_i^j(t) + c\delta^j(t) - c\delta_i(t) \tag{4.17}$$

e linearizzando si ottiene

$$R_j^i(t) = \varrho_{i0}^j(t) - \frac{X^j(t) - X_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta Z_i + \varrho_i^j(t) + c\delta^j(t) - c\delta_i(t) \tag{4.18}$$

equivalente a

$$R_j^i(t) - \varrho_{i0}^j(t) - c\delta^j(t) = -\frac{X^j(t) - X_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta Z_i - c\delta_i(t) \tag{4.19}$$

dove tutte le quantità del membro di destra sono sconosciute. Si suppone inoltre che il bias dell'orologio del satellite sia conosciuto per mezzo del messaggio di navigazione. Le incognite contenute nel modello sono perciò 4: ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i e $\delta_i(t)$. Per

una singola epoca t è quindi necessario disporre di osservazioni di 4 satelliti distinti. Introduciamo le notazioni compatte

$$\begin{aligned} l^j &= R_j^i(t) - \varrho_{i0}^j(t) - c\delta^j(t) \\ a_{X_i}^j &= -\frac{X^j(t) - X_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \\ a_{Y_i}^j &= -\frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \\ a_{Z_i}^j &= -\frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)}. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Le equazioni di osservazione relative ai 4 satelliti sono

$$\begin{aligned} l^1 &= a_{X_i}^1 \Delta X_i + a_{Y_i}^1 \Delta Y_i + a_{Z_i}^1 \Delta Z_i - c\delta_i(t) \\ l^2 &= a_{X_i}^2 \Delta X_i + a_{Y_i}^2 \Delta Y_i + a_{Z_i}^2 \Delta Z_i - c\delta_i(t) \\ l^3 &= a_{X_i}^3 \Delta X_i + a_{Y_i}^3 \Delta Y_i + a_{Z_i}^3 \Delta Z_i - c\delta_i(t) \\ l^4 &= a_{X_i}^4 \Delta X_i + a_{Y_i}^4 \Delta Y_i + a_{Z_i}^4 \Delta Z_i - c\delta_i(t) \end{aligned} \quad (4.21)$$

e introducendo la matrice e i vettori

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{X_i}^1 & a_{Y_i}^1 & a_{Z_i}^1 & -c \\ a_{X_i}^2 & a_{Y_i}^2 & a_{Z_i}^2 & -c \\ a_{X_i}^3 & a_{Y_i}^3 & a_{Z_i}^3 & -c \\ a_{X_i}^4 & a_{Y_i}^4 & a_{Z_i}^4 & -c \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ \delta_i(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l^1 \\ l^2 \\ l^3 \\ l^4 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

il sistema può essere rappresentato nella forma

$$\mathbf{l} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (4.23)$$

4.0.8 Modello linearizzato di posizionamento puntuale per mezzo di misure di fase

Il procedimento di linearizzazione è simile a quello utilizzato nella sezione precedente. L'osservabile linearizzata si scrive

$$\begin{aligned} \lambda\Phi_i^j(t) - \varrho_{i0}^j(t) - c\delta^j(t) &= -\frac{X^j(t) - X_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta X_i \\ &\quad - \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\varrho_{i0}^j(t)} \Delta Z_i + \lambda N_i^j - c\delta_i(t) \end{aligned} \quad (4.24)$$

rispetto alle misure effettuate con il codice il numero di incognite è incrementato del numero delle ambiguità. Considerando 4 satelliti ed utilizzando la notazione matriciale si ha

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \lambda\Phi_i^1(t) - \varrho_{i0}^1(t) - c\delta^1(t) \\ \lambda\Phi_i^2(t) - \varrho_{i0}^2(t) - c\delta^2(t) \\ \lambda\Phi_i^3(t) - \varrho_{i0}^3(t) - c\delta^3(t) \\ \lambda\Phi_i^4(t) - \varrho_{i0}^4(t) - c\delta^4(t) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{X_i}^1 & a_{Y_i}^1 & a_{Z_i}^1 & \lambda & 0 & 0 & 0 & -c \\ a_{X_i}^2 & a_{Y_i}^2 & a_{Z_i}^2 & 0 & \lambda & 0 & 0 & -c \\ a_{X_i}^3 & a_{Y_i}^3 & a_{Z_i}^3 & 0 & 0 & \lambda & 0 & -c \\ a_{X_i}^4 & a_{Y_i}^4 & a_{Z_i}^4 & 0 & 0 & 0 & \lambda & -c \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{x}^T = [\Delta X_i \quad \Delta Y_i \quad \Delta Z_i \quad N_i^1 \quad N_i^2 \quad N_i^3 \quad N_i^4 \quad \delta_i(t)] \quad (4.27)$$

Osserviamo che il precedente è un sistema di 4 equazioni in 8 incognite. Questo riflette il fatto che il posizionamento puntuale con misure di fase non può essere effettuato per una singola epoca. Inoltre ogni epoca addizionale aumenta il numero di incognite di un termine dovuto all'errore di orologio. Ne segue che considerando due epoche si hanno otto equazioni in nove incognite (e il sistema rimane sottodeterminato). Per tre epoche il problema diventa sovradeterminato, perchè il numero di equazioni è 12 e il numero di incognite è 10. In quest'ultimo caso le incognite sono 1) le correzioni alle coordinate $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$, 1) le ambiguità N^1, N^2, N^3, N^4 relative ai 4 satelliti, 3) gli errori di orologio del ricevitore $\delta_i(t_1), \delta_i(t_2), \delta_i(t_3)$. Le matrici delle osservazioni, delle incognite e delle derivate parziali sono

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \lambda \Phi_i^1(t_1) - \varrho_{i0}^1(t_1) - c\delta^1(t_1) \\ \lambda \Phi_i^2(t_1) - \varrho_{i0}^2(t_1) - c\delta^2(t_1) \\ \lambda \Phi_i^3(t_1) - \varrho_{i0}^3(t_1) - c\delta^3(t_1) \\ \lambda \Phi_i^4(t_1) - \varrho_{i0}^4(t_1) - c\delta^4(t_1) \\ \lambda \Phi_i^1(t_2) - \varrho_{i0}^1(t_2) - c\delta^1(t_2) \\ \lambda \Phi_i^2(t_2) - \varrho_{i0}^2(t_2) - c\delta^2(t_2) \\ \lambda \Phi_i^3(t_2) - \varrho_{i0}^3(t_2) - c\delta^3(t_2) \\ \lambda \Phi_i^4(t_2) - \varrho_{i0}^4(t_2) - c\delta^4(t_2) \\ \lambda \Phi_i^1(t_3) - \varrho_{i0}^1(t_3) - c\delta^1(t_3) \\ \lambda \Phi_i^2(t_3) - \varrho_{i0}^2(t_3) - c\delta^2(t_3) \\ \lambda \Phi_i^3(t_3) - \varrho_{i0}^3(t_3) - c\delta^3(t_3) \\ \lambda \Phi_i^4(t_4) - \varrho_{i0}^4(t_4) - c\delta^4(t_4) \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ N_i^1 \\ N_i^2 \\ N_i^3 \\ N_i^4 \\ \delta_i(t_1) \\ \delta_i(t_2) \\ \delta_i(t_3) \\ \delta_i(t_4) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{X_i}^1(t_1) & a_{Y_i}^1(t_1) & a_{Z_i}^1(t_1) & \lambda & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 \\ a_{X_i}^2(t_1) & a_{Y_i}^2(t_1) & a_{Z_i}^2(t_1) & 0 & \lambda & 0 & 0 & -c & 0 & 0 \\ a_{X_i}^3(t_1) & a_{Y_i}^3(t_1) & a_{Z_i}^3(t_1) & 0 & 0 & \lambda & 0 & -c & 0 & 0 \\ a_{X_i}^4(t_1) & a_{Y_i}^4(t_1) & a_{Z_i}^4(t_1) & 0 & 0 & 0 & \lambda & -c & 0 & 0 \\ a_{X_i}^1(t_2) & a_{Y_i}^1(t_2) & a_{Z_i}^1(t_2) & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 \\ a_{X_i}^2(t_2) & a_{Y_i}^2(t_2) & a_{Z_i}^2(t_2) & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & -c & 0 \\ a_{X_i}^3(t_2) & a_{Y_i}^3(t_2) & a_{Z_i}^3(t_2) & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & -c & 0 \\ a_{X_i}^4(t_2) & a_{Y_i}^4(t_2) & a_{Z_i}^4(t_2) & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & -c & 0 \\ a_{X_i}^1(t_3) & a_{Y_i}^1(t_3) & a_{Z_i}^1(t_3) & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c \\ a_{X_i}^2(t_3) & a_{Y_i}^2(t_3) & a_{Z_i}^2(t_3) & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & -c \\ a_{X_i}^3(t_3) & a_{Y_i}^3(t_3) & a_{Z_i}^3(t_3) & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & -c \\ a_{X_i}^4(t_3) & a_{Y_i}^4(t_3) & a_{Z_i}^4(t_3) & 0 & 0 & 0 & \lambda & 0 & 0 & -c \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

4.0.9 Modello linearizzato per il posizionamento relativo

Consideriamo il modello matematico delle doppie differenze di fase

$$\lambda\Phi_{AB}^{jk}(t) = \varrho_{AB}^{jk}(t) + \lambda N_{AB}^{jk} \quad (4.30)$$

dove il termine $\varrho_{AB}^{jk}(t)$ si scrive in modo esplicito come

$$\varrho_{AB}^{jk}(t) = \varrho_B^k(t) - \varrho_B^j(t) - \varrho_A^k(t) + \varrho_A^j(t) \quad (4.31)$$

che riflette il fatto che un'equazione alle doppie differenze combina le informazioni contenute in quattro misure simultanee. Ciascuno di questi quattro termini deve essere linearizzato

$$\begin{aligned} \varrho_{AB}^{jk}(t) = & \varrho_{B0}^k(t) - \frac{X^k(t) - X_{B0}}{\varrho_{B0}^k(t)} \Delta X_B - \frac{Y^k(t) - Y_{B0}}{\varrho_{B0}^k(t)} \Delta Y_B \\ & - \frac{Z^k(t) - Z_{B0}}{\varrho_{B0}^k(t)} \Delta Z_B \\ & - \varrho_{B0}^j(t) + \frac{X^j(t) - X_{B0}}{\varrho_{B0}^j(t)} \Delta X_B + \frac{Y^j(t) - Y_{B0}}{\varrho_{B0}^j(t)} \Delta Y_B \\ & + \frac{Z^j(t) - Z_{B0}}{\varrho_{B0}^j(t)} \Delta Z_B \\ & - \varrho_{A0}^k(t) + \frac{X^k(t) - X_{A0}}{\varrho_{A0}^k(t)} \Delta X_A + \frac{Y^k(t) - Y_{A0}}{\varrho_{A0}^k(t)} \Delta Y_A \\ & + \frac{Z^k(t) - Z_{A0}}{\varrho_{A0}^k(t)} \Delta Z_A \\ & + \varrho_{A0}^j(t) + \frac{X^j(t) - X_{A0}}{\varrho_{A0}^j(t)} \Delta X_A + \frac{Y^j(t) - Y_{A0}}{\varrho_{A0}^j(t)} \Delta Y_A \\ & + \frac{Z^j(t) - Z_{A0}}{\varrho_{A0}^j(t)} \Delta Z_A \end{aligned} \quad (4.32)$$

da cui si ottiene l'osservabile alle doppie differenze linearizzata

$$\begin{aligned} l_{AB}^{jk}(t) = & a_{X_A}^{jk}(t) \Delta X_A + a_{Y_A}^{jk}(t) \Delta Y_A + a_{Z_A}^{jk}(t) \Delta Z_A \\ & + a_{X_B}^{jk}(t) \Delta X_B + a_{Y_B}^{jk}(t) \Delta Y_B + a_{Z_B}^{jk}(t) \Delta Z_B + \lambda N_{AB}^{jk} \end{aligned} \quad (4.33)$$

dove il membro di sinistra è

$$l_{AB}^{jk}(t) = \lambda\Phi_{AB}^{jk}(t) - \varrho_{B0}^k(t) - \varrho_{B0}^j(t) + \varrho_{A0}^k(t) - \varrho_{A0}^j(t) \quad (4.34)$$

e comprende sia le quantità misurate sia i termini calcolati per mezzo della conoscenza approssimata delle coordinate. Nelle formule precedenti sono state utilizzate le

abbreviazioni

$$\begin{aligned}
a_{X_A}^{jk}(t) &= \frac{X^k(t) - X_{A0}}{\varrho_{A0}^k(t)} - \frac{X^j(t) - X_{A0}}{\varrho_{A0}^j(t)} \\
a_{Y_A}^{jk}(t) &= \frac{Y^k(t) - Y_{A0}}{\varrho_{A0}^k(t)} - \frac{Y^j(t) - Y_{A0}}{\varrho_{A0}^j(t)} \\
a_{Z_A}^{jk}(t) &= \frac{Z^k(t) - Z_{A0}}{\varrho_{A0}^k(t)} - \frac{Z^j(t) - Z_{A0}}{\varrho_{A0}^j(t)} \\
a_{X_B}^{jk}(t) &= -\frac{X^k(t) - X_{B0}}{\varrho_{B0}^k(t)} + \frac{X^j(t) - X_{B0}}{\varrho_{B0}^j(t)} \\
a_{Y_B}^{jk}(t) &= -\frac{Y^k(t) - Y_{B0}}{\varrho_{B0}^k(t)} + \frac{Y^j(t) - Y_{B0}}{\varrho_{B0}^j(t)} \\
a_{Z_B}^{jk}(t) &= -\frac{Z^k(t) - Z_{B0}}{\varrho_{B0}^k(t)} + \frac{Z^j(t) - Z_{B0}}{\varrho_{B0}^j(t)}.
\end{aligned} \tag{4.35}$$

Osserviamo che per effettuare il posizionamento relativo devono essere conosciute le coordinate di un punto (ad esempio il punto A). Più specificatamente la conoscenza delle coordinate del punto A riduce il numero di incognite di tre perchè

$$\Delta X_A = \Delta Y_A = \Delta Z_A = 0 \tag{4.36}$$

e comporta un piccolo cambiamento nel termine di sinistra

$$l_{AB}^{jk}(t) = \lambda \Phi_{AB}^{jk}(t) - \varrho_{B0}^k(t) - \varrho_{B0}^j(t) + \varrho_A^k(t) - \varrho_A^j(t). \tag{4.37}$$

Assumendo di osservare quattro satelliti j, k, l, m alle due epoche t_1 e t_2 le matrici del sistema sono

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_{AB}^{jk}(t_1) \\ l_{AB}^{jl}(t_1) \\ l_{AB}^{jm}(t_1) \\ l_{AB}^{jk}(t_2) \\ l_{AB}^{jl}(t_2) \\ l_{AB}^{jm}(t_2) \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \\ N_{AB}^{jk} \\ N_{AB}^{jl} \\ N_{AB}^{jm} \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{X_B}^{jk}(t_1) & a_{Y_B}^{jk}(t_1) & a_{Z_B}^{jk}(t_1) & \lambda & 0 & 0 \\ a_{X_B}^{jl}(t_1) & a_{Y_B}^{jl}(t_1) & a_{Z_B}^{jl}(t_1) & 0 & \lambda & 0 \\ a_{X_B}^{jm}(t_1) & a_{Y_B}^{jm}(t_1) & a_{Z_B}^{jm}(t_1) & 0 & 0 & \lambda \\ a_{X_B}^{jk}(t_2) & a_{Y_B}^{jk}(t_2) & a_{Z_B}^{jk}(t_2) & \lambda & 0 & 0 \\ a_{X_B}^{jl}(t_2) & a_{Y_B}^{jl}(t_2) & a_{Z_B}^{jl}(t_2) & 0 & \lambda & 0 \\ a_{X_B}^{jm}(t_2) & a_{Y_B}^{jm}(t_2) & a_{Z_B}^{jm}(t_2) & 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \tag{4.39}$$

che rappresenta un sistema di equazioni determinato.

Capitolo 5

Combinazione delle equazioni normali

5.1 Introduzione

Nei precedenti capitoli abbiamo descritto il significato fisico delle osservabili GPS, evidenziando il legame esistente tra le misure di fase, o di codice, e le coordinate del ricevitore. Abbiamo verificato che tale relazione è lineare nella distanza trasmettitore-ricevitore, e negli errori associati a clock, troposfera e ionosfera. Il problema immediatamente seguente consiste nella definizione di un metodo matematico che consenta di trasferire l'informazione contenuta nelle osservazioni nella conoscenza delle coordinate del ricevitore. Tale problema è affrontato dalla teoria della stima statistica.

Nell'ambito della geodesia utilizzando osservabili GPS, la teoria della stima statistica viene utilizzata in due momenti distinti: 1) stima delle posizioni a partire dai dati di osservazione, 2) combinazione delle soluzioni. In generale, il primo punto serve a ricavare la posizione e la posizione dei siti durante una sessione di misura, mentre il secondo punto permette di combinare tra di loro i risultati di diverse sessioni. Questo approccio permette di ottenere una maggiore efficienza computazionale e una maggior flessibilità per ciò che riguarda il processo di elaborazione, e consente di risolvere il problema della definizione del sistema di riferimento.

Nel seguente capitolo descriviamo il metodo di stima ai minimi quadrati e i concetti di: pre-eliminazione dei parametri, introduzione dei vincoli e combinazione delle equazioni normali. Quanto descriviamo si basa su [6], [9], [4], [23], [51] e [52].

5.2 Il modello di Gauss-Markoff

Supponiamo che le osservabili siano delle funzioni lineari, in tal caso un'osservazione effettuata all'epoca t_i potrà essere rappresentata da un'equazione lineare nella seguente forma:

$$y_i = X_{i1}\beta_1 + X_{i2}\beta_2 + X_{i3}\beta_3 + \dots + X_{ij}\beta_j \quad (5.1)$$

dove X_{i1} ($i = 1..n$) sono dei coefficienti conosciuti e β_u ($u = 1..u$) sono i parametri da stimare. Il corrispondente modello di Gauss-Markoff assume allora la seguente forma, utilizzando la notazione matriciale:

$$E(y) = X\beta, \quad D(y) = \sigma^2 P^{-1} \quad (5.2)$$

dove X è una matrice $n \times u$ di rango pieno, y è un vettore di dimensione n che rappresenta le osservazioni, β è un vettore di dimensione u che rappresenta i parametri da stimare ed E e D rappresentano gli operatori di aspettazione e dispersione, rispettivamente. Il parametro σ è sconosciuto e viene detto varianza di peso unitario (coincide con la varianza delle osservazioni se la matrice P è la matrice identità). Se ipotizziamo la presenza di errori nelle osservazioni, con valore di aspettazione nullo, possiamo scrivere equivalentemente:

$$y + e = X\beta, \quad E(e) = 0, \quad D(e) = D(y) = \sigma^2 P^{-1} \quad (5.3)$$

5.2.1 Metodo dei minimi quadrati

Il sistema (5.3) non ha una soluzione unica. Per trovare una soluzione nel senso dei minimi quadrati è necessario aggiungere un'ulteriore condizione. Scegliamo di assumere come soluzione quell'insieme di parametri che minimizza la seguente forma quadratica:

$$\Omega(\beta) = \frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta)^T \mathbf{P} (\mathbf{y} - \mathbf{X}\beta). \quad (5.4)$$

Il punto di minimo si ottiene imponendo l'annullarsi del gradiente della forma quadratica:

$$\frac{\partial \Omega(\beta)}{\partial \beta} = \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\mathbf{y}^T \mathbf{X}\beta + \beta^T \mathbf{X}^T \mathbf{X}\beta}{\sigma^2} \right) = \mathbf{0} \quad (5.5)$$

da cui si ottiene:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} \hat{\beta} = \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{y}. \quad (5.6)$$

Il sistema (5.6) viene detto sistema delle equazioni normali. Una volta determinato il vettore di parametri $\hat{\beta}$ è possibile determinare una stima del vettore y , che definiamo come \hat{y} , sostituendo il vettore $\hat{\beta}$ nelle equazioni (5.1). I residui si definiscono analogamente come:

$$\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}, \quad \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\beta}. \quad (5.7)$$

La stima dedotta dal sistema (5.6) ha un'interpretazione geometrica: sia $R(X)$ lo spazio colonne definito dalla matrice X , cioè:

$$R(\mathbf{X}) = \{\mathbf{z} | \mathbf{z} \in \mathbf{X}\beta\} \quad (5.8)$$

è uno spazio di dimensione u (dall'ipotesi di rango pieno per la matrice X) nel quale si deve stimare il vettore $X\beta$. Lo stimatore $\hat{\beta}$, nel senso dei minimi quadrati, viene determinato in modo tale che il vettore $X\hat{\beta}$ sia una proiezione ortogonale del vettore

di osservazioni $y \in R^n$ nello spazio colonne di X . Ricordiamo che data una matrice X , il proiettore ortogonale R ad essa associato si scrive come:

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \quad (5.9)$$

da cui:

$$\mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{R} \mathbf{y} = \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.10)$$

equivalente alla (5.6) nel caso che $\mathbf{P} = \mathbf{I}$. Se $\mathbf{P} \neq \mathbf{I}$ è sempre possibile trovare una trasformazione lineare che permetta di ridurre la matrice dei pesi ad una matrice identità.

5.2.2 Linearizzazione

Nel caso che le equazioni di osservazione non siano lineari nei parametri da stimare, è necessario procedere alla loro linearizzazione. Definiamo il sistema delle osservazioni come:

$$\mathbf{y} + \mathbf{e} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\beta}), \quad \mathbf{E}(\mathbf{e}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{D}(\mathbf{y}) = \sigma^2 \mathbf{P}^{-1} \quad (5.11)$$

dove $\mathbf{f}(\boldsymbol{\beta})$ è una funzione differenziabile nei parametri $\boldsymbol{\beta}$. Supponiamo che $\boldsymbol{\beta}_0$ sia una stima approssimata dei parametri $\boldsymbol{\beta}$. Allora possiamo scrivere:

$$\mathbf{f}(\boldsymbol{\beta}) = \mathbf{f}(\boldsymbol{\beta}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\beta}} \right|_{\boldsymbol{\beta}=\boldsymbol{\beta}_0} (\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0) \quad (5.12)$$

da cui, ponendo:

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{f}(\boldsymbol{\beta}_0) \quad (5.13)$$

$$\mathbf{X} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\beta}} \right|_{\boldsymbol{\beta}=\boldsymbol{\beta}_0} \quad (5.14)$$

$$\Delta \boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0 \quad (5.15)$$

possiamo ottenere il seguente sistema delle equazioni normali:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} \Delta \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{P} \Delta \mathbf{y}. \quad (5.16)$$

Mentre le stime per \mathbf{y} e $\Delta \boldsymbol{\beta}$ sono date da:

$$\mathbf{y} = \Delta \hat{\mathbf{y}} + \mathbf{f}(\boldsymbol{\beta}_0), \quad \hat{\boldsymbol{\beta}} = \Delta \hat{\boldsymbol{\beta}} + \boldsymbol{\beta}_0. \quad (5.17)$$

Per linearizzare le equazioni di osservazione è necessario che il vettore $\boldsymbol{\beta}_0$ approssimi abbastanza bene il vettore $\boldsymbol{\beta}$ per permettere di troncatura la funzione f al primo ordine nello sviluppo di Taylor. In generale il processo di stima basato sulle equazioni di osservazione linearizzate richiede di essere iterato alcune volte.

5.3 Il modello di Gauss-Markoff con vincoli sui parametri.

Supponiamo di aggiungere al sistema delle equazioni di osservazione (5.3) un ulteriore sotto-sistema, rappresentato dalla matrice H :

$$\begin{cases} \mathbf{E}(\mathbf{y}) = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}, & \mathbf{D}(\mathbf{y}) = \sigma^2 \mathbf{P}^{-1} \\ \mathbf{H}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{w} \end{cases} \quad (5.18)$$

dove \mathbf{H} è una matrice di dimensione $r \times u$ (con $r < u$), detta matrice dei vincoli, e \mathbf{w} è un vettore di costanti conosciute, di dimensione r . Ci proponiamo di risolvere il problema attraverso una stima ai minimi quadrati che soddisfi i vincoli.

5.3.1 Minimi quadrati vincolati

in questo caso il problema ai minimi quadrati diventa vincolato. Per risolverlo è necessario minimizzare la funzione di Lagrange:

$$\mathbf{L}(\boldsymbol{\beta}) = \frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})^T \mathbf{P} (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) + \frac{2\mathbf{k}^T}{\sigma^2} (\mathbf{H}\boldsymbol{\beta} - \mathbf{w}) \quad (5.19)$$

dove il vettore \mathbf{k} ($\dim(\mathbf{k}) = r$) rappresenta i moltiplicatori di Lagrange. Il gradiente della funzione $\mathbf{L}(\boldsymbol{\beta})$ è:

$$\frac{\partial \mathbf{L}(\boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}} = \frac{1}{\sigma^2} (-2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + 2\mathbf{H}^T \mathbf{k}) \quad (5.20)$$

da cui si ottiene il seguente sistema di equazioni normali:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\boldsymbol{\beta}} \\ \mathbf{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{y} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix}. \quad (5.21)$$

Risolvendo il sistema delle equazioni normali (5.21) si ottengono le seguenti stime:

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{\beta}} &= \hat{\boldsymbol{\beta}} - (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{H}^T)^{-1} (\mathbf{H} \hat{\boldsymbol{\beta}} - \mathbf{w}) \\ \mathbf{D}(\tilde{\boldsymbol{\beta}}) &= \sigma^2 ((\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} - (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{H}^T)^{-1} \mathbf{H} (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1}) \\ \tilde{\Omega} &= \mathbf{y}^T \mathbf{P} \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{P} \mathbf{X} \tilde{\boldsymbol{\beta}} - \mathbf{w}^T \mathbf{k} = \Omega + (\tilde{\boldsymbol{\beta}} - \hat{\boldsymbol{\beta}})^T (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} (\tilde{\boldsymbol{\beta}} - \hat{\boldsymbol{\beta}}) \\ \tilde{\sigma}^2 &= \frac{\tilde{\Omega}}{n - u + r} \end{aligned} \quad (5.22)$$

dove $\tilde{\boldsymbol{\beta}}$, $\tilde{\Omega}$, $\tilde{\sigma}^2$ rappresentano stima dei parametri, forma quadratica e varianza del peso unitario per il problema vincolato, mentre $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ rappresenta la stima dei parametri per il problema libero. La quantità $\tilde{\Omega} - \Omega$ rappresenta la misura dell'effetto dell'introduzione di un vincolo.

5.4 Pre eliminazione dei parametri

In questa sezione descriviamo il principio su cui si fonda la pre-eliminazione dei parametri. Tale procedimento permette di ridurre le dimensioni del sistema delle equazioni normali, eliminando i parametri che non interessa stimare. Vedremo nei capitoli successivi che tale procedimento è essenziale nello studio delle serie storiche di stazioni permanenti.

Supponiamo di avere un sistema di equazioni normali nella forma:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\beta}_1 \\ \boldsymbol{\beta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

Dove abbiamo suddiviso il vettore \mathbf{B} di parametri da stimare nei vettori $\boldsymbol{\beta}_1$ e $\boldsymbol{\beta}_2$:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\beta}_1 \\ \boldsymbol{\beta}_2 \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

Siamo interessati ad eliminare il vettore $\boldsymbol{\beta}_2$, perciò moltiplichiamo la seconda riga del sistema di equazioni normali per la matrice:

$$-\mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}$$

sommando le due righe si ottiene

$$(\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{12})\boldsymbol{\beta}_1 = \mathbf{B}_1 - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{b}_2. \quad (5.25)$$

In questo secondo sistema non è più esplicitamente presente il vettore $\boldsymbol{\beta}_2$, anche se il sistema continua a mantenere tutta l'informazione relativa ad esso. La forma quadratica associata a questo nuovo sistema si calcola nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \Omega &= \mathbf{y}'\mathbf{P}\mathbf{y} - \mathbf{y}'\mathbf{P}\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \\ &= \mathbf{y}'\mathbf{P}\mathbf{y} - (\mathbf{b}'_1\mathbf{b}'_2) \begin{pmatrix} \boldsymbol{\beta}_1 \\ \boldsymbol{\beta}_2 \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{y}'\mathbf{P}\mathbf{y} - \mathbf{b}'_1\boldsymbol{\beta}_1 - \mathbf{b}'_2\mathbf{N}_{22}^{-1}(\mathbf{b}_2 - \mathbf{N}_{21}\boldsymbol{\beta}_1) \\ &= \mathbf{y}'\mathbf{P}\mathbf{y} - \mathbf{b}'_1\boldsymbol{\beta}_1 - \mathbf{b}'_2\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{b}_2 - \mathbf{b}'_2\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{21}\boldsymbol{\beta}_1 \\ &= \mathbf{y}'\mathbf{P}\mathbf{y} - \boldsymbol{\beta}'_1(\mathbf{b}_1 - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{b}_2) - \mathbf{b}'_2\mathbf{N}_{22}\mathbf{b}_2 \end{aligned} \quad (5.26)$$

La forma quadratica relativa all'equazione

$$(\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{12})\boldsymbol{\beta}_1 = \mathbf{B}_1 - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{b}_2$$

è stata corretta dal termine

$$\mathbf{c} = -\mathbf{b}'_2\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{b}_2. \quad (5.27)$$

Il parametro $\boldsymbol{\beta}_2$ può essere ricalcolato mediante:

$$\boldsymbol{\beta}_2 = \mathbf{N}_{22}^{-1}(\mathbf{b}_2 - \mathbf{N}_{21}\boldsymbol{\beta}_1). \quad (5.28)$$

La matrici di covarianza dei vettori β_1 e β_2 si determinano mediante la legge di propagazione degli errori:

$$\mathbf{Q}_{\beta_2\beta_2} = \mathbf{N}_{22}^{-1} + \mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{21} (\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{12})^{-1} \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1} \quad (5.29)$$

$$\mathbf{Q}_{\beta_1\beta_1} = (\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{12})^{-1}. \quad (5.30)$$

Utilizzando l'identità matriciale:

$$(\mathbf{A}^{-1} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})^{-1} = \mathbf{A} + \mathbf{A}\mathbf{B}(\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A} \quad (5.31)$$

la matrice $\mathbf{Q}_{\beta_1\beta_1}$ può essere riscritta come

$$\mathbf{Q}_{\beta_1\beta_1} = \mathbf{N}_{11}^{-1} + \mathbf{N}_{11}^{-1}\mathbf{N}_{21} (\mathbf{N}_{22} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{11}^{-1}\mathbf{N}_{12})^{-1} \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{11}^{-1}. \quad (5.32)$$

La somiglianza con la matrice $\mathbf{Q}_{\beta_2\beta_2}$ è dovuta al fatto che la selezione degli indici è arbitraria.

Invertendo il sistema di equazioni normali nella forma partizionata si ha

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{pmatrix}^{-1} \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{11}^{-1} + \mathbf{N}_{11}^{-1}\mathbf{N}_{21} (\mathbf{N}_{22} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{11}^{-1}\mathbf{N}_{12})^{-1} \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{11}^{-1} & - (\mathbf{N}_{22} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{11}^{-1}\mathbf{N}_{12})^{-1} \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{11}^{-1} \\ -\mathbf{N}_{11}^{-1}\mathbf{N}_{12} (\mathbf{N}_{22} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{11}^{-1}\mathbf{N}_{12})^{-1} & (\mathbf{N}_{22} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{11}^{-1}\mathbf{N}_{12})^{-1} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.33)$$

ed è evidente che la matrice $\mathbf{Q}_{\beta_1\beta_1}$ si ottiene dalla matrice di covarianza iniziale eliminando le righe e le colonne relative al vettore β_2 .

5.5 Combinazione delle equazioni normali

Il concetto fondamentale su cui si basa la stima sequenziale di parametri è che i risultati ottenuti elaborando tutti i dati in un unico passo coincidono con quelli ottenuti suddividendo in varie parti indipendenti l'elaborazione, e poi combinando tali parti in un'unica soluzione globale. Per provare questo concetto risolviamo lo stesso problema in un unico passo e poi confrontiamo i risultati con quelli ottenuti risolvendo lo stesso problema sequenzialmente. sia \mathbf{y}_c il vettore delle osservazioni, indichiamo le equazioni di osservazione con la scrittura

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_1 + \mathbf{v}_1 &= \mathbf{A}_1\mathbf{p}_c & \mathbf{D}(\mathbf{y}_1) &= \sigma_1^2\mathbf{P}_1^{-1} \\ \mathbf{y}_2 + \mathbf{v}_2 &= \mathbf{A}_2\mathbf{p}_c & \mathbf{D}(\mathbf{y}_2) &= \sigma_2^2\mathbf{P}_2^{-1}. \end{aligned} \quad (5.34)$$

In questo caso abbiamo diviso il vettore \mathbf{y}_c in due serie indipendenti di osservazioni $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2$. Siamo intenzionati a stimare il vettore \mathbf{p}_c dei parametri comuni a entrambe le serie di osservazioni, assumendo che non esista alcun parametro che sia caratteristico di un'unica serie di osservazioni. La dimostrazione che il metodo sequenziale è equivalente al metodo batch è basata sull'assunzione che le due serie di osservazioni siano indipendenti.

5.5.1 Stima batch

Le equazioni precedenti si possono riscrivere in forma matriciale come

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix} [\mathbf{p}_c] \quad (5.35)$$

con

$$\mathbf{D} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix} \right) = \sigma_c^2 \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_2^{-1} \end{bmatrix}. \quad (5.36)$$

Con una notazione compatta le precedenti equazioni si scrivono come

$$\mathbf{y}_c + \mathbf{v}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{p}_c \quad \mathbf{D}(\mathbf{y}_c) = \sigma_c^2 \mathbf{P}_c^{-1}. \quad (5.37)$$

L'indipendenza delle due serie di osservazioni è data dalla forma della matrice di dispersione (diagonale a blocchi). Il sistema delle equazioni normali è quindi

$$[\mathbf{A}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_2] [\hat{\mathbf{p}}_c] = [\mathbf{A}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{y}_1 + \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{y}_2] \quad (5.38)$$

5.5.2 Stima sequenziale

Nel primo passo di elaborazione l'algoritmo di stima sequenziale tratta ogni serie di osservazioni come indipendente. La stima dei parametri incogniti è effettuata solo utilizzando le osservazioni contenute in quella specifica serie osservativa. Nel successivo passo di elaborazione viene determinato il contributo di ciascuna stima parziale dei parametri alla soluzione globale. Utilizzando le notazioni della sezione precedente scriviamo le equazioni di osservazione

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_1 + \mathbf{v}_1 &= \mathbf{A}_1 \mathbf{p}_c & \mathbf{D}(\mathbf{y}_1) &= \sigma_1^2 \mathbf{P}_1^{-1} \\ \mathbf{y}_2 + \mathbf{v}_2 &= \mathbf{A}_2 \mathbf{p}_c & \mathbf{D}(\mathbf{y}_2) &= \sigma_2^2 \mathbf{P}_2^{-1} \end{aligned} \quad (5.39)$$

o più generalmente

$$\mathbf{y}_i + \mathbf{v}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{p} \quad \mathbf{D}(\mathbf{y}_i) = \sigma_i^2 \mathbf{P}_i^{-1}. \quad i = 1, 2 \quad (5.40)$$

dove il vettore \mathbf{p} indica quel sottoinsieme di parametri comuni del vettore \mathbf{p}_c relativi all' i -esima serie di osservazioni.

Ogni sistema individuale di equazioni normali si scrive

$$\begin{aligned} [\mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i] [\hat{\mathbf{p}}_i] &= \mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{y}_i \\ \mathbf{D}(\mathbf{p}_i) &= \hat{\sigma}^2 \quad \frac{2}{i} (\mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i)^{-1} = \hat{\sigma}_i^2 \boldsymbol{\Sigma}_i \end{aligned} \quad (5.41)$$

dove $\boldsymbol{\Sigma}_i$ indica la matrice dei pesi. Nel secondo passo di elaborazione deriviamo la stima per il vettore $\hat{\mathbf{p}}_c$ utilizzando i risultati delle soluzioni parziali appena trovate. I vettori \mathbf{p}_1 e \mathbf{p}_2 vengono utilizzati come pseudo-osservazioni. Il sistema delle pseudo-osservazioni ha la forma

$$\mathbf{y}_p + \mathbf{v}_p = \mathbf{A}_p \hat{\mathbf{p}}_c \quad \mathbf{D}(\mathbf{y}_p) = \sigma_c^2 \mathbf{P}_p^{-1} \quad (5.42)$$

ed esplicitamente

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{p}}_1 \\ \hat{\mathbf{p}}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{p1} \\ \mathbf{v}_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{p}}_c \quad \mathbf{D} \left(\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{p}}_1 \\ \hat{\mathbf{p}}_2 \end{bmatrix} \right) = \sigma_c^2 \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Sigma}_2 \end{bmatrix}. \quad (5.43)$$

I risultati delle stime parziali vengono utilizzati per ottenere la stima globale. Ogni stima parziale è introdotta come una nuova osservazione nel sistema di pseudo-osservazioni utilizzando la matrice di covarianza associata come matrice dei pesi. Il sistema di equazioni normali è

$$[\mathbf{A}_p^T \mathbf{P}_p \mathbf{A}_p] \hat{\mathbf{p}}_c = \mathbf{A}_p^T \mathbf{P}_p \mathbf{y}_p \quad (5.44)$$

ed in forma esplicita

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}^T & \mathbf{I}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_1^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Sigma}_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} \hat{\mathbf{p}}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^T & \mathbf{I}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_1^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Sigma}_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{p}}_1 \\ \hat{\mathbf{p}}_2 \end{bmatrix}. \quad (5.45)$$

Sostituendo $\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}$ si ha

$$[\mathbf{A}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A}_2] [\hat{\mathbf{p}}_c] = [\mathbf{A}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{y}_1 + \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 \mathbf{y}_2], \quad (5.46)$$

identica all'equazioni trovata con il metodo batch. La sovrapposizione delle equazioni normali (detta stacking) è sempre possibile se le serie di osservazioni sono indipendenti (cioè la matrice di dispersione è diagonale a blocchi).

5.6 Trasformazione dei parametri.

Lo stacking delle equazioni normali descritto nel capitolo precedente può essere effettuato solo se tutte le equazioni normali si riferiscono agli stessi valori a priori dei parametri da stimare. Se questo non è vero allora è necessario prima effettuare una trasformazione dei parametri per avere lo stesso insieme di valori a priori.

Consideriamo il seguente sistema di equazioni di osservazione linearizzato:

$$\Delta \mathbf{y} + \mathbf{e} = \mathbf{X} \Delta \boldsymbol{\beta}; \quad D(\Delta \mathbf{y}) = \sigma^2 \mathbf{P}^{-1}. \quad (5.47)$$

Il corrispondente set di equazioni normali è

$$\mathbf{X}' \mathbf{P} \mathbf{X} \Delta \boldsymbol{\beta} = \mathbf{X}' \mathbf{P} \Delta \mathbf{y} \quad (5.48)$$

e in forma abbreviata

$$\mathbf{X} \mathbf{N} \Delta \boldsymbol{\beta} = \mathbf{b} \quad (5.49)$$

con $\mathbf{N} = \mathbf{X}' \mathbf{P} \mathbf{X}$ e $\mathbf{b} = \mathbf{X}' \mathbf{P} \Delta \mathbf{y}$. Supponiamo che la trasformazione del parametro $\Delta \boldsymbol{\beta}$ si data da

$$\Delta \boldsymbol{\beta} = \mathbf{B} \Delta \tilde{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{d} \boldsymbol{\beta} \quad (5.50)$$

e introduciamo questa relazione nelle equazioni di osservazione. Otteniamo

$$\Delta \mathbf{y} - \mathbf{X} \mathbf{d} \boldsymbol{\beta} + \mathbf{e} = \mathbf{X} \mathbf{B} \Delta \tilde{\boldsymbol{\beta}} \quad (5.51)$$

e le equazioni normali associate sono

$$\begin{aligned} \mathbf{B}' \mathbf{X}' \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{B} \Delta \tilde{\boldsymbol{\beta}} &= \mathbf{B}' \mathbf{X}' \mathbf{P} \Delta \tilde{\mathbf{y}} \\ \text{con } \Delta \tilde{\mathbf{y}} &= (\Delta \mathbf{y} - \mathbf{X} \mathbf{d} \boldsymbol{\beta}) \end{aligned} \quad (5.52)$$

la forma quadratica è data infine da

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{\mathbf{y}}' \mathbf{P} \Delta \tilde{\mathbf{y}} &= (\Delta \mathbf{y} - \mathbf{X} \mathbf{d} \boldsymbol{\beta})' \mathbf{P} (\Delta \mathbf{y} - \mathbf{X} \mathbf{d} \boldsymbol{\beta}) \\ &= \Delta \mathbf{y}' \mathbf{P} \Delta \mathbf{y} - 2 \Delta \mathbf{y}' \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{d} \boldsymbol{\beta} + \mathbf{d} \boldsymbol{\beta}' \mathbf{X}' \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{d} \boldsymbol{\beta} \\ &= \Delta \mathbf{y}' \mathbf{P} \Delta \mathbf{y} - 2 \mathbf{b}' \mathbf{d} \boldsymbol{\beta} + \mathbf{d} \boldsymbol{\beta}' \mathbf{N} \mathbf{d} \boldsymbol{\beta}. \end{aligned} \quad (5.53)$$

5.7 Introduzione di parametri addizionali

E' possibile introdurre nei sistemi di equazioni normali alcuni parametri addizionali, se l'influenza di tali parametri sulla soluzione sequenziale è trascurabile. Assumiamo che esista una relazione tra il parametro β_i , relativo alla combinazione sequenziale di m sistemi di equazioni normali e i nuovi parametri δ_1 e δ_2 , nella forma:

$$\beta_i = \mathbf{f}(\boldsymbol{\delta}_1) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\delta}_2) \quad \text{con } i = 1, m \quad (5.54)$$

In forma linearizzata si ha

$$\beta_i = \mathbf{F}_i \boldsymbol{\delta}_1 + \mathbf{G}_i \boldsymbol{\delta}_2 + \mathbf{c}_i. \quad (5.55)$$

Con riferimento al paragrafo precedente possiamo identificare la matrice \mathbf{B} e il vettori di costanti $\mathbf{d} \boldsymbol{\beta}$ con le matrici \mathbf{F}_i , \mathbf{G}_i e \mathbf{c}_i

$$\mathbf{B} = (\mathbf{F}_i, \mathbf{G}_i) \quad \mathbf{d} \boldsymbol{\beta}_i = \mathbf{c}_i. \quad (5.56)$$

Il sistema delle equazioni normali trasformato diventa

$$\tilde{\mathbf{N}} \tilde{\boldsymbol{\beta}} = \tilde{\mathbf{b}} \quad (5.57)$$

con

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{\beta}} &= \begin{pmatrix} \boldsymbol{\delta}_1 \\ \boldsymbol{\delta}_2 \end{pmatrix} \\ \tilde{\mathbf{N}} &= \begin{pmatrix} \mathbf{F}_i' \mathbf{N}_i \mathbf{F}_i & \mathbf{F}_i' \mathbf{N}_i \mathbf{G}_i \\ \mathbf{G}_i' \mathbf{N}_i \mathbf{F}_i & \mathbf{G}_i' \mathbf{N}_i \mathbf{G}_i \end{pmatrix} \\ \tilde{\mathbf{b}} &= \begin{pmatrix} \mathbf{F}_i' (\mathbf{b}_i - \mathbf{N}_i \mathbf{c}_i) \\ \mathbf{G}_i' (\mathbf{b}_i - \mathbf{N}_i \mathbf{c}_i) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5.58)$$

Se effettuiamo lo stacking di due sistemi di equazioni normali otteniamo

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \mathbf{F}'_1 \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{X}_1 \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}'_2 \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{X}_2 \mathbf{F}_2 & \mathbf{F}'_1 \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{X}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{F}'_2 \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{X}_2 \mathbf{G}_2 \\ \mathbf{G}'_1 \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{X}_1 \mathbf{F}_1 + \mathbf{G}'_2 \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{X}_2 \mathbf{F}_2 & \mathbf{G}'_1 \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{X}_1 \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}'_2 \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{X}_2 \mathbf{G}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{pmatrix} \\ = & \begin{pmatrix} \mathbf{F}'_1 \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{y}_1 + \mathbf{F}'_2 \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{y}_2 - \mathbf{F}'_1 \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{y}_1 \mathbf{c}_1 - \mathbf{F}'_2 \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{y}_2 \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{G}'_1 \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{y}_1 + \mathbf{G}'_2 \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{y}_2 - \mathbf{G}'_1 \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{y}_1 \mathbf{c}_1 - \mathbf{G}'_2 \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{y}_2 \mathbf{c}_2 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5.59)$$

Assumiamo ora che le coordinate di ciascun sito varino linearmente nel tempo; La relazione tra il parametro β_i , che rappresenta la posizione delle stazioni al tempo t_i e il parametro β_{t_0} rappresentante le coordinate delle stazioni all'epoca di riferimento t_0 , si scrive nella forma

$$\beta_i = \beta_{t_0} + \Delta t_i \mathbf{v}_{t_0} \quad (5.60)$$

dove $\Delta t_i = t_i - t_0$. Assumiamo inoltre che

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{0} \quad \mathbf{F}_i = \mathbf{I}_i \quad \mathbf{G}_i = \Delta t_i \mathbf{I}_i \quad (5.61)$$

in tal modo, dopo aver effettuato lo stacking, il sistema delle equazioni normali diviene:

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{X}_2 & \Delta t_1 (\mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{X}_1) + \Delta t_2 (\mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{X}_2) \\ \Delta t_1 (\mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{X}_1) + \Delta t_2 (\mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{X}_2) & \Delta t_1^2 (\mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{X}_1) + \Delta t_2^2 (\mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{X}_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{t_0} \\ \mathbf{v}_{t_0} \end{pmatrix} \\ = & \begin{pmatrix} \mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{y}_1 + \mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{y}_2 \\ \Delta t_1 (\mathbf{X}'_1 \mathbf{P}_1 \mathbf{y}_1) + \Delta t_2 (\mathbf{X}'_2 \mathbf{P}_2 \mathbf{y}_2) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5.62)$$

Osserviamo infine che la trasformazione $\beta_i = \beta_{t_0} + \Delta t_i v_{t_0}$ ha consentito di ridurre il numero di incognite da m vettori di parametri al vettore di parametri $\begin{pmatrix} \beta_{t_0} \\ \mathbf{v}_{t_0} \end{pmatrix}$.

5.8 Sistemi di equazioni normali vincolati

In generale, le osservazioni di un dato tipo non sono sensibili a tutti i parametri compresi nel modello teorico. In tal caso le equazioni normali $\mathbf{N}\beta = \mathbf{b}$ sono singolari (in tal caso $\det(\mathbf{N}) = 0$). Un caso semplice è quello dell'osservabile costituita dalla misura della distanza, che non contiene l'informazione sull'orientazione della rete.

In tal caso è necessario inserire dei vincoli per rimuovere la singolarità dalle equazioni normali. Il modo più diretto è quello di fissare le coordinate di almeno una stazione, tuttavia in questo caso l'informazione sulle coordinate di quella stazione è definitivamente persa. Un metodo più flessibile è quello di vincolare le coordinate di alcuni siti tramite un sistema di pseudo osservazioni del tipo seguente

$$\mathbf{w} + \mathbf{e}_w = \mathbf{H}\beta \quad \mathbf{D}(\mathbf{w}) = \sigma^2 \mathbf{P}_w^{-1} \quad (5.63)$$

dove \mathbf{H} è una matrice di dimensione $r \times u$ con $rg(\mathbf{H}) = r$, r è il numero di vincoli, sempre inferiore al numero delle incognite, \mathbf{e}_w è il vettore dei residui, β il vettore

dei parametri da stimare e \mathbf{w} un vettore di costanti conosciute di dimensione r . Osserviamo che il modello di Gauss-Markoff vincolato rientra nel caso precedente se si verifica che:

$$\mathbf{P}_w = \mathbf{0} \quad (5.64)$$

Il sistema delle equazioni di osservazione, aumentato di quello di pseudo osservazioni ha la forma:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{e}_y \\ \mathbf{e}_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} \tilde{\boldsymbol{\beta}} \quad D \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} = \sigma^2 \begin{pmatrix} \mathbf{P}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_w^{-1} \end{pmatrix} \quad (5.65)$$

il sistema di equazioni normali associato è

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} + \mathbf{H}^T \mathbf{P}_w \mathbf{H}) \tilde{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{y} + \mathbf{H}^T \mathbf{P}_w \mathbf{w}. \quad (5.66)$$

Se indichiamo con Σ_c^{-1} il sistema delle equazioni normali vincolato,

$$\Sigma_c^{-1} = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} + \mathbf{H}^T \mathbf{P}_w \mathbf{H}) \quad (5.67)$$

e con Σ_{free}^{-1} e Σ_{vinc}^{-1} il sistema delle equazioni normali senza vincoli e il sistema delle equazioni normali corrispondente al sistema di pseudo osservazioni,

$$\begin{aligned} \Sigma_{free}^{-1} &= \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} \\ \Sigma_{vinc}^{-1} &= \mathbf{H}^T \mathbf{P}_w \mathbf{H} \end{aligned} \quad (5.68)$$

allora possiamo scrivere:

$$\Sigma_c^{-1} = \Sigma_{free}^{-1} + \Sigma_{vinc}^{-1} \quad (5.69)$$

da cui segue

$$\Sigma_{free}^{-1} = \Sigma_c^{-1} - \Sigma_{vinc}^{-1}. \quad (5.70)$$

Ne segue che conoscendo le matrici Σ_c^{-1} e Σ_{vinc}^{-1} è possibile ricostruire il sistema di equazioni normali non vincolate Σ_{free}^{-1} . La forma quadratica che viene minimizzata si scrive come:

$$\tilde{\Omega} = \mathbf{e}_y^T \mathbf{P} \mathbf{e}_y + \mathbf{e}_w^T \mathbf{P} \mathbf{e}_w \quad (5.71)$$

$$= \mathbf{y}^T \mathbf{P} \mathbf{y} + \mathbf{w}^T \mathbf{P}_w \mathbf{w} - (\mathbf{y}^T \mathbf{P} \mathbf{X} + \mathbf{w}^T \mathbf{P}_w \mathbf{H}) \tilde{\boldsymbol{\beta}} \quad (5.72)$$

$$= \mathbf{y}^T \mathbf{P} \mathbf{y} + \tilde{\mathbf{b}} \mathbf{P} \tilde{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{w}^T \mathbf{P}_w \mathbf{w} \quad (5.73)$$

avendo posto:

$$\mathbf{e}_y = \mathbf{X} \tilde{\boldsymbol{\beta}} - \mathbf{y} \quad (5.74)$$

$$\mathbf{e}_w = \mathbf{H} \tilde{\boldsymbol{\beta}} - \mathbf{w} \quad (5.75)$$

La stima della varianza di peso unitario è:

$$\tilde{\sigma}^2 = \frac{\tilde{\Omega}}{n_y - u_y + n_w} \quad (5.76)$$

Supponiamo di voler vincolare la componente β_j del vettore β . In tal caso introduciamo l'equazione di pseudo osservazione

$$\beta_j + e_j = 0 \quad D(\beta_j) = \sigma^2 P_j^{-1} \quad (5.77)$$

e con

$$r = 1 \quad w = w_j = 0 \quad H = I_j = (0, 0, 0, \dots, 1_j, 0, \dots, 0) \quad P_w = \text{diag}(0, 0, 0, \dots, 1_j, 0, \dots, 0) \quad (5.78)$$

In questo modo è possibile vincolare le coordinate di qualsiasi stazione ai suoi valori a priori. Le coordinate di due stazioni vicine possono essere vincolate, invece, utilizzando il seguente vincolo:

$$\beta_i - \beta_j = 0 \quad (5.79)$$

dove β_j e β_i rappresentano le coordinate cartesiane della stazione j ed i , rispettivamente. Per vincolare le coordinate ellissoidiche è necessario introdurre la matrice jacobiana della trasformazione tra coordinate cartesiane e ellissoidiche:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} & \frac{\partial \varphi}{\partial y} & \frac{\partial \varphi}{\partial z} \\ \frac{\partial \lambda}{\partial x} & \frac{\partial \lambda}{\partial y} & \frac{\partial \lambda}{\partial z} \\ \frac{\partial h}{\partial x} & \frac{\partial h}{\partial y} & \frac{\partial h}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (5.80)$$

In tal caso il vincolo relativo diventa

$$H_i \beta_i - H_j \beta_j = 0 \quad (5.81)$$

5.9 Applicazione

Diamo una dimostrazione dei concetti descritti nei paragrafi precedenti applicandoli al modello di osservabile utilizzato dal software CATREF.

5.9.1 Un semplice modello di osservabile

Supponiamo che la rete sia costituita da n siti, e che la posizione di ogni sito sia individuata dal vettore:

$$\mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad (5.82)$$

e che la matrice di covarianza del vettore r_i sia indicata da:

$$\Sigma_i = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 \end{pmatrix}_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (5.83)$$

Dunque potremmo scrivere il seguente equazioni di osservazione:

$$\begin{cases} r_1 = r_1 \\ r_2 = r_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ r_n = r_n \end{cases} \quad (5.84)$$

In notazione matriciale il sistema diventa:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{r}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{r}_n \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Sigma_n \end{pmatrix} \quad (5.85)$$

dove:

$$\mathbf{I}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad (5.86)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_n \end{pmatrix} \quad (5.87)$$

e ponendo:

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{r}_n \end{pmatrix} \quad (5.88)$$

si ottiene, banalmente :

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\mathbf{r}, \quad \Sigma. \quad (5.89)$$

Il sistema precedente può essere risolto con il metodo dei minimi quadrati. Ponendo:

$$\mathbf{P} = \Sigma^{-1} \quad (5.90)$$

possiamo scrivere il sistema delle equazioni normali come:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \hat{\mathbf{r}} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{r}. \quad (5.91)$$

Supponiamo ora di avere a disposizione m sistemi del tipo (5.85). Tali sistemi di equazioni possono derivare da diverse compagne di misura della rete, e differiranno

nei valori delle coordinate e delle matrici di covarianza associate. Per ogni campagna k possiamo pertanto scrivere un sistema di equazioni normali:

$$\mathbf{A}_k^T \mathbf{P}_k \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{r}}_k = \mathbf{A}_k^T \mathbf{P}_k \mathbf{r}_k. \quad (5.92)$$

Effettuando lo stacking dei sistemi di equazioni normali si ha:

$$\left(\sum_{k=1,m} \mathbf{A}_k^T \mathbf{P}_k \mathbf{A}_k \right) \mathbf{r} = \left(\sum_{k=1,m} \mathbf{A}_k^T \mathbf{P}_k \mathbf{r}_k \right) \quad (5.93)$$

osserviamo che se la matrice di covarianza (5.83) è diagonale, allora le coordinate di ogni sito determinate per mezzo dell'equazione (5.93) corrispondono alla media pesata delle coordinate determinate per quel particolare sito per ogni campagna.

Il sistema di equazioni di osservazione (5.85) è molto semplice ma permette di comprendere il significato dello stacking. Tuttavia non consente di stimare le velocità dei siti e non permette di quantificare la consistenza tra i k sistemi di riferimento corrispondenti alle k campagne di misura. E' necessario perciò introdurre un modello di osservabile, per le coordinate e le velocità, che contenga quei parametri che permettano di confrontare più sistemi di riferimento.

5.9.2 Modello di osservabile basato su una trasformazione di similitudine

Trasformazione di similitudine e linearizzazione

Consideriamo due sistemi di riferimento ortonormali, sappiamo che le coordinate dello stesso punto nei due diversi sistemi di riferimento sono legate dalla seguente equazione:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{T} + \lambda \mathbf{\Theta} \mathbf{X}_1 \quad (5.94)$$

dove \mathbf{T} è un vettore che descrive una traslazione dell'origine del sistema di riferimento, λ è un fattore di scala e \mathbf{R} è una matrice di rotazione:

$$\mathbf{\Theta} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z \quad (5.95)$$

dove R_x , R_y e R_z sono le note matrici di rotazione attorno agli assi coordinati:

$$\mathbf{R}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_1 & \sin R_1 \\ 0 & -\sin R_1 & \cos R_1 \end{pmatrix} \quad (5.96)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{pmatrix} \cos R_2 & 0 & -\sin R_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R_2 & 0 & \cos R_2 \end{pmatrix} \quad (5.97)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{pmatrix} \cos R_3 & \sin R_3 & 0 \\ -\sin R_3 & \cos R_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.98)$$

In geodesia la norma del vettore che definisce la traslazione è < 100 m, mentre le rotazioni e il parametro di scala sono dell'ordine di 10^{-5} , pertanto l'equazione (??) può essere linearizzata:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_1 + \mathbf{T} + \mathbf{D}\mathbf{X}_1 + \mathbf{R}\mathbf{X}_1 \quad (5.99)$$

avendo posto $\lambda = 1 + D$, e avendo linearizzato la matrice di rotazione:

$$\Theta = \mathbf{I} + \mathbf{R} \quad (5.100)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5.101)$$

La relazione tra le velocità si ricava per derivazione dall'eq. (5.99):

$$\dot{\mathbf{X}}_2 = \dot{\mathbf{X}}_1 + \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{X}}_1 + \dot{\mathbf{D}}\mathbf{X}_1 + \mathbf{R}\dot{\mathbf{X}}_1 + \dot{\mathbf{R}}\mathbf{X}_1. \quad (5.102)$$

Nell'eq. (5.103) i termini $\mathbf{D}\dot{\mathbf{X}}_1$ e $\mathbf{R}\dot{\mathbf{X}}_1$ possono essere trascurati, perciò si ottiene, infine:

$$\dot{\mathbf{X}}_2 = \dot{\mathbf{X}}_1 + \dot{\mathbf{T}} + \dot{\mathbf{D}}\mathbf{X}_1 + \dot{\mathbf{R}}\mathbf{X}_1. \quad (5.103)$$

Osserviamo che le trasformazioni (5.99) e (5.103) dipendono da 14 parametri.

Equazioni di osservazione

Consideriamo una rete composta da n siti, e supponiamo di poter disporre di s soluzioni per tale rete. Per soluzione intendiamo la coppia di oggetti:

$$\mathbf{X}_s = \begin{pmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ z_{s1} \\ x_{s2} \\ y_{s2} \\ z_{s2} \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{sn} \\ y_{sn} \\ z_{sn} \end{pmatrix}, \quad \Sigma_s \quad (5.104)$$

dove Σ_s rappresenta la matrice di covarianza associata al vettore \mathbf{X}_s . Supponiamo inoltre che le n soluzioni siano riferite a k sistemi di riferimento. Questo è il caso più generale, anche se per la maggior parte dei casi ogni soluzione s è associata ad un sistema di riferimento k con una corrispondenza biunivoca. Siamo interessati a

determinare una soluzione combinata per posizione e velocità dei siti:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix}, \quad \Sigma \quad (5.105)$$

e i $7 \times k$ parametri di trasformazione tra i k sistemi di riferimento individuali e il sistema di riferimento combinato. Partendo dalle eq. (5.99) e (5.103), e tenendo conto del fatto che in generale il numero di sistemi di riferimento k non coincide con il numero di soluzioni s possiamo scrivere le equazioni di osservazione:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{si} = x_i + dt_{si}\dot{x}_i + T_{1k} + 10^{-6}x_i D_k - cR_{3k}y_i + cR_{2k}z_i \\ \quad + dt_{ik} \left[\dot{T}_{1k} + 10^{-6}x_i \dot{D}_k - c\dot{R}_{3k}y_i + c\dot{R}_{2k}z_i \right] \\ y_{si} = y_i + dt_{si}\dot{y}_i + T_{2k} + 10^{-6}y_i D_k + cR_{3k}z_i - cR_{1k}z_i \\ \quad + dt_{ik} \left[\dot{T}_{2k} + 10^{-6}y_i \dot{D}_k + c\dot{R}_{3k}x_i - c\dot{R}_{1k}z_i \right] \\ z_{si} = z_i + dt_{si}\dot{z}_i + T_{3k} + 10^{-6}z_i D_k + cR_{1k}y_i - cR_{2k}x_i \\ \quad + dt_{ik} \left[\dot{T}_{3k} + 10^{-6}z_i \dot{D}_k + c\dot{R}_{1k}y_i - c\dot{R}_{2k}x_i \right] \\ \dot{x}_{si} = \dot{x}_i + \dot{T}_{1k} + 10^{-6}x_i \dot{D}_k - c\dot{R}_{3k}y_i + c\dot{R}_{2k}z_i \\ \dot{y}_{si} = \dot{y}_i + \dot{T}_{2k} + 10^{-6}y_i \dot{D}_k + c\dot{R}_{3k}x_i - c\dot{R}_{1k}z_i \\ \dot{z}_{si} = \dot{z}_i + \dot{T}_{3k} + 10^{-6}z_i \dot{D}_k + c\dot{R}_{1k}y_i - c\dot{R}_{2k}x_i \end{array} \right. \quad (5.106)$$

indicando con t_0 un'epoca iniziale, con t_s l'epoca a cui si riferisce una soluzione individuale, e t_k l'epoca associata al k -esimo sistema di riferimento, le quantità:

$$dt_{si} = t_s - t_0 \quad (5.107)$$

$$dt_{ik} = t_{si} - t_k \quad (5.108)$$

permettono di mappare la soluzione s all'epoca del sistema di riferimento k . Linearizzando le equazioni nei parametri incogniti:

$$x_{si} = x_{0si} + \delta x_{si}, \quad y_{si} = y_{0si} + \delta y_{si}, \quad z_{si} = z_{0si} + \delta z_{si} \quad (5.109)$$

$$T_{1k} = T_{01k} + \delta T_{1k}, \quad T_{2k} = T_{02k} + \delta T_{2k}, \quad T_{3k} = T_{03k} + \delta T_{3k} \quad (5.110)$$

$$R_{1k} = R_{01k} + \delta R_{1k}, \quad R_{2k} = R_{02k} + \delta R_{2k}, \quad R_{3k} = R_{03k} + \delta R_{3k} \quad (5.111)$$

$$D_{1k} = D_{01k} + \delta D_{1k} \quad (5.112)$$

possiamo scrivere l'equazione di osservazione relativa alla singola soluzione s , nella seguente forma:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1s} & \mathbf{A}_{2s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\boldsymbol{\chi}_s \\ \delta\mathbf{T}_k \end{pmatrix} + \mathbf{B}_s = \mathbf{V}_s \quad (5.113)$$

dove \mathbf{A}_{1s} e \mathbf{A}_{2s} rappresentano le matrici di disegno rispetto alle coordinate e alle velocità, e rispetto ai parametri di trasformazione, mentre $\delta\boldsymbol{\chi}_s$ rappresentano le coordinate e $\delta\mathbf{T}_k$ i 14 parametri di trasformazione tra i sistemi di riferimento. \mathbf{V}_s rappresenta i residui e \mathbf{B}_s il vettore di termini costanti. Se introduciamo la matrice dei pesi $\mathbf{P}_s = \boldsymbol{\Sigma}_s^{-1}$ possiamo scrivere il sistema delle equazioni normali:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_{1s} & \mathbf{A}_{1s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_{2s} \\ \mathbf{A}_{2s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_{1s} & \mathbf{A}_{2s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_{2s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\boldsymbol{\chi}_s \\ \delta\mathbf{T}_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{1s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{B}_s \\ \mathbf{A}_{2s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{B}_s \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (5.114)$$

Effettuando lo stacking abbiamo il seguente sistema di equazioni normali:

$$\begin{pmatrix} \sum_s \mathbf{A}_{1s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_{1s} & \sum_s \mathbf{A}_{1s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_{2s} \\ \sum_s \mathbf{A}_{2s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_{1s} & \sum_s \mathbf{A}_{2s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{A}_{2s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\boldsymbol{\chi}_s \\ \delta\mathbf{T}_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_s \mathbf{A}_{1s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{B}_s \\ \sum_s \mathbf{A}_{2s}^T \mathbf{P}_s \mathbf{B}_s \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (5.115)$$

5.9.3 Vincoli

Il sistema delle eq. normali (5.115) può essere scritto come:

$$\mathbf{N}\boldsymbol{\Delta}\mathbf{X} = \mathbf{K} \quad (5.116)$$

dove \mathbf{K} è un vettore di termini noti e $\boldsymbol{\Delta}\mathbf{X} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_0$ è il vettore di incognite linearizzate. Abbiamo visto che il rango della matrice \mathbf{N} non è massimo. Per invertire la matrice è necessario definire dei vincoli. Abbiamo visto che vincoli che agiscono singolarmente sulle coordinate dei siti comportano una distorsione della geometria interna della rete, cerchiamo dunque una condizione che agisca globalmente su tutti i siti che scegliamo per definire il sistema di riferimento. L'idea è di definire un insieme di condizioni che agiscano sui parametri di trasformazione del sistema di riferimento, in modo tale da ricercare quell'insieme di parametri che minimizzi gli scarti nelle coordinate dei siti scelti per definire il riferimento. Partiamo dalla relazione di similitudine tra due sistemi di riferimento:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_1 + \mathbf{A}\boldsymbol{\Theta} \quad (5.117)$$

dove:

$$\Theta = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ D \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{D} \\ \dot{R}_1 \\ \dot{R}_2 \\ \dot{R}_3 \end{pmatrix} \quad (5.118)$$

è il vettore che rappresenta i parametri di rototraslazione e di scala. La matrice di disegno \mathbf{A} può essere approssimata da:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot \\ 1 & 0 & 0 & x_{i0} & 0 & z_{i0} & -y_{i0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{i0} & -z_{i0} & 0 & x_{i0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{i0} & y_{i0} & -x_{i0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & x_{i0} & 0 & z_{i0} & -y_{i0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & y_{i0} & -z_{i0} & 0 & x_{i0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & z_{i0} & y_{i0} & -x_{i0} & 0 \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad (5.119)$$

utilizzando i valori delle coordinate a priori. Le differenze tra le coordinate nei due sistemi di riferimento sono:

$$\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1 = \mathbf{A}\Theta \quad (5.120)$$

che possono essere minimizzate per mezzo del seguente sistema di equazioni normali:

$$\Theta = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1). \quad (5.121)$$

I due sistemi di riferimento coincidono se tutti i parametri di trasformazione sono nulli, quindi:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1) = \mathbf{0} \quad (5.122)$$

è l'equazione che definisce il sistema di riferimento. Tale equazione può essere convertita in un sistema da risolvere ai minimi quadrati, ponendo $B = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$, e definendo una matrice di covarianza Σ_Θ , che indica a che livello il vettore Θ debba considerarsi nullo. Il sistema da risolvere ai minimi quadrati è quindi:

$$\mathbf{B}(\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1) = \mathbf{0}, \quad \Sigma_\Theta \quad (5.123)$$

da cui:

$$\mathbf{B}^T \Sigma_{\Theta}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1). \quad (5.124)$$

Sai ora X_R il vettore delle coordinate dei siti scelti per definire il riferimento, e sia $X_{R,0}$ le corrispondenti coordinate a-priori. Applicando al sistema (5.116) i vincoli definiti dall'eq. (5.124) si ottiene il seguente sistema:

$$(\mathbf{N} + \mathbf{B}^T \Sigma_{\Theta}^{-1} \mathbf{B}) \Delta \mathbf{X} = \mathbf{K} + \mathbf{B}^T \Sigma_{\Theta}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{X}_R - \mathbf{X}_{R,0}) \quad (5.125)$$

con Σ_{Θ} matrice diagonale composta dalla varianza del vettore Θ .

5.9.4 Vincoli interni

I vincoli definiti dall'eq. (5.124) si basano sull'esistenza di una soluzione esterna. E' lecito chiedersi se esistono delle condizioni di vincolo che consentano di risolvere ai minimi quadrati un sistema di equazioni di rango non massimo senza specificare un sistema di riferimento esterno. Supponiamo che \mathbf{P}_k rappresenti uno dei sette parametri su cui si basa una trasformazione di similitudine tra il riferimento k e il riferimento combinato. Supponiamo inoltre che la dipendenza temporale del parametro \mathbf{P}_k si data dalla seguente equazione:

$$P_k = P_k(t_0) + \dot{P}_k(t - t_0). \quad (5.126)$$

Possiamo imporre che i k sistemi di riferimento coincidano se:

$$P_k(t_0) = 0 \quad (5.127)$$

$$\dot{P}_k = 0 \quad (5.128)$$

osserviamo che $P_k(t_0)$ e \dot{P}_k possono essere ottenuti dall'equazione (5.126) attraverso i minimi quadrati:

$$\begin{pmatrix} K & \sum_{k \in K} (t_k - t_0) \\ \sum_{k \in K} (t_k - t_0) & \sum_{k \in K} (t_k - t_0)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_k(t_0) \\ \dot{P}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k \in K} P_k \\ \sum_{k \in K} (t_k - t_0) P_k \end{pmatrix} \quad (5.129)$$

e sostituendo le equazioni (5.127) nell'eq. (5.129) otteniamo le condizioni di vincolo:

$$\begin{cases} \sum_{k \in K} P_k = 0 \\ \sum_{k \in K} (t_k - t_0) P_k = 0 \end{cases} \quad (5.130)$$

Osserviamo che le eq. (5.130) si basano sull'esistenza di k sistemi di riferimento e sulle formaule di regressione lineare (5.127), per questo fatto l'utilizzo dei vincoli interni è particolarmente indicato nello studio di combinazioni multianno di sistemi di equazioni normali.

Capitolo 6

Reti GPS

6.1 Introduzione

Una rete GPS come quella europea è costituita da un insieme di stazioni GPS, non interagenti tra di loro, che ricevono i segnali dei satelliti e trasformano le osservazioni in files ASCII, secondo una formattazione standard (formato RINEX), riversandoli in un secondo momento in un apposito server FTP dal quale in seguito possono essere prelevate per elaborazioni successive. A livello della raccolta di dati non viene effettuata alcuna elaborazione, a parte quelle strettamente necessarie a verificare il corretto funzionamento della stazione stessa.

Le reti GPS possono variare in estensione e in numero di stazioni componenti, ovviamente maggiore è il numero di stazioni maggiore saranno le risorse di calcolo necessarie per svolgere l'elaborazione dei dati: per una grande rete geodetica come quella EUREF (circa 200 stazioni) non risulta fattibile elaborare giornalmente e simultaneamente tutti i files RINEX prodotti dalle stazioni. La soluzione più efficiente consiste nella suddivisione della rete in tante sottoreti (clusters, composti di circa 30, 40 stazioni) i cui dati vengono elaborati da centri di analisi locali (LACs, local analysis centers, in tutto 16). I prodotti di questi LACs sono files SINEX giornalieri; un unico centro si occupa poi della combinazione di queste soluzioni parziali. Poiché la soluzione globale (la matrice di covarianza associata a tutta la rete di stazioni) non è il prodotto diretto di un'elaborazione che parte dai dati grezzi, è necessario che le soluzioni fornite dai vari LAC vengano prodotte utilizzando lo stesso software e le stesse opzioni di elaborazione. Il software comune a tutti i LAC è il **Bernese 5** e le linee guida¹ seguite sono quelle dettate dall'EUREF stesso.

6.2 Le linee guida EUREF per i LACs

EUREF ha dettato le seguenti stringenti regole per la produzione di soluzioni locali. Possiamo dividere tali regole in sottogruppi:

¹http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/index.php

Preparazione

1. Download di tutti files RINEX relativi al sottoinsieme di stazioni di interesse, e alla settimana di interesse, da tutti i server EPN.
2. Dowload dei files delle orbite precise IGS dal server IGS.

Elaborazione

1. Stima delle coordinate giornaliere (risultato intermedio) e relativa matrice di covarianza.
2. Stima delle correzioni troposferiche orarie (risultato intermedio) e relativa marice di covarianza.
3. Generazione di una soluzione settimanale, allineata al sistema ITRF2000.
4. Utilizzo delle matrici di covarianza giornaliere per la stima delle correzioni troposferiche orarie, fissando le coordinate ai valori medi settimanali determinati al punto 2.

6.3 L'attività del Local Analysis Center UPA

Il Local Analysis Center (LAC UPA) di Padova fa parte dei LACs EUREF dal 1999. Il numero di stazioni che fanno parte della sua sottorete è aumentato da quell'anno fino alle 34 attuali. In questa sezione descriviamo in dettaglio le procedure implementate dal Local Analysis Center di Padova per soddisfare pienamente le richieste EUREF.

6.3.1 Software utilizzato

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati GPS è l'ultima versione del software Bernese: **Bernese 5**. Tale software è composto da numerosi programmi, che possiamo pensare contenuti in tre insiemi, cioè quelli relativi all'interfaccia grafica (menu, scritto in C), quelli associati alle elaborazioni scientifiche (scritti in Fortran) e gli scripts che si occupano della comunicazione tra il menu e i diversi programmi scientifici (scritti in PERL). Il software Bernese permette l'elaborazione dei dati in modo interattivo (tramite menu) e automatico (tramite il cosiddetto BPE, Bernese Processing Engine); per tutte le attività di routine risulta molto più efficiente automatizzare le operazioni per mezzo del BPE. Tale automatizzazione viene effettuata attraverso alcuni files di input (in formato ASCII) e scripts PERL scritti dall'utente.

Per quanto riguarda la fase di pre-processing dei dati, essa viene effettuata mediante l'utilizzo dei seguenti programmi:

- **gzip**, permette di decomprimere un file compresso secondo la compressione UNIX.

- `teqc`, permette di controllare la qualità di un file RINEX. Nel nostro caso viene utilizzato per ritagliare l'intervallo di osservazioni contenuto in un RINEX tra le 00:00:30 e le 23:59:30 del giorno a cui si riferisce il file e per editare l'header dei files (ad esempio, per cambiare il tipo di antenna o ricevitore), nel caso le informazioni riportate nell'header originale fossero sbagliate.
- `crz2rnx`, consente di decomprimere i files RINEX ASCII in formato compresso (di estensione `.YYd`, dove `YY` sono le ultime 2 cifre dell'anno) in files RINEX ASCII utilizzabili da bernese. Tale programma utilizza lo schema di compressione/decompressione di Hatanaka².

6.3.2 L'organizzazione dei dati in campagne

Tutti i dati e le opzioni di elaborazione di Bernese sono organizzati in una particolare struttura di *directories*, detta **campagna**. Una campagna settimanale EUREF è composta da otto directories, sette di esse (indicate con `YY_DDD`, `YY` = ultime due cifre dell'anno, `DD` = giorno dell'anno) rappresentano campagne giornaliere, mentre l'ottava (indicata con la scrittura `WKWWWW`, dove `WWWW` rappresenta la settimana GPS) serve alla combinazione delle equazioni normali giornaliere. Ciascuna campagna giornaliera è costituita dalle seguenti directories:

- `ORX`, in questa directory vengono scaricati i files RINEX.
- `ORB`, in questa directory vengono scaricati i files delle orbite precise `.SP3` e i files contenenti le informazioni sul moto del polo `.ERP`.
- `SOL`, in questa directory vengono salvati i files SINEX e i files `.NQ0` (files binari in formato proprietario Bernese, che contengono le equazioni normali).
- `ATM`, qui vengono scaricati i files contenenti le correzioni ionosferiche (di estensione `.ION`) e vengono salvati i files che immagazzinano le correzioni troposferiche (files `.TRO`).
- `STA`, in questa directory vengono posti i files contenenti le coordinate a priori (files `.CRD`), le velocità delle stazioni (files `.VEL`), un file che contiene le informazioni sulle stazioni processate (file `.STA`, contiene le informazioni sugli intervalli di operatività delle stazioni, sul tipo di ricevitori ed antenne), un file che implementa le correzioni mareali (di estensione `.BLQ`) ed un file che definisce le linee di base (`.ABB`, tabella delle abbreviazioni).
- `RAW`, in questa directory vengono copiati i RINEX, una volta decompressi e controllati.
- `OUT`, contiene i files di output di ogni singolo programma che viene attivato durante la sequenza di elaborazione.

²<http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/hatanaka.html>

- BPE, contiene i log files della sequenza di elaborazione. Tali files sono essenziali in caso di errore, in quanto permettono di determinare il punto della sequenza di elaborazione in cui si verifica l'errore stesso.

Accanto ai files di input che potremmo definire specifici di una campagna (rappresentati nella seguente tabella)

File	
.CRD	Coordinate a priori
.VEL	Velocità
.SP3	Orbite e correzioni di clock dei satelliti
.BLQ	Coefficienti di correzione mareale
.STA	Informazioni sulle stazioni (ricevitore, antenna)
.ERP	Moto del polo
.FIX	Lista delle stazioni fiduciarie
.ABB	Tabella delle abbreviazioni
.PLD	Indica la placca a cui appartengono le stazioni della rete

sono necessari anche files che contengono informazioni indipendenti dalla campagna. Il più importante tra di essi è il files che contiene lo stato di funzionamento e le caratteristiche dei satelliti (SATELLIT.).

Nome del file	Contenuto
CONST.	Costanti usate nel software
DATUM.	Definizioni del datum geodetico
RECEIVER.	Eccentricità di fase e offsets delle antenne
SATELLIT.	Informazioni sui satelliti (massa, coeff. di press. di rad.)
SAT_yyy.CRX	Problemi relativi ai satelliti
IAU80.NUT IAU2000.NUT	Coefficienti del modello di nutazione
IERS2000.SUB RAY96.SUB	Coefficienti sub-giornalieri per il mod. del moto del polo
POLOFF.	Coefficienti per l'offset del polo
GEMT3.	Coefficienti per il potenziale terrestre
GEM10N.	Come sopra
JGM3.	Come sopra
EGM96.	Come sopra
EIGEN2.	Come sopra
TEG4.	Come sopra
GPSUTC	Secondo mobile
OT_CSRC.TID	Coefficienti di correzione mareale
OT_TOPEX.TID	Come sopra
OT2TOPEX.TID	Come sopra

6.3.3 La creazione di una campagna

La creazione di una campagna comporta tre passi preliminari:

1. Creazione della struttura della directory specifica della campagna.
2. Download dei dati.
3. Decompressione e pre-trattamento dei dati.

Questi tre passaggi preliminari richiedono l'attivazione automatica di diversi programmi. Per ottenere una efficiente integrazione di tali programmi si è dovuta scrivere una procedura in linguaggio PERL. Tale procedura si concretizza in un insieme di subroutine contenute in un modulo PERL (*bernutil.pm*) e in uno script (*downloadbkg.pl*) che funge da driver per tali subroutine. La tabella seguente presenta l'elenco di tali subroutine con la descrizione della loro funzione

Subroutine	Funzione
<i>downloadfrom</i>	Effettua il download di un file tramite FTP
<i>downloadfromberne</i>	Effettua il download di un file tramite HTTP
<i>maketree</i>	Crea la struttura delle directory
<i>copyfromto</i>	Copia i files
<i>decomp</i>	Decomprime i files in formato binario
<i>crz2rnrx</i>	decomprime i files secondo la procedura di Hatanaka
<i>qualitycheck</i>	Controlla i RINEX e ne edita l'header, quando necessario
<i>upload2igs</i>	Upload dei files risultato dell'elaborazione sul server EUREF
<i>makecamp</i>	Crea una campagna giornaliera

Le subroutine *decomp*, *qualitycheck* e *crz2rnrx* chiamano 3 programmi esterni, rispettivamente *gzip*, *teqc* e *crz2rnrx*. Il driver *downloadbkg.pl* effettua le seguenti operazioni:

1. Aggiorna i files indipendenti della campagna (*SATELLIT.* e *SAT_yy.CRX*).
2. Chiama la subroutine *makecamp* in un loop. Ogni iterazione del loop crea una campagna giornaliera e la riempie con i files relativi (*RINEX*, orbite, moto del polo).
3. Decomprime i dati (*UNIX -> RINEX ASCII compresso*) con una chiamata alla subroutine *decomp*.
4. Decomprime i dati (*RINEX ASCII compresso -> RINEX ASCII*) con una chiamata alla subroutine *crz2rnrx*.
5. Controlla la qualità dei *RINEX* attraverso una chiamata alla subroutine *qualitycheck*.

6.4 La procedura di elaborazione

Descriviamo in questa sezione gli strumenti e le modalità mediante le quali viene attuata la procedura di elaborazione che accoglie le direttive EUREF.

6.4.1 Variabili d'ambiente

Bernese 5 è un software con una struttura molto complicata: utilizza una grande quantità di files di testo come input ed output per i diversi sottoprogrammi che lo compongono. Tali files vengono immagazzinati in una struttura di directories molto articolata. Per semplificare l'utilizzo del software ad alcune directories, quelle di uso più frequente, sono state associate delle variabili di sistema.

Variabile	Directory	Funzione
X	C:\BERN50\GPS	Script di compilazione
U	C:\GPSUSER	Ambiente dell'utente
T	C:\TEMPV50	Directory temporanea
P	C:\GPSDATA	Dati delle campagne
XG	C:\BERN50\PGM\EXE	Programmi Scientifici

6.4.2 Opzioni di elaborazione

La parte di elaborazione che dipende da ogni programma scientifico che costituisce **Bernese** ubbidisce ad un insieme di parametri in input; Tale insieme di parametri viene passato a questi programmi attraverso un file di testo contenente delle *keywords*, detto pannello (di estensione .INP). Ad ogni programma è associato uno specifico pannello, che viene editato per mezzo del menu. Per una specifica campagna l'insieme di pannelli che definiscono le opzioni di elaborazione viene immagazzinato in una determinata directory, contenuta nella directory GPSUSER\OPT.

6.4.3 Scripts di attivazione

Ad ogni particolare programma scientifico è associato un driver, costituito da uno script PERL. Lo scopo di tale driver è quello di chiamare il programma scientifico ad esso associato passandogli i parametri specificati nel pannello. Questi scripts sono contenuti nella directory GPSUSER\SCRIPTS.

6.4.4 Controllo della CPU

Bernese permette di distribuire l'elaborazione su diverse CPU, nel caso di macchine multiprocessore. Un processo di elaborazione può essere associato ad una specifica CPU, e tale associazione viene effettuata attraverso un particolare file, detto CPU file (di estensione .CPU). Tale file è posto nella directory GPSUSER/PAN.

6.4.5 La definizione della sequenza di elaborazione

Ogni procedura di elaborazione comporta l'attivazione, secondo una sequenza specificata, di una serie di programmi. Per quanto riguarda i programmi che compongono **Bernese 5**, tale sequenza viene definita tramite un comune file di testo chiamato

Process Control File (abbreviato in PCF, di estensione .PCF). Per come è strutturato **Bernese**, il collegamento tra file PCF e i programmi scientifici di basso livello (quelli scritti in Fortran) avviene attraverso scripts PERL specificati. Ciò significa che il file PCF definisce la sequenza di attivazione degli scripts PERL, i quali a loro volta attivano i programmi di basso livello. Il file PCF inoltre gestisce i parametri che devono essere passati agli scripts attraverso un insieme di files di configurazione: tali files, detti pannelli (di estensione .INP), si trovano nella directory GPSUSER/OPT e devono essere modificati tramite il menu. Il file PCF è diviso in 3 sezioni:

1. Sezione indicante la sequenza di attivazione degli scripts, le directories contenenti i pannelli delle opzioni che devono essere passate agli scripts, e quale processore usare.
2. Sezione che definisce in quale modo le azioni definite da uno script devono essere distribuite tra i processori disponibili (nel caso di macchine multiprocessore).
3. Sezione che definisce le variabili che possono essere passate agli scripts.

Per ogni strategia di elaborazione l'utente deve quindi definire il file PCF nel seguente modo, tenendo conto che ad ogni riga del PCF corrisponde una chiamata ad un processo:

- Ad ogni script che attiva un processo deve essere assegnato un numero che lo identifica all'interno della sequenza di elaborazione (PID, *Process Identifier*), nella colonna Script del file PCF.
- Nella stessa riga, sotto la colonna Opt_dir, deve essere specificata la directory nella quale lo script deve reperire i parametri in input (i pannelli) per i programmi di basso livello. Tale directory deve essere contenuta in GPSUSER/OPT.
- La colonna Campaign contiene il nome della campagna da processare. Se il campo viene lasciato bianco viene processata la campagna definita tramite menu.
- La colonna Cpu indica su quale processore deve essere eseguito il processo. Se il campo riporta il valore ANY allora lo script viene eseguito sul primo processore libero.
- I campi restanti indicano quali sono i processi che devono essere terminati prima che venga attivato il processo che compete a quella determinata riga.

6.5 Le strategie di elaborazione utilizzate da UPA LAC

Le strategie di elaborazione utilizzate dal LAC UPA sono definite da due file PCF: il primo serve ad effettuare il posizionamento puntuale di una stazione, utilizzando osservabili non differenziate, mentre il secondo fa uso di osservabili alle doppie

differenze. L'utilizzo di dati non differenziati consente di determinare la posizione delle stazioni a livello centimetrico, inoltre in tale modalità eventuali problemi affliggenti una stazione non hanno effetto sulla determinazione delle coordinate delle altre stazioni che fanno parte della rete. Infine le coordinate determinate in questa modalità sono automaticamente allineate al sistema di riferimento ITRF2000, grazie all'utilizzo di orbite IGS (che sono espresse nel riferimento ITRF2000), l'inconveniente principale rimane la scarsa precisione delle coordinate così determinate; per migliorare la stima delle coordinate a livello millimetrico è necessario differenziare le osservabili rispetto ai satelliti e ai ricevitori, eliminando in questo modo gli errori di clock. In questo modo, però, si potrà determinare solo la posizione di una stazione relativamente ad un'altra e le coordinate stimate differiranno da quelle reali (nel riferimento ITRF2000) per una traslazione, una rotazione ed un fattore di scala. Usualmente, per un network regionale come quello EUREF, le differenze dovute a rotazione e fattore di scala sono trascurabili ed è perciò necessario tenere conto solo della traslazione. Questo problema viene risolto selezionando un insieme di stazioni fiduciarie che servono ad allineare il network minimizzando gli scarti tra le coordinate stimate e quelle a-priori, per il set di stazioni fiduciarie individuato.

6.5.1 Strategia per il posizionamento puntuale (Point Positioning)

Il posizionamento puntuale viene definito dal PCF PPP.PCF. Oltre alla stima delle coordinate tale PCF può effettuare la stima di:

- Correzioni di clock per i ricevitori.
- Contenuto totale di elettroni (TEC).
- Bias dell'osservabile di codice per il ricevitore.
- Vettore della traslazione comune delle coordinate delle stazioni della rete.

Il PCF PPP viene utilizzato principalmente come elaborazione preparatoria allo scopo di determinare:

- Determinazione delle stazioni mancanti nel file .BLQ.
- Aggiornamento della tabella delle abbreviazioni.
- Mappatura delle coordinate ad una specifica epoca.
- Inserimento delle coordinate e delle velocità relative ad una nuova stazione nei files di coordinate e velocità della rete processata.

Le variabili utilizzate dai pannelli di input del PCF PPP che possono essere modificate nella terza sezione del PCF stesso sono:

- V_CRDREF: nome dei files di coordinate e velocità per le stazioni che realizzano il sistema di riferimento.
- V_CRDMRG: nome dei files risultanti dal merging dei files di coordinate e velocità a priori con quelli relativi alle coordinate e velocità determinate con PPP.
- V_STAINF: nome del file .STA, che contiene le informazioni riguardanti la campagna. Se il campo relativo a questa variabile è lasciato nullo, allora le informazioni vengono estratte direttamente dai files RINEX. Il file .STA può essere utilizzato anche per rinominare le stazioni che verranno scritte nei files di coordinate e velocità calcolate da PPP.
- V_PLDINF: nome del file che indica le placche a cui appartengono le stazioni appartenenti alla rete. Viene utilizzato per determinare la velocità delle stazioni tramite il modello NUVEL1A.
- V_BLQINF: nome del file contenente i coefficienti di correzione mareale. Se il campo relativo non è nullo le correzioni vengono eseguite e le stazioni mancanti vengono segnalate.
- V_ABBINF: nome del file che contiene la tabella delle abbreviazioni. PPP aggiorna automaticamente questo file se una stazione non è contenuta in esso.

Le informazioni derivanti dall'elaborazione PPP vengono immagazzinate nei seguenti files:

- Files di equazioni normali (formato binario Bernese), files di coordinate, velocità, correzioni troposferiche (formato ASCII Bernese).
- Ritardo zenitale troposferico, in formato SINEX troposferico.
- Correzioni di clock per la stazione, in formato RINEX.
- Coordinate in formato SINEX.

Descrizione del PCF PPP

Copiatura dei files Prima dell'inizio dell'elaborazione tutti i files richiesti dal BPE devono essere resi disponibili nelle opportune directories della campagna. Questo compito è svolto dal processo:

- PID 001 PPP_COP: Lo script copia i files richiesti nelle rispettive campagne. Il nome di alcuni file può essere cambiato modificando la variabile V_B (che

definisce il prefisso di alcuni file a priori). Il BPE si blocca quando manca uno dei seguenti files:

Tipo di file	Sorgente	Destinazione
RINEX	ORX	RAW
.SP3	ORB	ORB
.ERP	ORB	ORB
.CLK	ORB	ORB
.DCB	ORB	ORB

Preparazione del file del moto del polo, delle orbite e delle correzioni di clock. Questo blocco converte le informazioni IGS sul moto del polo, orbite e clock dei satelliti in file con formattazione Bernese.

- PID 101 POLUPD: Il programma estrae le informazioni sui parametri terrestri di rotazione contenuti nel bollettino IERS (di estensione .IEP) e le scrive in un file con formattazione Bernese (di estensione .ERP).
- PID 111 PRETAB: Converte le orbite in formato SP3 (nel riferimento earth fixed, con estensione .PRE) in un file tabulato (nel sistema di riferimento inerziale, file con estensione .TAB) che viene utilizzato nell'integrazione delle equazioni del moto.
- PID 103 ORBGEN: Integra le equazioni del moto utilizzando come condizioni iniziali le posizioni immagazzinate nel file .TAB, generando un file .STD che viene utilizzato in tutti i programmi di Bernese che richiedono la conoscenza dell'orbita. L'orbita viene rappresentata attraverso 6 elementi osculatori e 9 parametri dinamici associati alla pressione di radiazione.
- PID 121 CCRNXC: Il programma converte i clock files RINEX in un file Bernese contenente le correzioni di clock dei satelliti (di estensione .CLK).

Le informazioni sulle orbite, le correzioni di clock e il moto del polo generate da questo blocco del PCF PPP vengono utilizzate invariate da tutti i programmi che verranno attivati successivamente.

Preprocessamento, conversione e sincronizzazione dei dati di osservazione.

Il compito di questo blocco è preparare i dati di osservazione (pulizia dei dati a livello dei files RINEX e conversione in formato binario Bernese), aggiornare i files di coordinate e di informazione e sincronizzare gli orologi dei ricevitori al tempo GPS.

- PID 201 RNXGRA: Produce un sommario di tutti i files RINEX di osservazione disponibili attraverso una rassegna dei satelliti osservati, della stazioni considerate e delle loro caratteristiche. Questo file appare nel sommario dell'elaborazione e permette di identificare eventuali problemi di tracking delle stazioni.

- PID 211 RNXSMTAP: questo script e il seguente costituiscono un'unità. Il loro compito è di pulire i dati a livello dei files RINEX. Il compito di questo script è di parallelizzare il processo nel caso siano disponibili più processori.
- PID 212 RNXSMT_P: Determina cicle slips e outliers utilizzando la combinazione lineare Melbourne-Wubben. Produce un file RINEX liscio nelle osservabili di codice.
- PID 221 SMTOBV3: Lo script attiva il programma RXOBV3, che crea i files binari di osservazione in formato Bernese. Inoltre confronta le informazioni contenute nell'header dei file RINEX con le informazioni contenute nel file .STA, allo scopo di determinare eventuali inconsistenze. Nel caso si verificano discrepanze il BPE si blocca. Nel caso di nuove stazioni vengono aggiornati automaticamente il file di coordinate e la tabella delle abbreviazioni. I dati osservativi non differenziati contenuti nei RINEX vengono immagazzinati in files binari (di estensione .CZH, .CZO, .PZH, .PZO).
- PID 222 CRDMERGE: Definisce lo stesso dato geodetico e la stessa epoca di riferimento per tutte le stazioni coinvolte.
- PID 221 CODSAPPP: Prepara l'esecuzione del processo successivo. Parallelizza il processo successivo nel caso di più processori disponibili.
- PID 232 CODSPP_P: Sincronizza gli orologi dei ricevitori e determina le coordinate approssimate delle stazioni utilizzando un approccio di posizionamento puntuale diretto, facente uso unicamente dei dati liscio. Questo può essere di utilità nel caso che le coordinate a priori riportate nell'header dei RINEX siano di scarsa qualità. Effettua inoltre un ulteriore controllo sugli outliers.
- PID 233 CODXTR: Questo script produce un file che riassume tutti gli outliers, gli archi d'orbita mancanti, i satelliti malfunzionanti e le correzioni di clock mancanti.

Calcolo della soluzione puntuale stazione per ogni stazione. La sezione seguente effettua uno screening dei dati e determina il posizionamento puntuale.

- PID 301 PPEDETAP: Prepara la parallelizzazione del processo successivo.
- PID 302 PPEDET_P: Attiva i seguenti programmi:
 1. GPSEST: Genera un file di residui per lo screening dei dati utilizzando la combinazione *iono-free* L3.
 2. RESRMS: Effettua lo screening dei residui.
 3. SATMRK: Evidenzia gli outliers nei files di osservazione tramite opportune flags.

4. GPSEST: Come al punto 1), solo utilizzando le osservazioni ritenute valide. I risultati vengono immagazzinati nei seguenti files e utilizzati nei processi successivi:
 - File di coordinate.
 - File di correzioni di clock dei ricevitori.
 - File binari di equazioni normali (estensione .BLQ).
5. ADDNEQ2: genera i seguenti files:
 - Files di coordinate e SINEX.
 - Correzioni troposferiche (.di estensione .TRP) e SINEX troposferici (di estensione .TRO).

I passi da 1) a 3) vengono effettuati iterativamente con limiti decrescenti di RMS per il rivelamento degli outliers. Stazioni per le quali non sono disponibili le informazioni nel file .BLQ vengono evienziate da un *warning* nel file di output di GPSEST

- PID 303 GPSXTR: Genera il file sommario di GPSEST.
- PID 311 PPPCHK: Attiva in sequenza i seguenti programmi:
 1. RESRMS: produce una statistica dei residui utilizzando i dati generati dal processo 302. Analizza la combinazione lineare L3.
 2. RESRMS: produce una statistica dei residui utilizzando i dati generati dal processo 302 al passo 4).
 3. RESCHK: produce una statistica dei residui.

REsidui molto grandi o un'elevata percentuale di punti rigettati sono indicativi di un cattivo funzionamento di qualche stazione o qualche satellite.

- PID 321 CDRMERGE: I files di coordinate generati al processo 302 vengono fusi in un unico file.
- PID 322 ADDNEQ2: Scrive un singolo SINEX comprensivo di tutte le stazioni processate al putno 302, pre eliminando i parametri troposferici.
- PID 331 CCRNXC: I RINEX contenenti le correzioni di clock vengono fusi in un unico file.

Generazione delle velocità tramite il modello NUVEL1A. Il seguente blocco permette di calcolare le velocità delle stazioni mediante il modello NUVEL1A. Questo blocco viene eseguito solo se viene definita la variabile V_PLDINF.

- PID 401 PPP_PLD: verifica se la variabile V_PLDINF è definita, altrimenti salta il blocco e va direttamente al processo 421..
- PID 402 NUVELO: Il campo di velocità calcolato con il modello NUVEL1A viene calcolato e immagazzinato in un file .VEL.
- PID 403 COOVEL: Le coordinate delle stazioni vengono propagate all'epoca di riferimento del sistema ITRF (Per ITRF2000 è il 1 gennaio 2000), utilizzando le velocità calcolate dal processo 402.
- PID 411 CRDMERGE: effettua un merging tra il file di velocità generato dal processo 402 e il file di velocità a priori, definito dalla variabile V_CRDREF. Il campo di velocità risultante è immagazzinato nel file definito dalla variabile V_CRDMRG.
- PID 421 CRDMERGE: effettua le stesse operazioni del processo 411, solo applicate ai files di coordinate.
- PID 431 ADDNEQ2: I files di coordinate e velocità insieme al file di equazioni normali generato dal processo 322 vengono utilizzate per stimare i parametri di traslazione del centro della terra. Viene utilizzata una soluzione ai minimi vincoli in cui vengono stimati solo i parametri di traslazione. Le stazioni utilizzate per la definizione vengono definite nel file .FIX.

Generazione dei modelli di ionosfera. Questo blocco consente la determinazione delle correzioni ionosferiche e dei bias associati all'osservabile di codice.

- PID 501 PPP_ION: verifica se la variabile V_F è definita, in caso contrario salta il blocco e va al processo 901.
- PID 502 PPPESTAP: Parallelizza l'esecuzione del processo successivo.
- PID 503 PPPEST_P: Stima i coefficienti per le correzioni troposferiche e le salva in un file con estensione .ION. Stima i bias associati all'osservabile di codice e li scrive in un file di estensione .DCB (uno per ogni stazione).
- PID 504 GPSXTR: Crea un sommario relativo al processo precedente.
- PID 511 ADDNEQ2: Utilizza le equazioni normali generate al processo 502 relative ai bias per generare un'unico files .DCB contenente i bias associati ad ogni stazione.

- PID 521 GPSEST: Viene generato un modello regionale di ionosfera, che viene salvato in un file di estensione .INX.
- PID 522 GPSXTR: Genera il file sommario del processo precedente.

Creazione dei files sommario di tutta l'elaborazione. L'ultimo blocco genera un file sommario comprensivo di tutta l'elaborazione.

- PID 901 PPP_SUM: Genera un file sommario di tutti i processi che sono stati attivati.
- PID 902 PPP_DEL: Cancella i files temporanei.
- PID 903 BPE_CLN: Cancella i files di debugging.
- PID 999 DUMMY: Non fa nulla, serve ad indicare la fine del file PCF.

6.5.2 Strategia per l'elaborazione con le doppie differenze.

L'elaborazione mediante doppie differenze viene definita dal PCF RNX2SNX. Questa strategia permette la stima delle coordinate e dei parametri di correzione troposferica e il loro immagazzinamento sotto forma di files SINEX. Per ogni sessione le equazioni normali vengono salvate per poter essere utilizzate successivamente in una soluzione multi sessione. Le principali caratteristiche del PCF RNX2SNX sono:

- Rilevazione dei files in cui sono presenti gaps dei dati o di residui elevati nei files di osservazione. Rimozione automatica degli stessi.
- Stima dell'ambiguità a valori interi per linee di base fino a 2000 Km attraverso la strategia QIF (*quasi-ionosphere free strategy*).
- Soluzione finale per la rete che utilizza i minimi vincoli, realizzata minimizzando i parametri di traslazione su un sottoinsieme di coordinate ITRF2000. Verifica delle stazioni fiduciarie utilizzate attraverso una trasformazione di Helmert a 3 parametri. Nel caso di discrepanze la soluzione viene ricalcolata utilizzando un set ridotto di stazioni fiduciarie (eliminando quelle che non hanno superato il test).
- I SINEX risultanti consentono la rimozione dei vincoli o l'estrazione diretta delle coordinate relative alla soluzione ai minimi vincoli.

I files di input necessari all'esecuzione del PCF RNX2SNX (oltre ai RINEX e ai files dell'orbita e del polo) sono i seguenti:

- 1. Tabella delle abbreviazioni (file .ABB).
- 2. Coordinate a priori.
- 3. Velocità a priori.
- 4. Lista di stazioni utilizzate per definire il sistema di riferimento (file .FIX).

Copia dei files richiesti e creazione di un file di coordinate a priori. Il blocco seguente copia i files richiesti per l'elaborazione in un'area temporanea.

- PID 001 R2S_COP: lo script copia i files richiesti in un'area temporanea. Quando richiesto alcuni files vengono rinominati in accordo alla variabile V_B (che contiene i prefissi di tali files) e alla data a cui si riferisce la sessione. I files richiesti dallo script in questione sono:

File	Sorgente	Destinazione	Rinominazione
RINEX di osservazione	ORX	RAW	No
Files delle orbite precise	ORB	ORB	Si
Files del moto del polo	ORB	ORB	Si
Files .DCB	STA	STA	Si
Files .ION	ATM	ATM	Si
Lista delle stazioni fiduciarie	STA	STA	Si

- PID 002 COOVEL: Propaga le coordinate delle stazioni che realizzano il sistema di riferimento dall'epoca 01 gennaio 2000 all'epoca della sessione corrente.

Preparazione dei files del polo, dell'orbita e di clock. In questa sezione vengono eseguiti alcuni passaggi preparatori, in particolare i files delle orbite e del polo vengono convertiti nel formato specifico di Bernese.

- PID 101 POLUPD: Il file del moto del polo in formato IERS (di estensione .IEP) viene riformattato in formato Bernese. Tale file sarà utilizzato in tutte le elaborazioni seguenti.
- PID 111 PRETAB: Il file delle orbite precise viene convertito in formato binario. Vengono inoltre estratte le correzioni di clock dei satelliti ed immagazzinate in un file di estensione .CLK.
- PID 112 ORBGEN: Partendo dall'orbita contenuta nel file generato dal processo precedente, le equazioni del moto vengono integrate.

Conversione e sincronizzazione dei dati di osservazione. Questo blocco converte i files RINEX di osservazione in files binari e allinea gli orologi dei ricevitori al tempo GPS.

- PID 201 RNXGRA: Viene creato un sommario di tutte le osservazioni disponibili. Riporta informazioni su tutti i satelliti osservati, sulle stazioni coinvolte e sulle loro caratteristiche. Il file generato da questo processo è utile per evidenziare possibili problemi di tracking. Se in un files RINEX vengono trovati gaps molto grandi, allora tali files vengono eliminati dall'insieme di RINEX da elaborare.

- PID 211 RXOBV3AP: Cancella i files di osservazione già esistenti e prepara la parallelizzazione del processo successivo. Il grado di parallelizzazione è controllato dalla variabile V_CLU. Se tale variabile non è definita allora per ogni RINEX di osservazione viene attivato il processo successivo. Se a V_CLU viene assegnato un numero intero allora il processo successivo viene attivato considerando un cluster di stazioni.
- PID 212 RXOBV3: Confronta gli headers dei files RINEX con le informazioni contenute nel file di informazioni .STA e se si verifica una discrepanza blocca il processo di elaborazione. Questo viene fatto per mantenere il più possibile stabile la configurazione della rete.
- PID 221 CODSPPAP: Prepara la parallelizzazione del programma CODSPP. Questo processo attende che l'esecuzione dei processi 002, 112 e 212 sia conclusa per potere garantire che i files necessari al proseguimento dell'elaborazione (coordinate a priori, moto del polo e orbite, files di osservazione).
- PID 222 CODSPP_P: Questo processo effettua il posizionamento puntuale utilizzando dati non differenziati, allo scopo di sincronizzare i ricevitori al livello del microsecondo. Dal momento che gli orologi dei ricevitori non sono stabili al punto da poter modellare le correzioni tramite polinomi, le correzioni vengono determinate per ogni epoca di osservazione.
- PID 223 CODXTR: Questo processo genera un file di sommario relativo all'esecuzione del processo precedente. Il file è utile per identificare le stazioni che presentano un cattivo funzionamento (quelle che hanno un r.m.s alto o presentano molti outliers).

Generazione delle linee di base, preprocessamento e screening delle osservabili di fase, generazione delle equazioni normali associate ai clusters di stazioni. Questo blocco è una parte essenziale della procedura di elaborazione. In questa sezione vengono generate le osservabili alle singole differenze, vengono rilevati e corretti i cycle slips e vengono rimosse le cattive osservazioni.

- PID 301 SNGDIF: Questo processo cancella eventuali files già esistenti contenenti le singole differenze, seleziona un insieme di linee di base e crea i files delle singole differenze.
- PID 311 MAUPRPAP: Parallelizza il processo successivo.
- PID 313 MAUPRP_P: Questo script attiva il programma MAUPRP, che pre processa le osservazioni alle singole differenze. Se l'ampiezza di un cycle slip non può essere determinata, allora viene introdotto una nuova ambiguità. Inoltre osservazioni non accoppiate (cioè che mancano di una delle due fasi L1 o L2 ad una specifica epoca) ed effettuate a piccoli angoli di elevazione vengono segnalate con apposite flags per non essere più utilizzate in seguito.

- PID 313 MPRXTR: Crea un file sommario dei processi precedenti.
- PID 321 GPSEDTAP: Parallelizza il processo successivo.
- PID 322 GPSEDT_P: Questo script effettua uno screening delle osservabili di fase alle doppie differenze. Attiva 4 programmi:
 1. GPSEST: crea i files dei residui.
 2. RESRMS: ricerca outliers nei residui.
 3. SATMARK: segna gli outliers con apposite flags.
 4. GPSEST: crea la soluzione finale e il file delle equazioni normali.
- PID 331 GPSCHK: Controlla i risultati del processo precedente e rigetta i dati delle stazioni mlfunzionanti. Utilizza in sequenza i programmi:
 1. RESRMS: crea files di sommario dei files di residui creati al punti 1) e 4) del processo 322.
 2. RESCHK: crea la statistica dei residui e evidenzia le stazioni malfunzionanti.

Se il Programma RESCHK evidenzia una stazione malfunzionante, il nome di tale stazione viene scritto in un file che definisce l'insieme di stazioni i cui dati vengono rigettati dalla procedura di elaborazione. Una volta eliminate lo script GPSCHK torna al processo 301, crea un nuovo insieme di linee di base e ripete il pre processamento. Il loop che coinvolge i processi 301-331 viene continuato finchè tutte le stazioni sono accettate.

Calcolo della soluzione (con ambiguità reali). Questa sezione è dedicata alla stima delle ambiguità. Dopo aver calcolato una soluzione con le ambiguità reali viene applicata la strategia QIF per risolvere le ambiguità al loro valore intero.

- PID 401 ADDNEQ2: Genera una soluzione per la rete utilizzando le equazioni normali create al passo 2) del processo 322. Le coordinate e le correzioni troposferiche vengono salvate per un uso successivo.
- PID 402 GPSXTR: Crea un file sommario riguardante la soluzione con ambiguità reali.
- PID 411 GPSQUIAP: Prepara la parallelizzazione del processo successivo.
- PID 412 GPSQIF_P: Per ogni linea di base viene attivato il programma GPSEST. Le correzioni troposferiche e le coordinate calcolate nella soluzione con ambiguità reali vengono introdotte e fissate. Le ambiguità vengono risolte ai loro valori interi mediante l'algoritmo QIF.
- PID 413 GPSXTR: Crea un file sommario del passo precedente.

Calcolo della soluzione (con ambiguità fissate). Una volta che sono stati determinati i valori interi delle ambiguità, tali ambiguità vengono fissate e viene calcolata una nuova soluzione. In questa sezione vengono inoltre evidenziati le stazioni fiduciarie problematiche, e nel caso esistano, viene ricalcolata la soluzione tralasciando tali stazioni.

- PID 501 GPSEST: Viene calcolata una soluzione fissando le ambiguità e vengono generate le equazioni normali. I parametri stimati sono coordinate e ritardo troposferico zenitale. Le coordinate delle stazioni fiduciarie non vengono fissate.
- PID 511 ADDNEQ2: Viene calcolata la soluzione definitiva utilizzando le equazioni normali calcolate dal processo precedente. La realizzazione del datum geodetico viene effettuata utilizzando i minimi vincoli su un set di coordinate di stazioni fiduciarie. Vengono inoltre generati i SINEX troposferici contenenti il ritardo zenitale troposferico.
- PID 512 GPSXTR: Crea un file sommario relativo al processo precedente.
- PID 513 COMPAR: Confronta l'insieme delle coordinate stimate con i risultati ottenuti dalle sessioni precedenti.
- PID 514 HELMR1: La stima delle coordinate di tutte le stazioni fiduciarie viene verificata mediante una trasformazione di Helmert. Se i residui nelle coordinate di qualche stazione sono superiori ad un valore di soglia, allora tale stazione viene rimossa dall'elenco delle stazioni fiduciarie e la soluzione viene ricalcolata a partire dal processo 511.
- PID 521 ADDNEQ2: questo script serve a diminuire la dimensione dei files di equazioni normali fissando i parametri troposferici.
- PID 522 GPSXTR: Crea un file sommario relativo al processo precedente.

Creazione dei files di sommario

- PID 901 R2S_SUM: Crea un file di sommario comprensivo dei risultati più importanti dell'elaborazione:
 1. Messaggi di errore
 2. Informazioni su generazione dell'orbita, posizionamento puntuale e screening dei dati.
 3. Elenco delle stazioni rigettate.
 4. Sommario sul calcolo delle ambiguità per mezzo dell'algoritmo QIF.
 5. Risultati preliminari e finali (per coordinate e troposfera).
 6. Verifica della definizione del datum geodetico.

- PID 902 R2S_SAV: Salva i files in output in una directory specificata dall'utente.
- PID 902 R2S_DEL: Cancella i files temporanei.
- PID 904 BPE_CLN: Cancella i files di debugging dalla directory BPE.
- PID 999 DUMMY: Indica la fine della procedura di elaborazione.

6.5.3 Combinazione delle soluzioni giornaliere.

I files di equazioni normali giornalieri generati dal processo 521 del PCF RNX2SNX vengono utilizzati per calcolare una soluzione settimanale. La procedura seguita è la seguente:

- Copiatura dei files di equazioni normali dalle directories giornaliere YY_DDD/SOL alla directory WKWWW/SOL.
- Combinazione dei files di equazioni normali tramite il PCF COMB. Tale PCF attiva il programma di combinazione delle equazioni normali ADDNEQ2; i files in input sono:
 1. Files delle equazioni normali .NQ0.
 2. Files delle coordinate a priori.
 3. Elenco delle stazioni fiduciarie .FIX.

Il processo genera 3 files: il file UPAWWW7.NQ0 (equazioni normali settimanali, relative alla settimana GPS WWWW), il file UPAWWW7.SNX (contenente la matrice di covarianza) e il file UPAWWW7.CRD contenente le coordinate a priori. La soluzione è allineata al sistema ITRF2000 tramite il metodo dei minimi vincoli (solo per i 3 parametri di traslazione) applicato all'insieme di stazioni specificate nel file .FIX.

6.5.4 Calcolo del ritardo troposferico zenitale.

Il ritardo troposferico zenitale viene calcolato utilizzando le equazioni normali giornaliere generate dal processo 511 del PCF RNX2SNX, fissando le coordinate ai valori medi settimanali. La procedura seguita è costituita dai seguenti passi:

- Copiatura del file delle coordinate settimanali UPAWWW7.CRD dalla directory WKWWW/STA alle directories giornaliere YY_DDD/STA.
- Esecuzione della stima dei parametri troposferici mediante il PCF TROPO. Tale PCF attiva il programma ADDNEQ2 che stima i ritardi troposferici tenendo fissate le coordinate ai valori settimanali.

Per ogni giorno vengono generati in output i SINEX troposferici (UPAWWW7D.TRO, WWWW = settimana GPS, D = giorno della settimana).

Capitolo 7

Riprocessamento CEGRN

7.1 Introduzione.

Nel capitolo precedente il campo di velocità nella regione europea è stato determinato per mezzo dello stacking delle equazioni normali EUREF. Abbiamo visto che questa procedura permette, tramite le operazioni elementari effettuate sulle equazioni normali (pre-eliminazione dei parametri e rinominazione dei siti), di diminuire l'effetto di outliers e cattivo funzionamento della strumentazione sulla determinazione della velocità dei siti. Purtroppo, a causa dell'utilizzo di osservabili alla doppie differenze, il cattivo funzionamento della strumentazione di un sito si riflette negativamente sui dati di tutti gli altri siti della rete. Perciò sarebbe preferibile effettuare il rigetto degli outliers a livello dei dati grezzi. Inoltre la combinazione multi anno delle equazioni normali risente della qualità del prodotto IGS (orbite precise e correzioni per il moto del polo), che è variata nel corso degli anni. Un eventuale riprocessamento di tutti i dati EUREF è discusso da anni, ma non è stato ancora effettuato essenzialmente per mancanza di risorse. In questo capitolo affronteremo il riprocessamento di una rete geodetica distribuita nella regione europea centro-orientale (CEGRN, Central European GPS Geodynamic Reference Network). Diversamente da quanto fatto per la combinazione EUREF, non è possibile analizzare le serie storiche in quanto le misure sono state effettuate una volta all'anno per gli anni 1994, 1995, 1996, 1997, ed ogni due anni in seguito (1999, 2001, 2003, 2005 e 2006). Per ovviare al problema della qualità variabile dei prodotti IGS si è fatto uso delle orbite e degli EOP ottenuti dal riprocessamento dei dati GPS relativi agli anni dal 1994 al 2005, effettuato dall'università di Potsdam (vedi [50]).

7.2 Descrizione delle campagne.

Riportiamo in questa sezione i dati che caratterizzano ogni campagna CEGRN.

Campagna	Numero di siti	giorni di campagna
CEGRN94	29	5
CEGRN95	40	7
CEGRN96	50	6
CEGRN97	45	7
CEGRN99	61	6
CEGRN01	56	7
CEGRN03	73	6
CEGRN05	100	6
CEGRN06	47	7

7.3 Linee guida del riprocessamento

Il riprocessamento dei dati CEGRN si basa sulla strategia di elaborazione alle doppie differenze delineata nei capitoli precedenti (strategia RNX2SNX), con qualche lieve modifica riguardante la definizione del sistema di riferimento. Le linee guida dettate dal consorzio CEGRN (vedi [46]) per mantenere l'uniformità tra le diverse soluzioni prodotte dai centri di analisi coinvolti nel progetto sono descritte dai punti seguenti:

1. Software: Bernese 5.
2. Lunghezza delle campagne giornaliere: 24 ore.
3. Utilizzo delle orbite IGS00b e degli EOPs ottenute dal riprocessamento delle Università di Potsdam e Monaco.
4. Inclusione dei siti addizionali IGS (ONSA, ZIMM, KOSG, METS e MATE).
5. Utilizzo della mapping function di Niell umida.
6. Stima del ritardo troposferico zenitale (utilizzando una sigma a priori di 5.0 m)
7. Osservazioni pesate in funzione dell'angolo di elevazione.
8. Soluzione con ambiguità fissate.
9. Coordinate a-priori con accuratezza di alcuni centimetri.
10. Utilizzo delle correzioni assolute per i centri di fase delle antenne (utilizzo dei valori IGS).
11. Angolo di cut off superiore o uguale a 5° .
12. Utilizzo delle informazioni ausiliarie, riguardanti cambiamenti di hardware, contenute nel file .STA ufficiale EUREF, aumentate con le informazioni contenute nei log files ufficiali CEGRN.

13. Utilizzo del file di correzioni mareali ufficiale CEGRN.
14. Coordinate della stazione JOZE fortemente vincolate ai valori a priori.
15. Stima del gradiente troposferico.
16. Utilizzo del modello mareale FES2004.

7.3.1 Descrizione dell'elaborazione giornaliera

La differenza principale tra una soluzione giornaliera UPA per l'EUREF, come descritta nei capitoli precedenti, e una soluzione UPA per CEGRN, consiste nel fatto che le coordinate della stazione JOZE in quest'ultima, sono fortemente vincolate ai valori ITRF05, (a livello di 0.1 mm). La soluzione ottenuta dallo stacking viene vincolata per mezzo dei minimi vincoli (solo sui parametri di traslazione) sulle seguenti stazioni:

BOR1	GRAZ	JOZE
KOSG	LAMA	METS
ONSA	PENC	ZIMM
WTZR	MATE	GOPE

Le informazioni ausiliarie (tipo di antenna, offset dell'antenna e tipo del ricevitore) derivano direttamente dal file ufficiale EUREF. Per gli altri siti le informazioni sono state estratte dalla documentazione relativa ad ogni sito. Un apposito script perl è stato utilizzato per riformattare i files contenenti tale informazione, allo scopo di minimizzare gli errori tipografici. Si è notato che la documentazione delle campagne meno recenti era lacunosa, in particolare era assente per quanto riguardava il radome utilizzato. Come regola, quando non è stato possibile risalire al tipo di radome, si è ipotizzato che il radome fosse assente (utilizzando la keyword NONE nell'apposito campo dello Station Information File). Per le campagne 1994-1995-1996 non sono disponibili i files .ION e i files .DCB, pertanto nelle relative elaborazioni tali informazioni non sono state utilizzate.

Le coordinate e le velocità delle stazioni di riferimento sono riferite al primo gennaio 2000 e sono espresse nel sistema di riferimento ITRF2005. Le coordinate degli altri siti, all'epoca della campagna, sono state ricavate dalle precedenti elaborazioni CEGRN, ottenute con orbite IGS. Questo fatto è sufficiente a garantire l'accuratezza centimetrica delle coordinate a priori, necessaria ad ottenere una stima corretta del ritardo troposferico. Le coordinate delle stazioni di riferimento sono state mappate alla posizione che occupavano all'epoca della campagna per mezzo delle loro velocità. Quando le coordinate a priori dei siti non erano disponibili, si è utilizzata la strategia PPP per ottenere una stima di esse.

Per la campagna CEGRN06 si sono utilizzate le orbite, gli EOPs e i Satellite Problem Files dell'IGS, in quanto le orbite di Monaco/Potsdam sono disponibili solo

per gli anni dal 1994 al 2005. Quando i dati erano disponibili, si sono introdotte nell'elaborazione le seguenti stazioni EPN.

GLSV	ORID	GSR1	BOGO
KRAW	MIKL	CAOP	PUGS

7.4 Stacking delle equazioni normali di campagna

Per ogni campagna sono state combinate le equazioni normali giornaliere (ridotte, cioè contenenti l'informazione riguardante le sole coordinate). Le statistiche di ogni soluzione di campagna sono riportate nella tabella (). La soluzione è stata allineata all'ITRF05 utilizzando i minimi vincoli (non-net translation condition, che implica che il baricentro del sistema di riferimento combinato deve coincidere con il baricentro del sistema di riferimento ITRF05).

Campagna	Numero di siti	$\frac{chi^2}{DoF}$	A posteriori RMS
CEGRN94	29	1.12	0.00106
CEGRN95	40	1.86	0.00136
CEGRN96	50	1.86	0.00136
CEGRN97	45	1.51	0.00123
CEGRN99	61	1.77	0.00133
CEGRN01	56	1.73	0.00132
CEGRN03	73	1.93	0.00139
CEGRN05	100	1.83	0.00135
CEGRN06	47	1.73	0.00132

Si osserva che il rapporto $\frac{chi^2}{DoF}$ rimane sempre vicino all'unità, e inoltre non varia molto al variare delle campagne. Questo significa che:

- Non sono presenti significativi outliers.
- La qualità di orbite ed EoPs è omogenea.

I grafici della ripetibilità permettono di determinare quali siti risultano più problematici. I risultati sono riportati nella tabella.

Campagna	sito	descrizione
CEGRN99	VRN1	Cattiva ripetibilità verticale
CEGRN01	HUTB	Cattiva ripetibilità della componente Est
CEGRN05	BJEL, KABA	Cattiva ripetibilità verticale

I grafici mostrano che, a parte i siti evidenziati, le ripetibilità sono dell'ordine di grandezza di alcuni millimetri. La ripetibilità della componente verticale è sempre maggiore di quella delle componenti orizzontali.

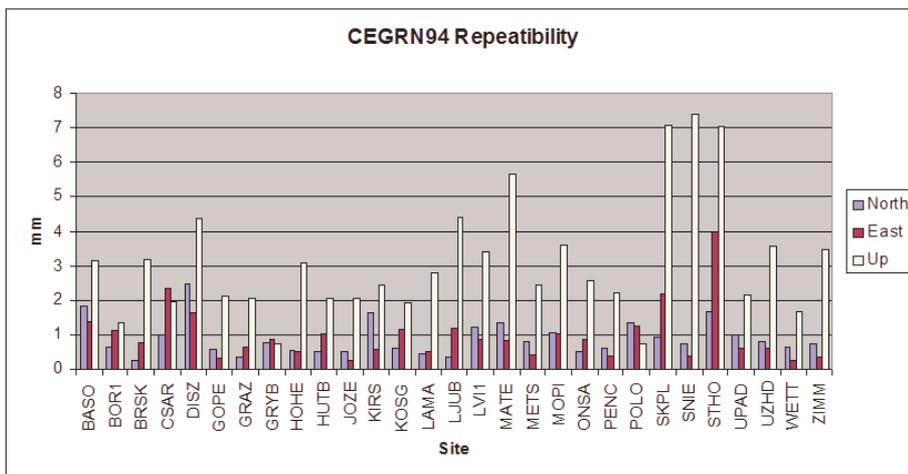


Figura 7.1: Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN94

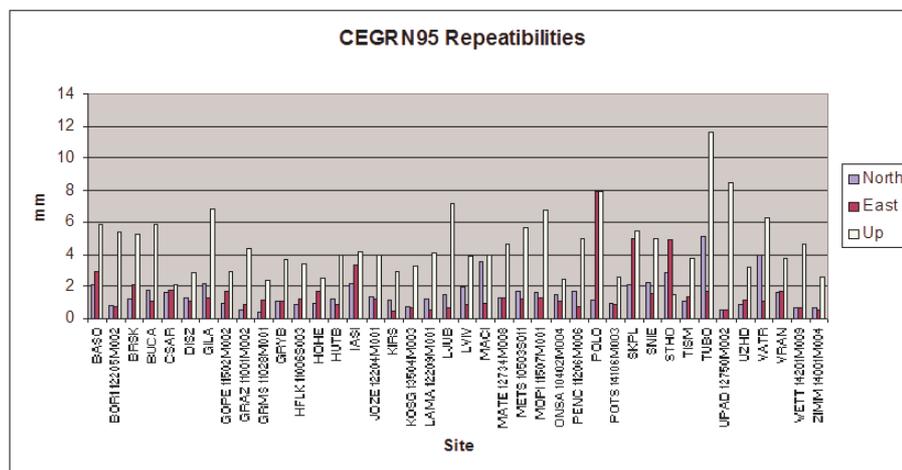


Figura 7.2: Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN95

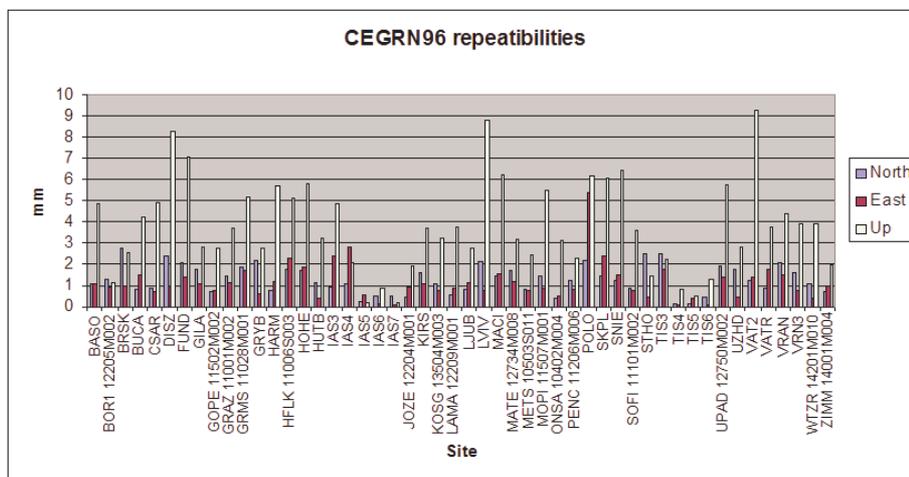


Figura 7.3: Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN96

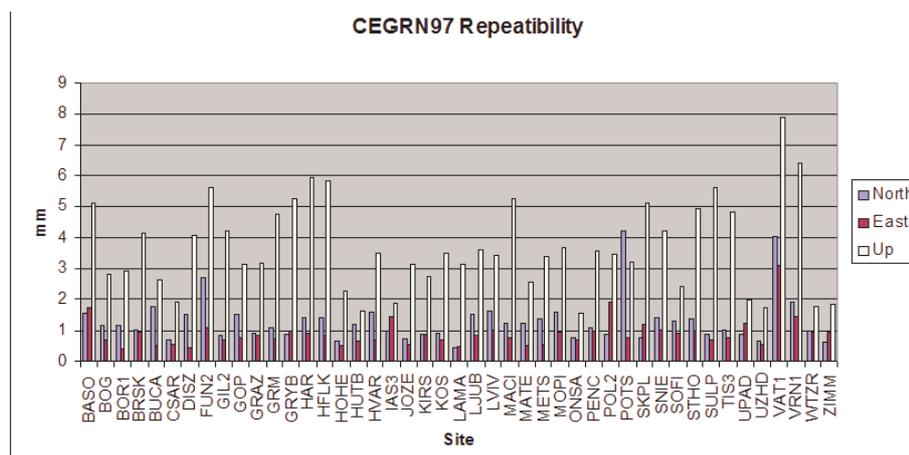


Figura 7.4: Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN97

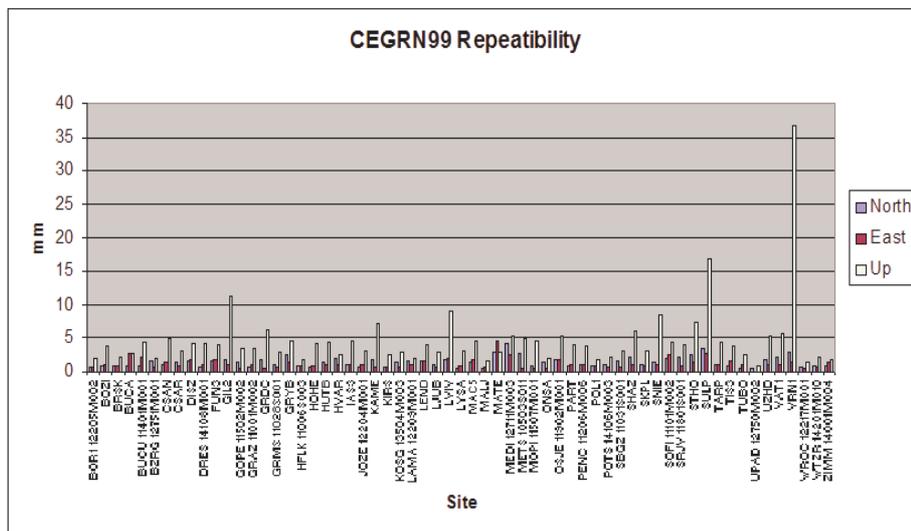


Figura 7.5: Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN99

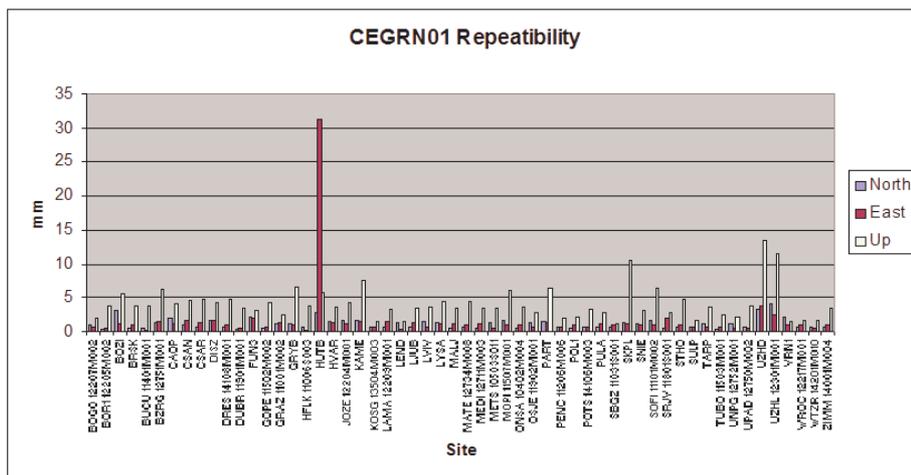


Figura 7.6: Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN01

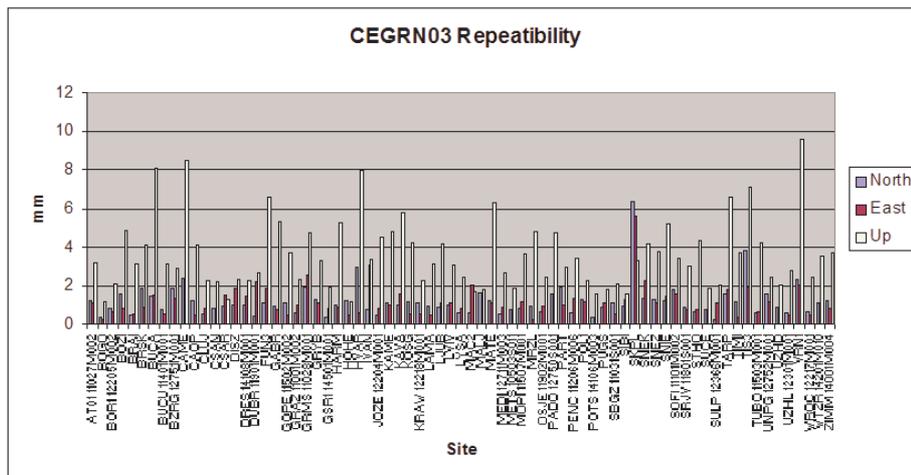
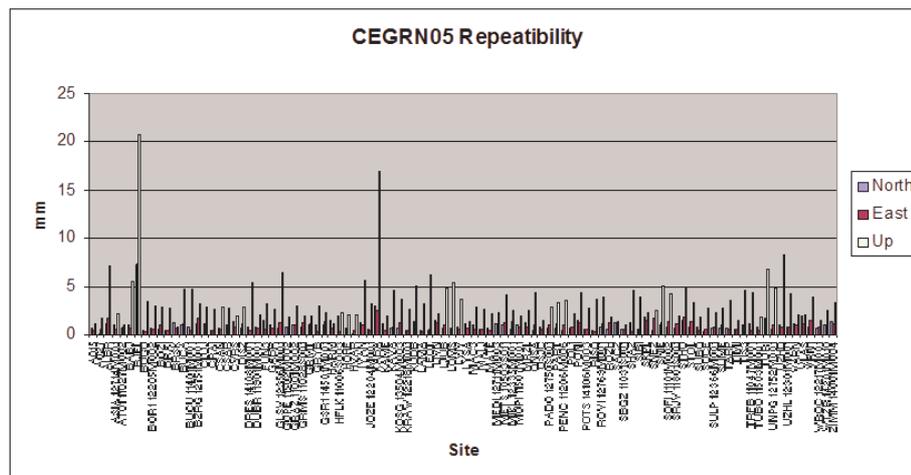
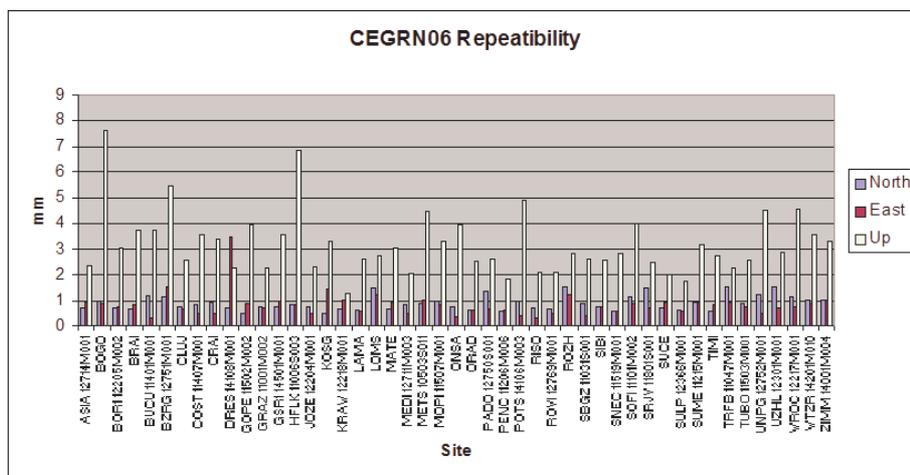


Figura 7.7: Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN03



Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN05

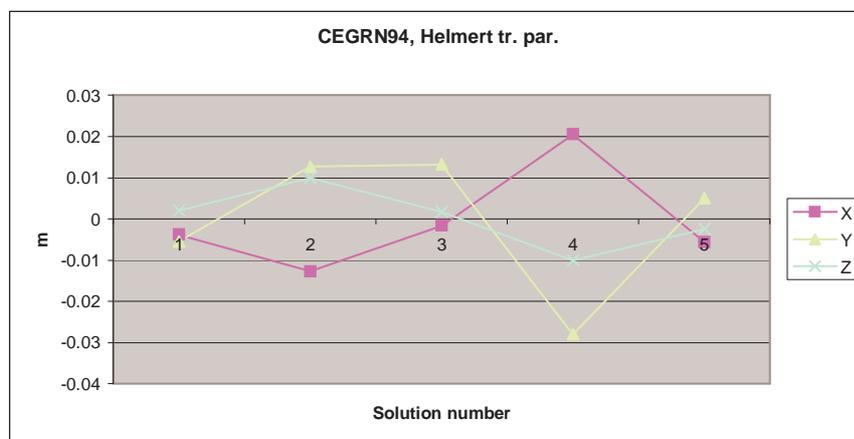


Ripetibilità dei siti, campagna CEGRN06

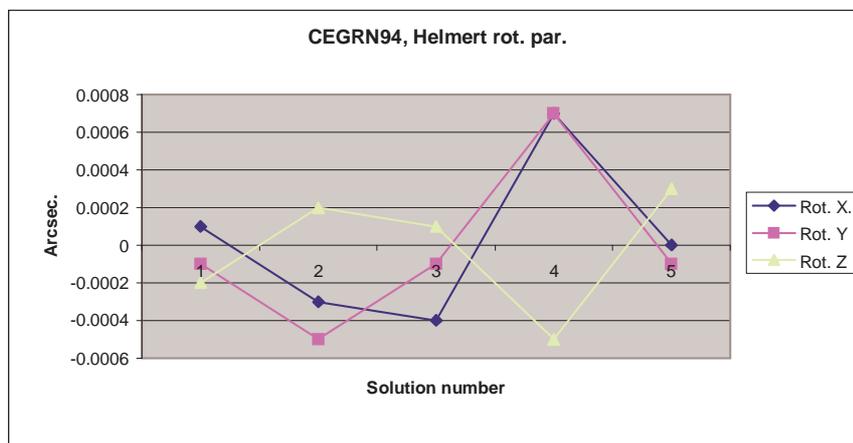
7.4.1 Grafici dei parametri di Helmert

Per verificare che il riferimento combinato realizzato in ciascuna campagna sia definito consistentemente è necessario analizzare i grafici dei parametri di Helmert. L'analisi delle ripetibilità e dei residui ha mostrato che il comportamento delle stazioni fiduciarie non presenta problemi particolari. Dai grafici dei parametri di Helmert si vede che i parametri di traslazione non sono mai superiori a 3 cm, e che i parametri di rotazione sono inferiori a 0.0008 secondi di arco. Tali valori ci fanno supporre che ogni sistema di riferimento combinato sia stato definito consistentemente.

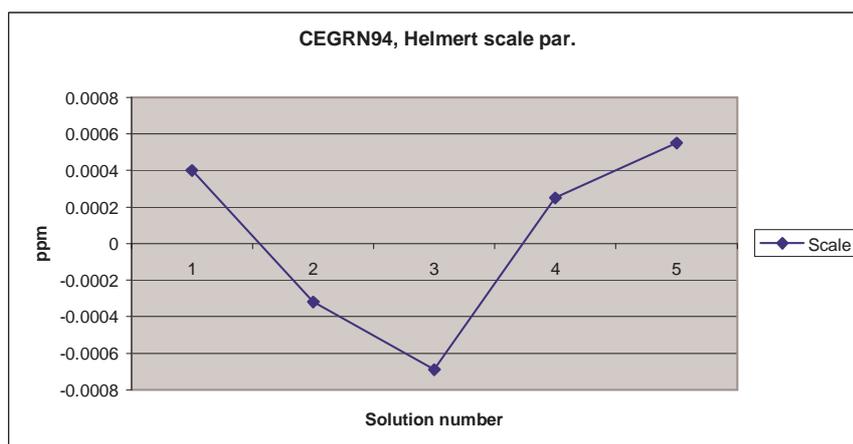
Grafici dei parametri di Helmert per la campagna CEGRN94



Parametri di Helmert per la traslazione, CEGRN94

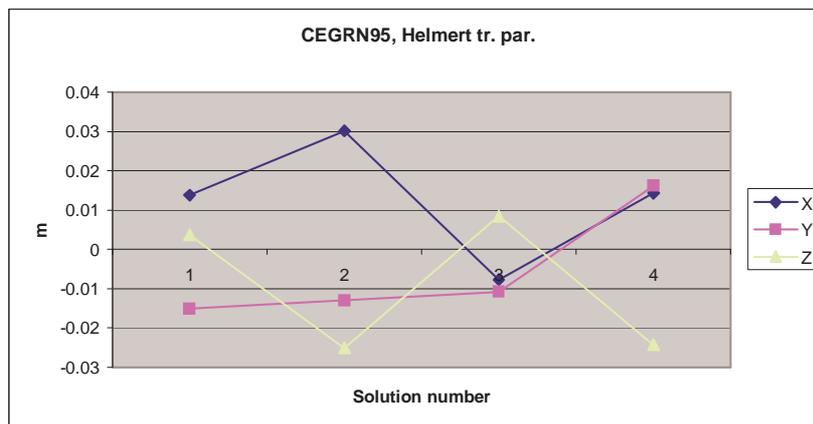


Parametri di Helmert per la rotazione, CEGRN94

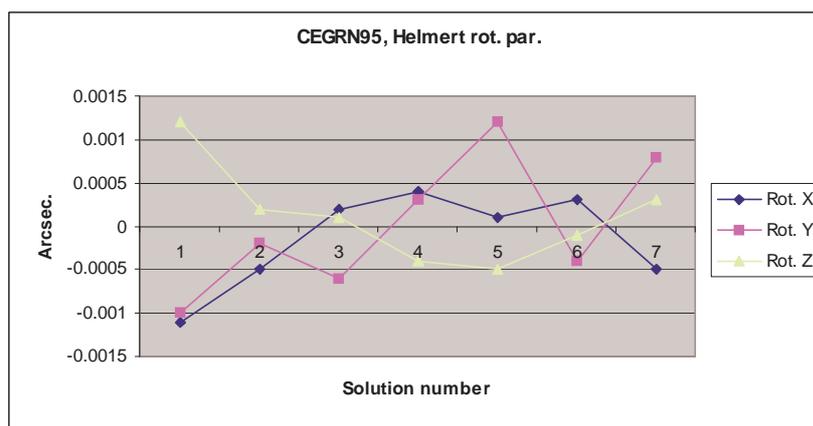


Fattore di scala, CEGRN94

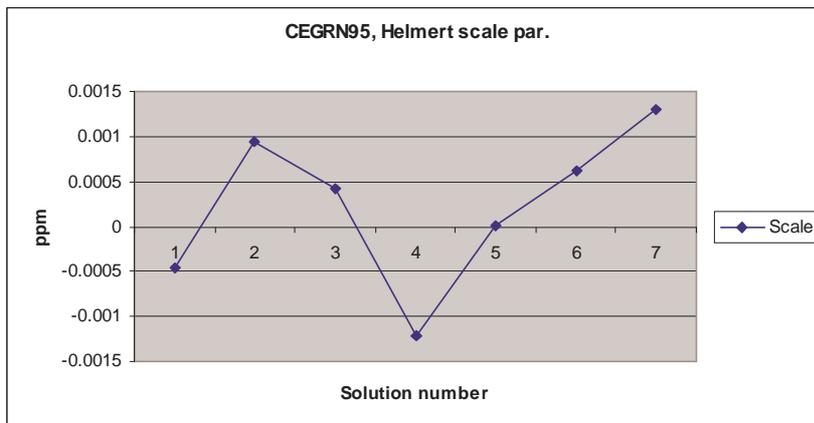
Grafici dei parametri di Helmert per la campagna CEGRN95.



Parametri di Helmert per la traslazione, CEGRN95.

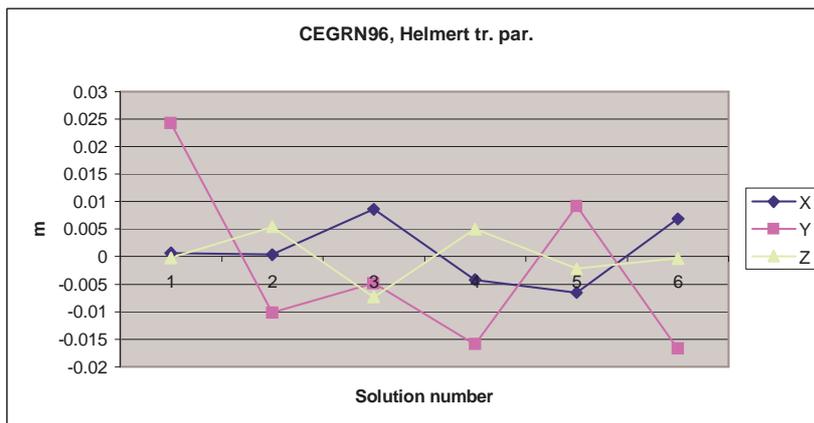


Parametri di Helmert per la rotazione. CEGRN95.

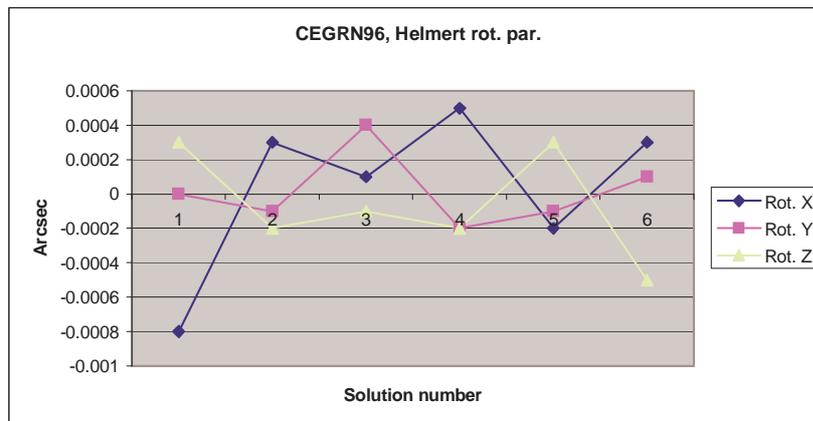


Fattore di scala. CEGRN95.

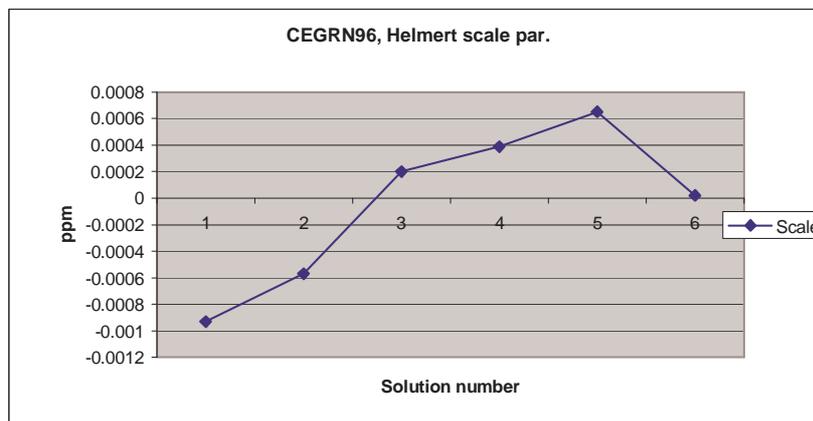
Grafici dei parametri di Helmert per la campagna CEGRN96.



Parametri di traslazione di Helmert. CEGRN96.

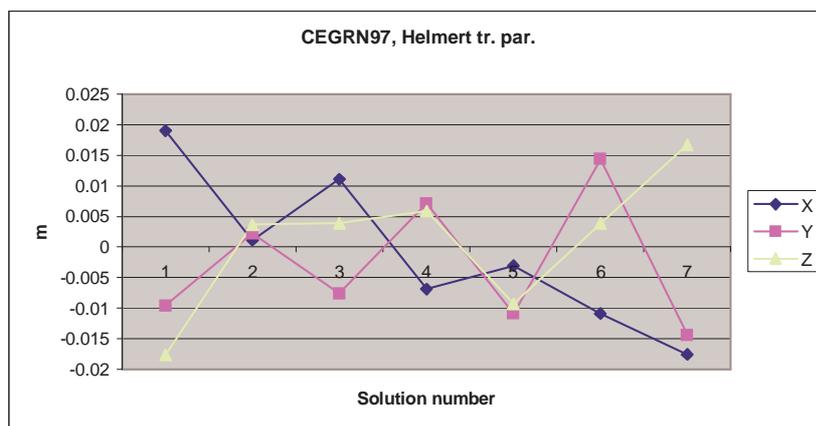


Parametri di rotazione di Helmert. CEGRN96.

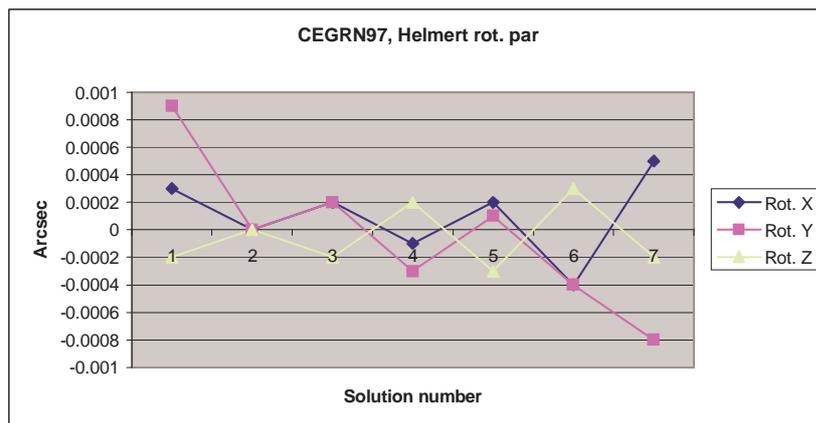


Fattore di scala. CEGRN96.

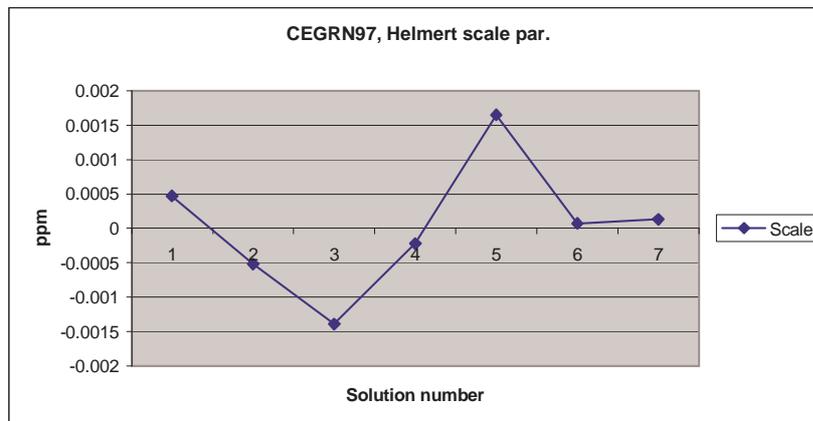
Grafici dei parametri di Helmert per la campagna CEGRN97.



Parametri di traslazione di Helmert. CEGRN97.

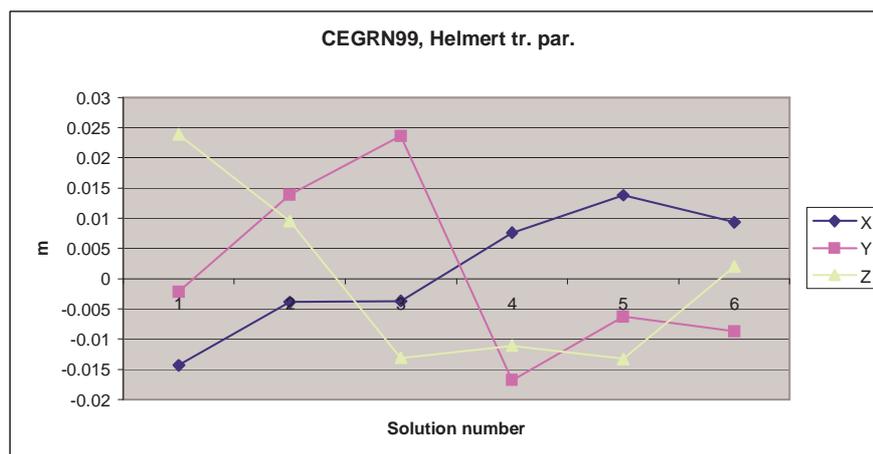


Parametri di rotazione di Helmert. CEGRN97.

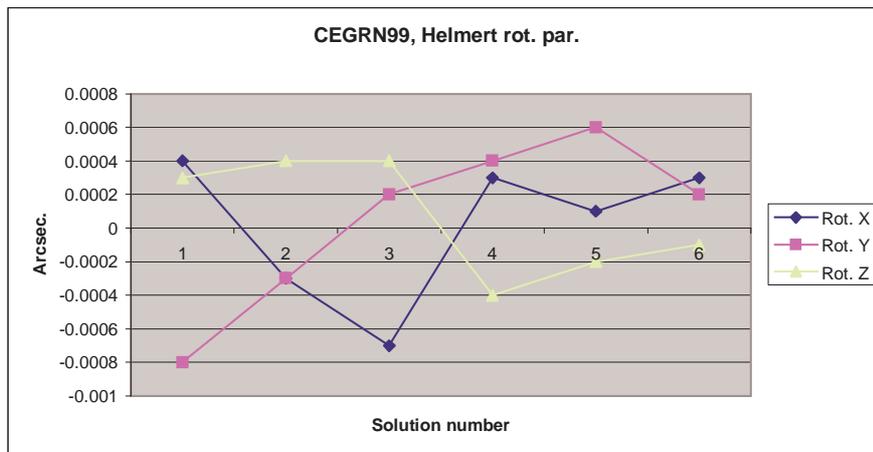


Parametri di scala di Helmert. CEGRN97.

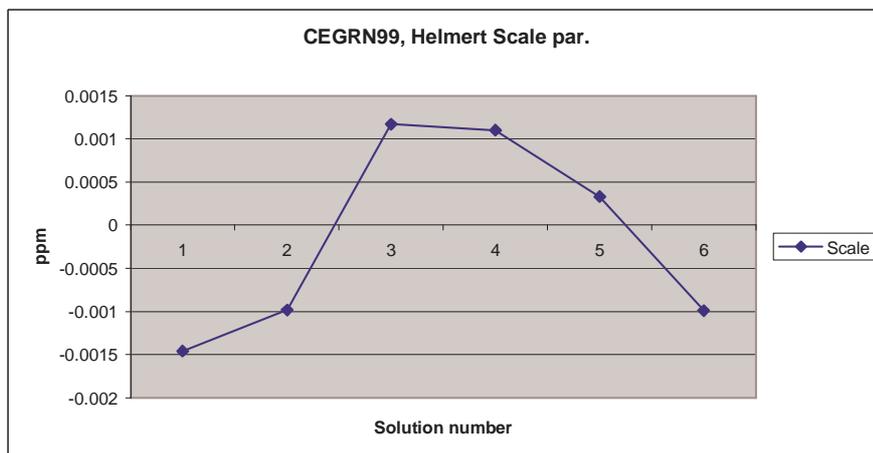
Grafici dei parametri di Helmert per la campagna CEGRN99.



Parametri di traslazione di Helmert. CEGRN99.

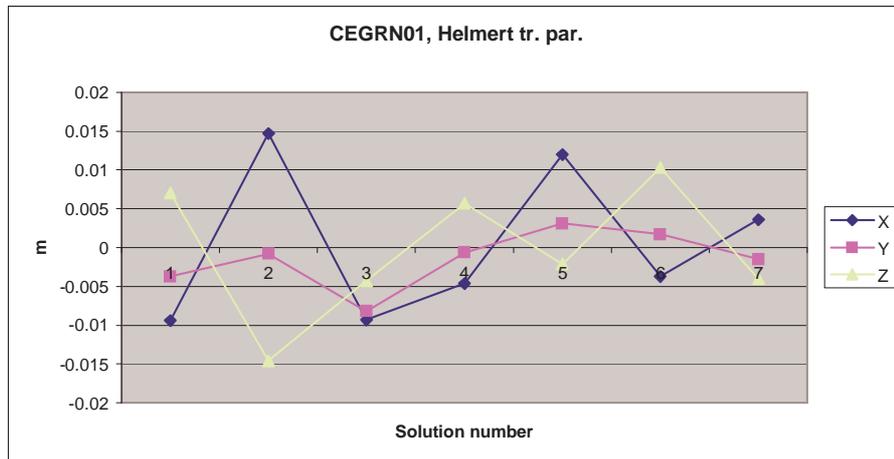


Parametri di rotazione di Helmert. CEGRN99.

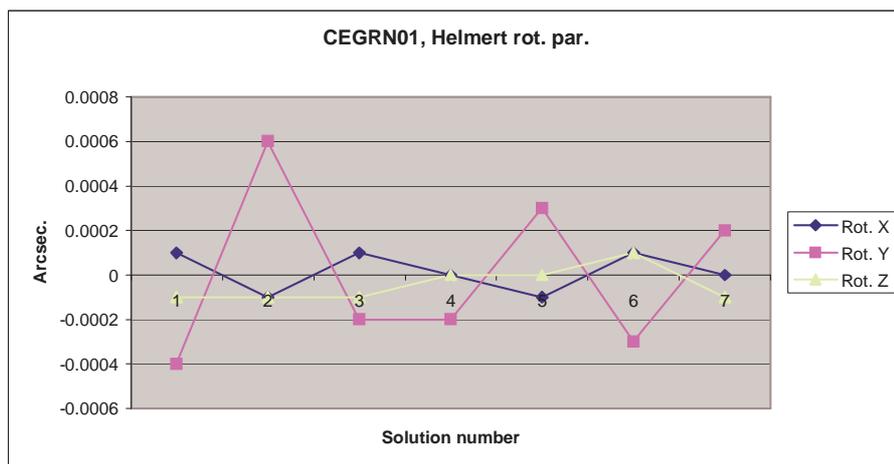


Fattore di scala, CEGRN99.

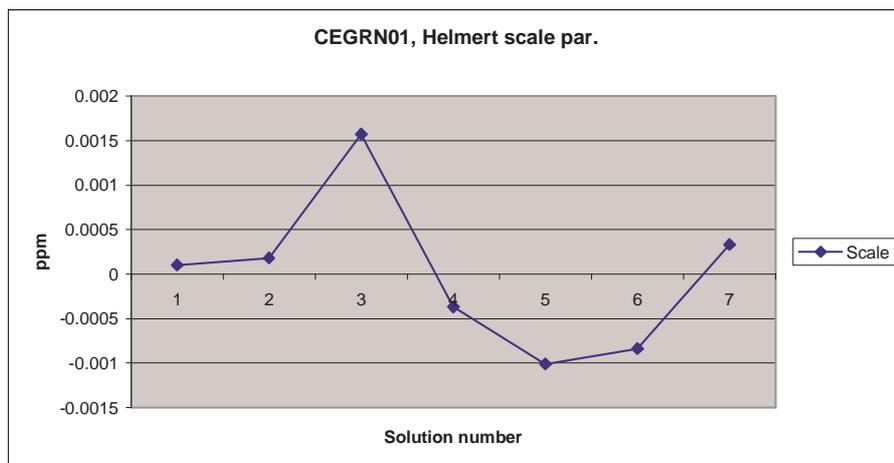
Grafici dei parametri di Helmert per la campagna CEGRN01.



Parametri di traslazione di Helmert. CEGRN01.

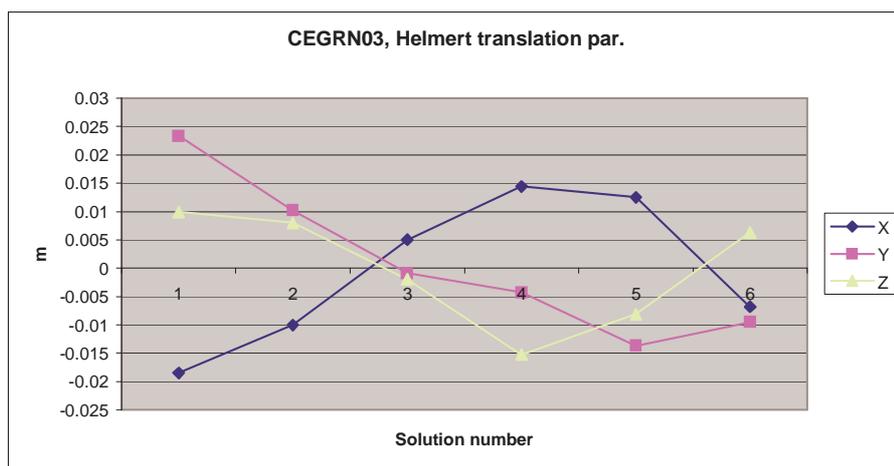


Parametri di rotazione di Helmert. CEGRN01.

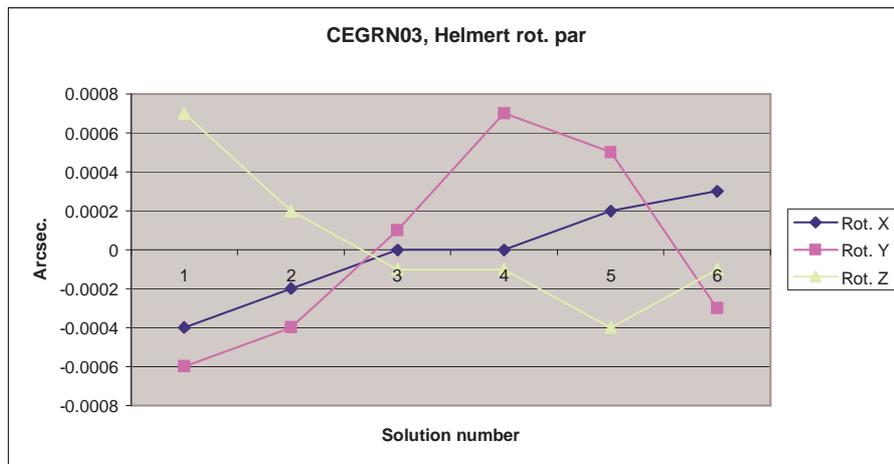


Fattore di scala. CEGRN01.

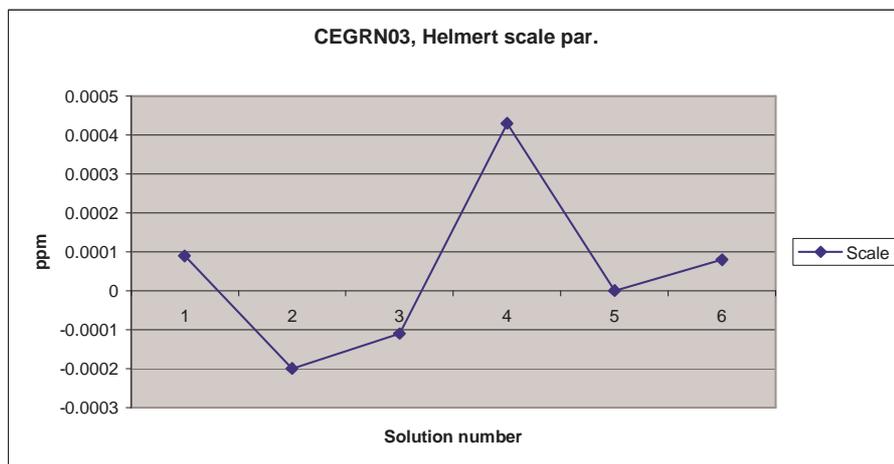
Grafici dei parametri di Helmert per la campagna CEGRN03.



Parametri di traslazione di Helmert. CEGRN03.

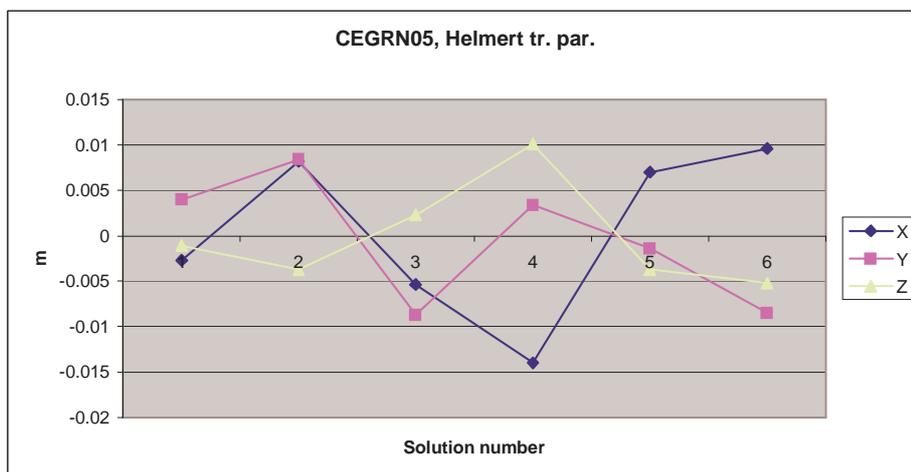


Parametri di rotazione di Helmert. CEGRN03.

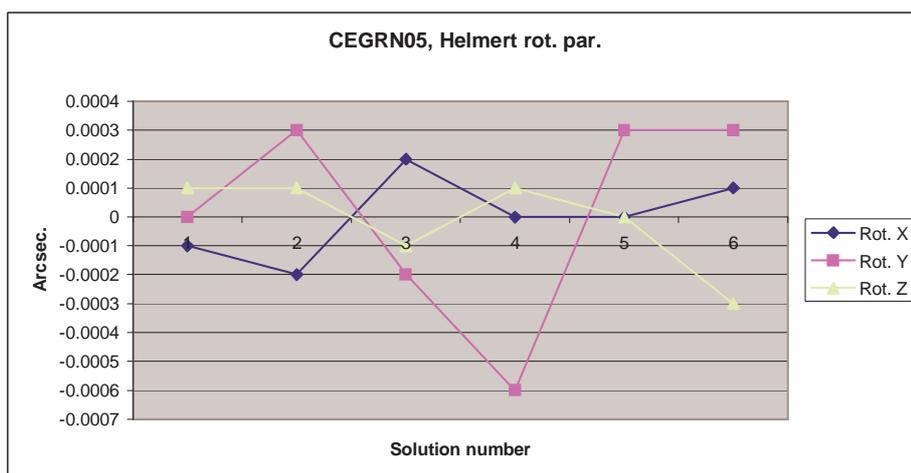


Fattore di scala. CEGRN03.

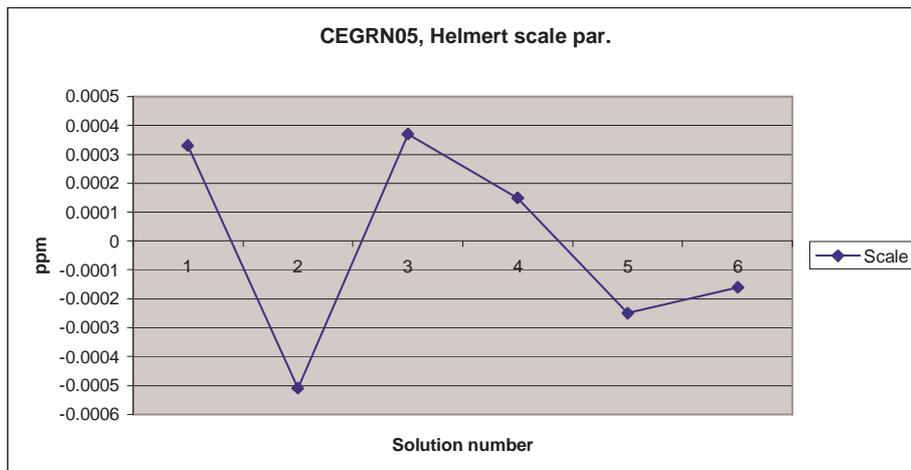
Grafici dei parametri di Helmert per la campagna CEGRN05.



Parametri di traslazione di Helmert. CEGRN05.



Parametri di rotazione di Helmert. CEGRN05.



Fattore di scala. CEGRN05.

7.5 Soluzione multi-anno

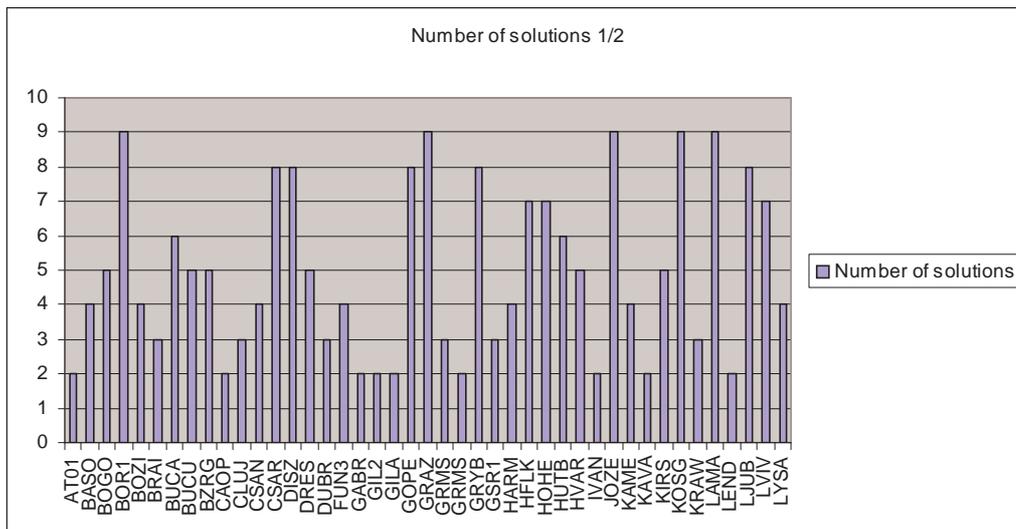
Una volta che la consistenza di ciascuna soluzione di campagna è stata verificata, è possibile effettuare una combinazione multianno, allo scopo di stimare le velocità dei siti. I siti riportati nella seguente tabella sono stati utilizzati per definire il sistema di riferimento, attraverso i minimi vincoli imposti sui soli parametri di translazione. Le velocità dei siti che costituiscono il riferimento sono state vincolate ai valori ITRF 2005 (con una sigma di 0.1 mm/anno nelle componenti x,y,z). Le velocità a priori per i siti che non fanno parte del riferimento sono di 0.0 mm/anno.

Individuazione dei siti che presentano un comportamento problematico.

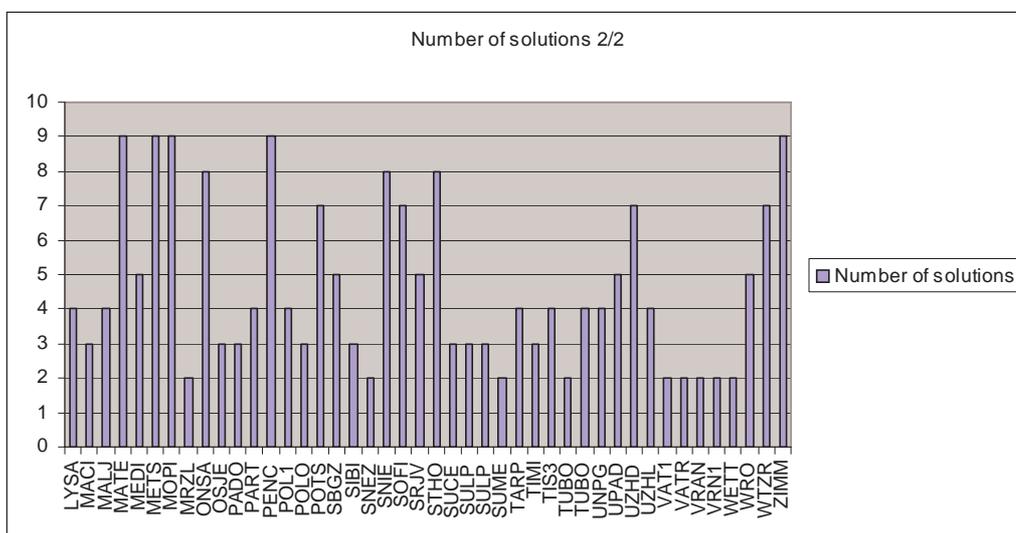
Sappiamo che l'attendibilità della stima delle velocità dipende da tre fattori:

1. Numero di dati.
2. Intervallo temporale sul quale si distribuiscono i dati.
3. Qualità intrinseca dei dati.

La strategia scelta per minimizzare gli effetti dovuti consiste nella preeliminazione dalle equazioni normali dei siti che presentano un'elevata ripetibilità. Inoltre sappiamo che per ottenere una stima attendibile delle velocità è necessario che le osservazioni siano distribuite su un intervallo di tempo maggiore di tre anni. I siti caratterizzati da un intervallo di osservazione inferiore ai tre anni o che hanno al più due osservazioni sono stati vincolati a valori nulli delle velocità verticali. Il numero di osservazioni relative a ciascun sito è riportato nei seguenti grafici:

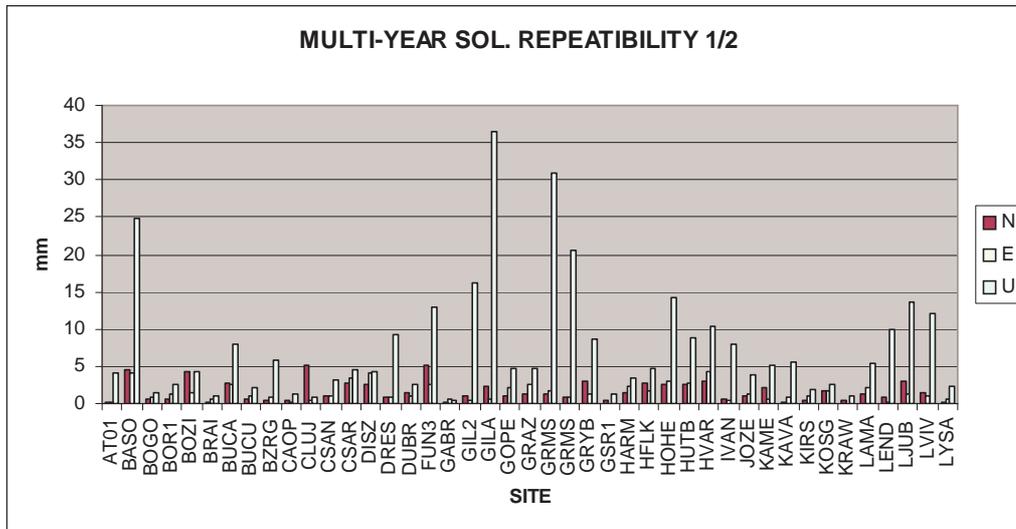


Numero di soluzioni di campagna per ogni sito (1/2).

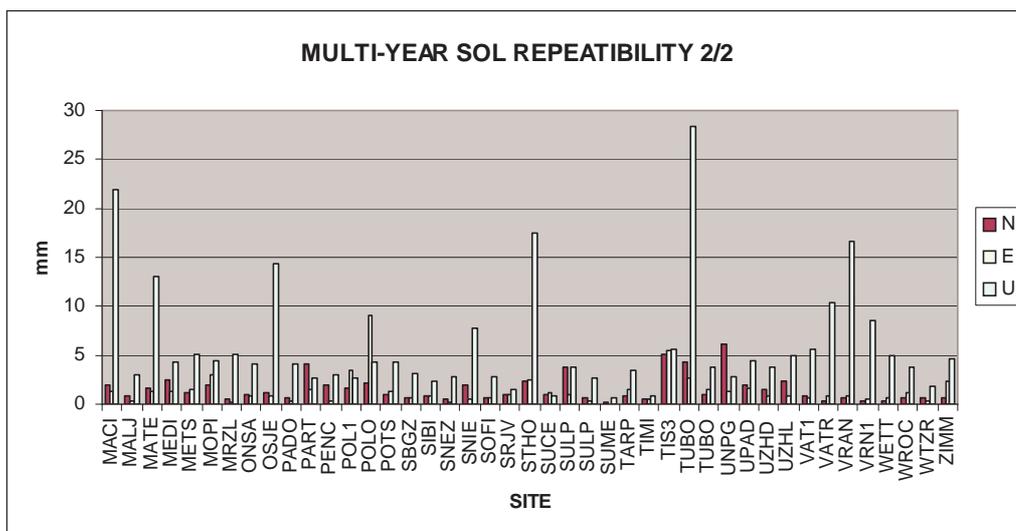


Numero di soluzioni di campagna per ogni sito (2/2).

Le ripetibilità della soluzione multianno, per ogni sito, sono riportate nei seguenti grafici:



Ripetibilità di ogni sito, soluzione multianno (1/2).



Ripetibilità di ogni sito, soluzione multianno (2/2).

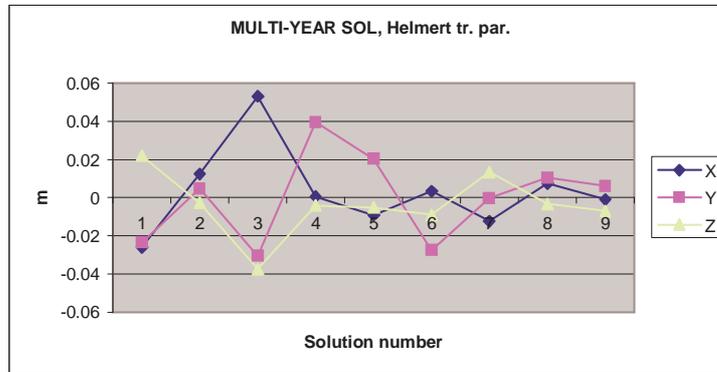
Sulla base dei grafici precedenti è stata definita la seguente lista di siti problematici.

AT01 11027M002	LEND	SNEZ	VATR
CAOP	GILA	IVAN	VRAN
GIL2	MRZL	GRMS 11028S001	WETT 14201M009
GLSV	TUBO	VAT1	GABR

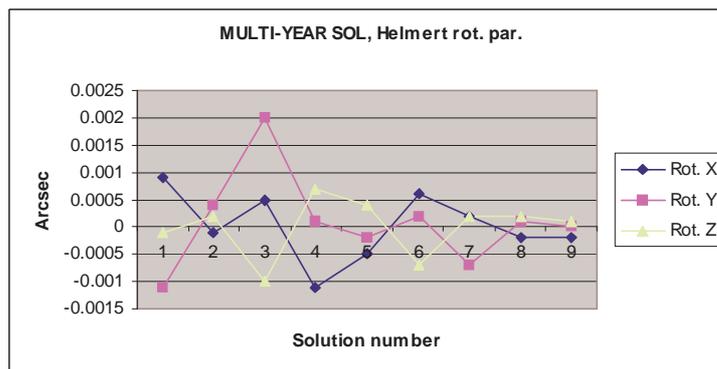
Il numero totale di siti di cui è stata stimata la velocità è 86.

7.5.1 Controllo della consistenza della soluzione multianno.

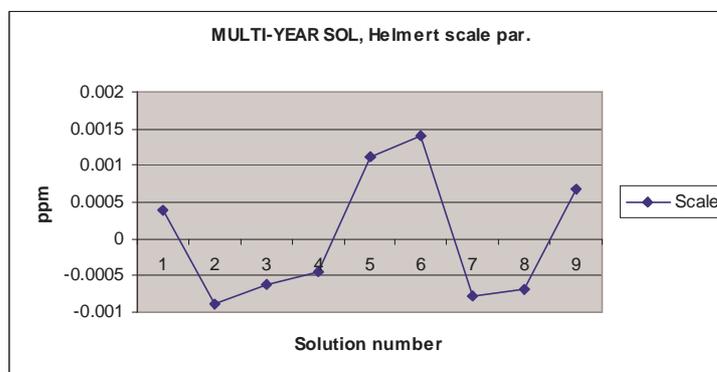
I grafici dei parametri di Helmert sono stati utilizzati per determinare la consistenza del sistema di riferimento combinato.



Parametri di traslazione, soluzione multianno.



Parametri di rotazione. Soluzione multianno.



Fattore di scala. Soluzione multianno.

Osserviamo che i parametri di traslazione sono sempre inferiori a 6 cm, e i parametri di rotazione sono inferiori a 0.002 secondi d'arco. Questo valori costituiscono un'ulteriore conferma della consistenza della soluzione calcolata.

7.5.2 Confronto con le velocità EPN

Come ulteriore verifica confrontiamo le velocità dei siti EPN che fanno parte della soluzione CEGRN con le velocità stimate attraverso lo stacking delle equazioni settimanali EUREF. I risultati sono riportati in tabella:

bucu	12.46	23	1.86	-1.16	-0.23	1.86
	11.61	23.56	2.14	-2.02	0.34	2.09
	0.85	-0.56	-0.28	0.86	-0.57	-0.23
bzrg	15.77	19.93	2.79	0.42	-0.18	2.79
	15.37	19.31	1.27	0.02	-0.79	1.21
	0.4	0.62	1.52	0.4	0.61	1.58
mopi	15.21	21	2.78	0.44	0.2	2.78
	14.85	20.91	3.26	0.08	0.11	3.21
	0.36	0.09	-0.48	0.36	0.09	-0.43
sbgz	15.34	20.09	1.64	0.15	0.77	1.64
	15.37	20.47	2.65	0.17	0.33	2.6
	-0.03	-0.38	-1.01	-0.02	0.44	-0.96
unpg	16.45	20.6	2.52	1.19	-0.49	2.52
	17.43	19.64	0.15	2.17	-1.45	0.1
	-0.98	0.96	2.37	-0.98	0.96	2.42
pado	15.82	21.1	0.36	0.52	0.63	0.02
	16.95	20.6	1	1.64	0.12	0.95
	-1.13	0.5	-0.64	-1.12	0.51	-0.93

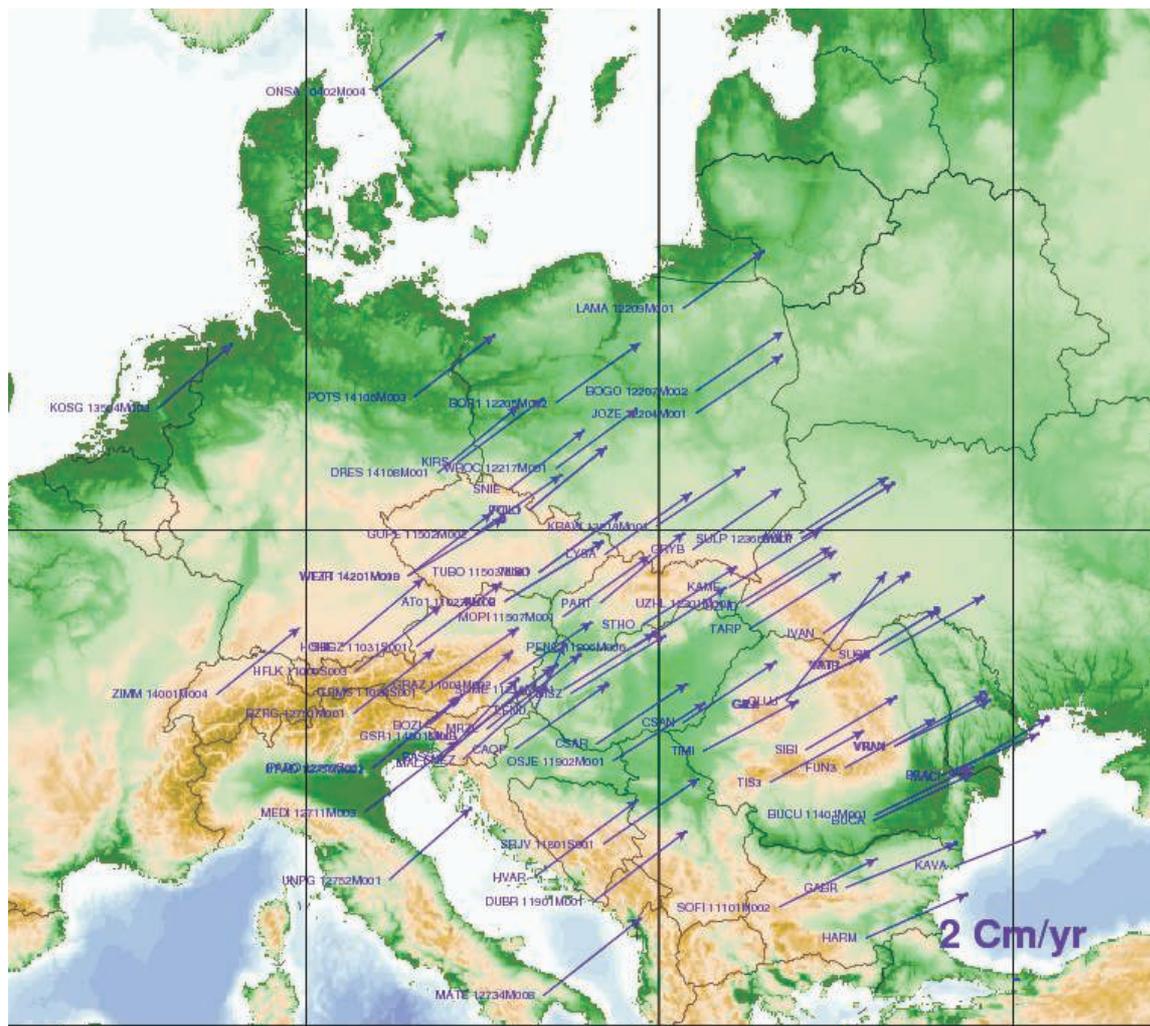
Confronto tra le velocità CEGRN e le velocità EPN, per 6 siti comuni. Velocità in mm/yr.

Per ogni sito le velocità sono espresse in mm/anno. Le colonne 2-3-4 riportano le componenti N, E, U delle velocità nel sistema di riferimento ITRF05, mentre le colonne 5-6-7 riportano le velocità nel sistema di riferimento ETRF05. Per ciascun sito la prima riga rappresenta le velocità EPN, la seconda le velocità CEGRN, la terza la differenza tra le due soluzioni. Come si vede l'accordo è molto buono in quanto le differenze tra le due soluzioni sono inferiori ad 1 mm/anno, fatta eccezione per i siti BZRG e UNPG. Le discrepanze della componente verticale per tali siti dipendono da discontinuità dovute a cambiamenti delle antenne. Dal momento che le soluzioni CEGRN sono costituite da pochi punti, non è stato possibile applicare la tecnica di rinominazione dei siti per trattare tali discontinuità.

7.5.3 Raffigurazione del campo di velocità CEGRN.

Riportiamo i grafici delle velocità orizzontali ricavati dalla soluzione CEGRN, sia nel sistema ITRF05 sia nel sistema ETRF05, e delle associate ellissi di errore.

Velocità ITRF05.



Campo di velocità preliminare CEGRN, ITRF05.

Velocità ETRF05

Osserviamo che i siti CLUJ e LEND hanno velocità ETRF anomale. Per quanto riguarda LEND, tale fatto è dovuto alla scarsità di soluzioni di campagna presenti (solo 2); Il sito CLUJ presenta instabilità locali che non permettono una stima affidabile della velocità, per questa ragione è stato eliminato dalla rete CEGRN.

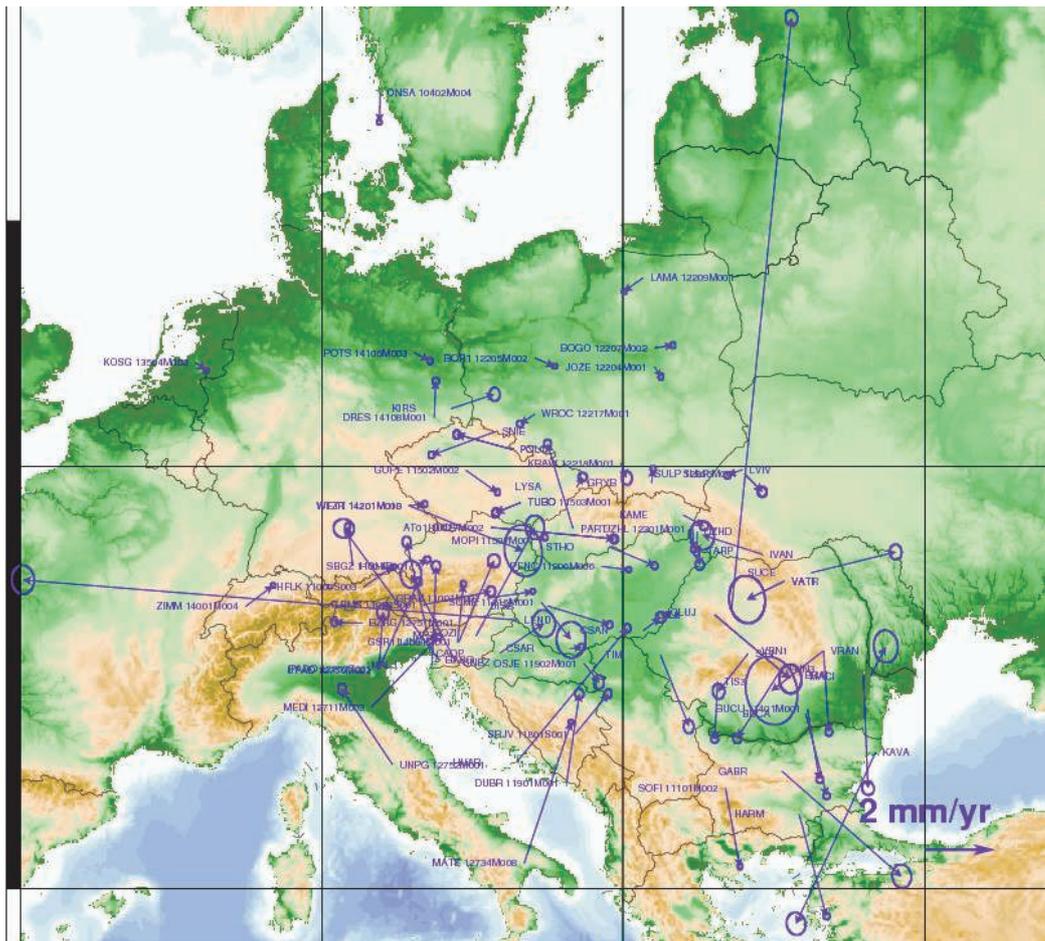


Figura 7.8: Campo di velocità preliminare CEGRN, ETRF.

Capitolo 8

Determinazione del campo di velocità

8.1 Introduzione

Nei precedenti capitoli abbiamo visto come è possibile determinare le coordinate di una rete di stazioni GPS con precisione millimetrica. Evidenze scientifiche dimostrano che la crosta terrestre si muove e si deforma. Una volta stabilito questo fatto ci si chiede come sia possibile effettuare una determinazione accurata del campo di velocità di una determinata regione della crosta terrestre, allo scopo di risalire al campo di deformazione. Dal momento che negli ultimi 15 anni vi è stato un impetuoso sviluppo delle reti geodetiche basate sulla tecnologia GPS è naturale pensare a come potere utilizzare le informazione relative alla posizione di un insieme di punti (le stazioni GPS) disposti su una particolare regione della crosta terrestre.

8.2 Combinazione delle eq. normali della rete EU-REF

8.2.1 Definizione del sistema di riferimento

Per determinare il campo di velocità della placca europea dobbiamo fare uso dei dati prodotti dalla rete che densifica il riferimento terrestre nella regione europea. I dati che ci interessano sono le coordinate settimanali delle stazioni componenti la rete e le relative matrici di varianza-covarianza. Per ogni settimana GPS, a partire dalla 860, tali dati sono disponibili in formato SINEX; questo particolare formato contiene le matrici di covarianza Σ_c e Σ_{vinc} che in base alla relazione (5.70) permettono di rimuovere i vincoli da ogni soluzione settimanale. I siti le cui informazioni sono disponibili sono circa 230 . Alcuni tra essi sono stati dismessi, altri sono stati attivati solo recentemente: vi è quindi una grande variabilità nella quantità e nella qualità delle informazioni a disposizione. Dobbiamo inoltre considerare che la strategia di

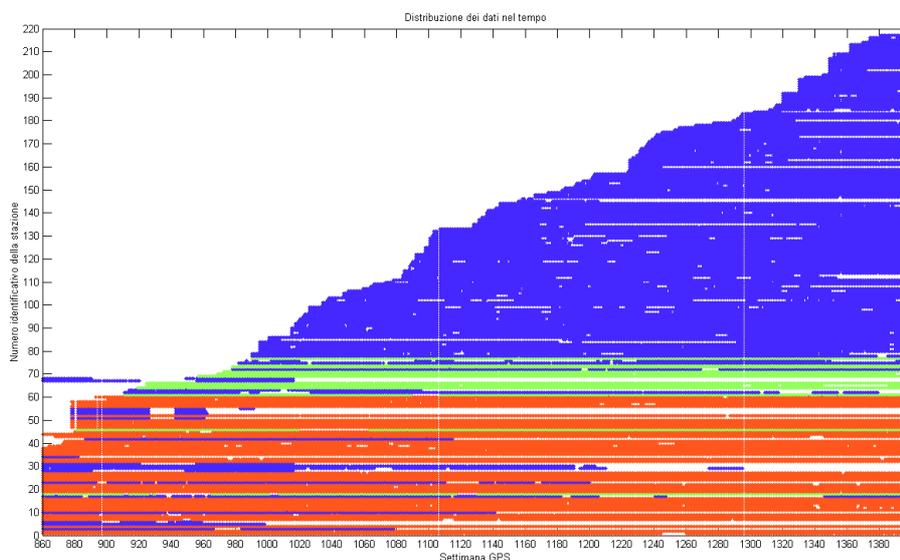


Figura 8.1: Distribuzione dei dati in funzione del tempo; il colore rosso indica i siti con una densità dei dati $> 90\%$, il verde indica i siti con densità $> 75\%$, il blu quelli con densità inferiore al 75% .

elaborazione, a livello di LAC, è variata nel corso degli anni, come sono variate le realizzazioni del sistema di riferimento ITRS. Per definire opportunamente il sistema di riferimento tramite una accurata scelta delle stazioni fiduciarie. Per tale scelta si sono seguiti i seguenti criteri:

1. Densità dei dati maggiore o uguale al 90% .
2. Assenza di discontinuità.
3. Assenza di drift evidenti nelle serie storiche.
4. Assenza anomalie visivamente evidenti nelle serie storiche.
5. Posizione geografica dei siti.

Distribuzione temporale dei dati

La figura (8.1) mostra la distribuzione settimanale dei dati per ogni sito. Tale figura corrisponde ad una combinazione delle equazioni normali effettuata con dati grezzi. Come si vede, nonostante l'elevato numero di siti le cui informazioni sono presenti nei files SINEX, solo un numero ristretto possiede una densità dei dati sufficientemente alta da poter soddisfare il primo requisito che ci siamo posti. Tali siti sono riportati nella figura (8.2) e sono in tutto 42. Il numero potrebbe sembrare elevato, tuttavia la

grande maggioranza dei siti di figura (8.2) ha subito cambiamenti della strumentazione nel corso degli anni. Tra i cambiamenti che più influiscono negativamente sulla stima delle velocità vi è quello relativo al cambiamento dell'antenna, che si manifesta come una discontinuità netta nella serie temporale del sito che ha subito tale modifica della strumentazione. Seguendo scrupolosamente i criteri di selezione delle stazioni

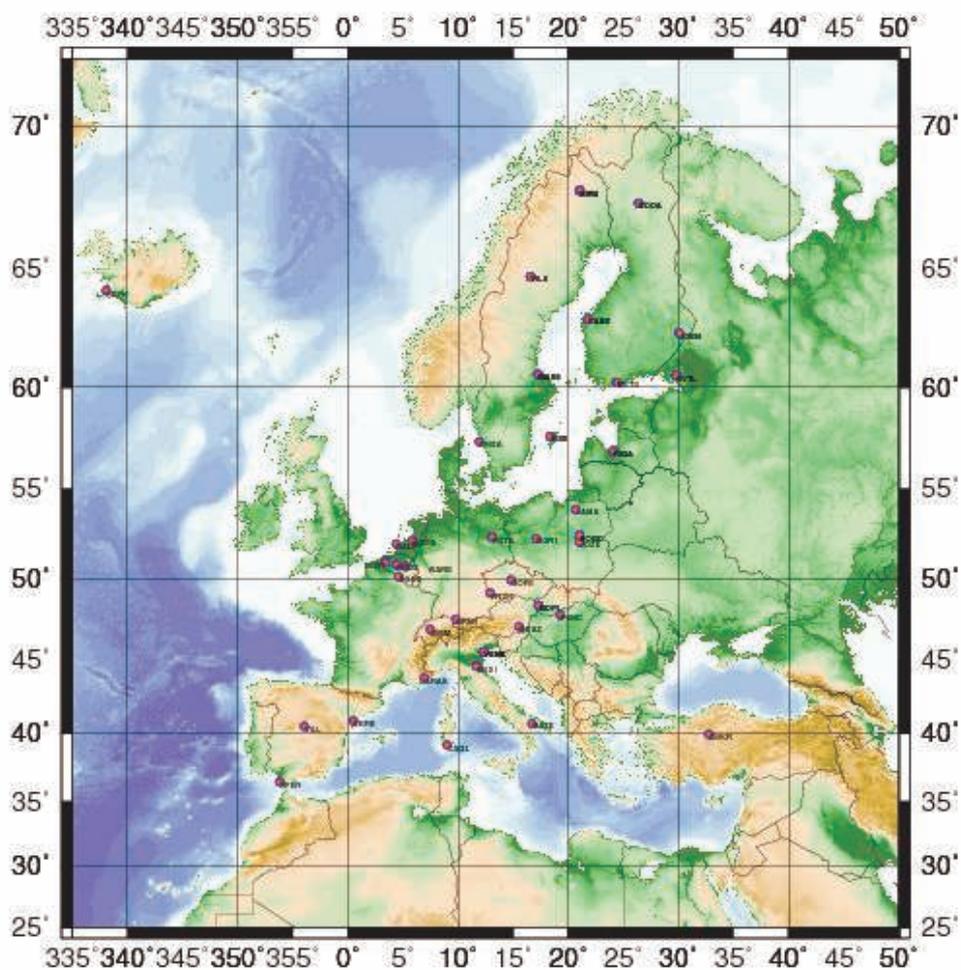


Figura 8.2: Posizione geografica delle stazioni con densità di dati superiore al 90%.

presentati in precedenza si arriva a restringere il numero delle stazioni fiduciarie a 3.

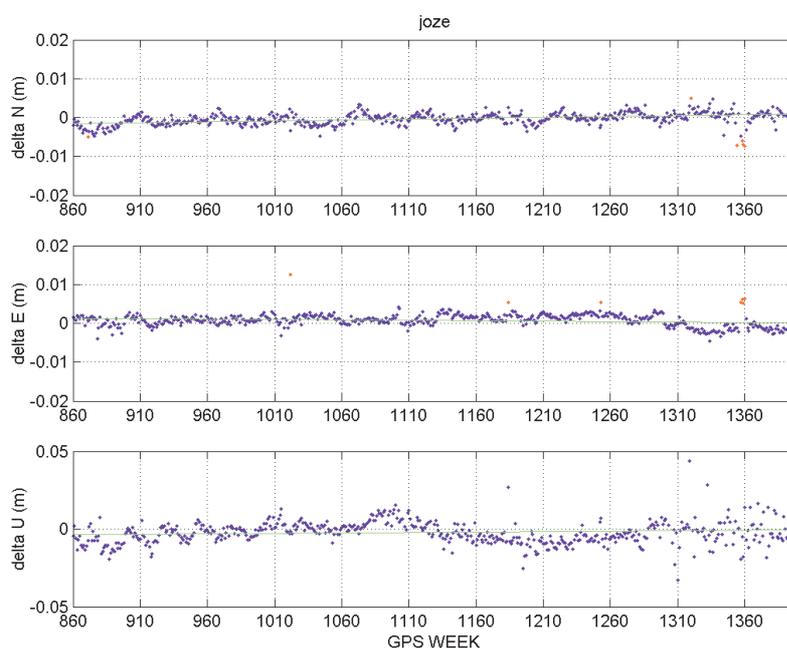


Figura 8.3: Serie storica del sito VILL.

Nella tabella seguente riportiamo tali siti, unitamente alle coordinate geodetiche.

Stazione	Longitudine	Latitudine
JOZE	21.03	52.09
POTS	13.06	52.37
VILL	-3.95	40.44

Le serie storiche di tali stazioni sono riportate nelle figure (8.3), (8.4), (8.5). Come si vede il numero delle stazioni che soddisfano tutti i punti elencati nella sezione precedente è insufficiente a definire il sistema di riferimento. Vedremo nella sezione successiva che esiste comunque un metodo per aumentare il numero delle stazioni, Forniamo intanto alcuni esempi di serie temporali che presentano un andamento anomalo, allo scopo di chiarire i criteri di selezione elencati nella sezione precedente; La stazione GRAZ (in figura 8.6) presenta 3 discontinuità. La stazione HOFN (fig. 8.7), anche se non fa parte delle stazioni la cui densità di dati è superiore al 90%, presenta nella componente verticale una discontinuità tipicamente dovuta al cambiamento di un'antenna. Infine mostriamo la serie storica della stazione VENE (fig. 8.8): in questo caso la densità di dati è superiore al 90% ma la stazione mostra un comportamento anomalo, non imputabile a cambi di antenna.

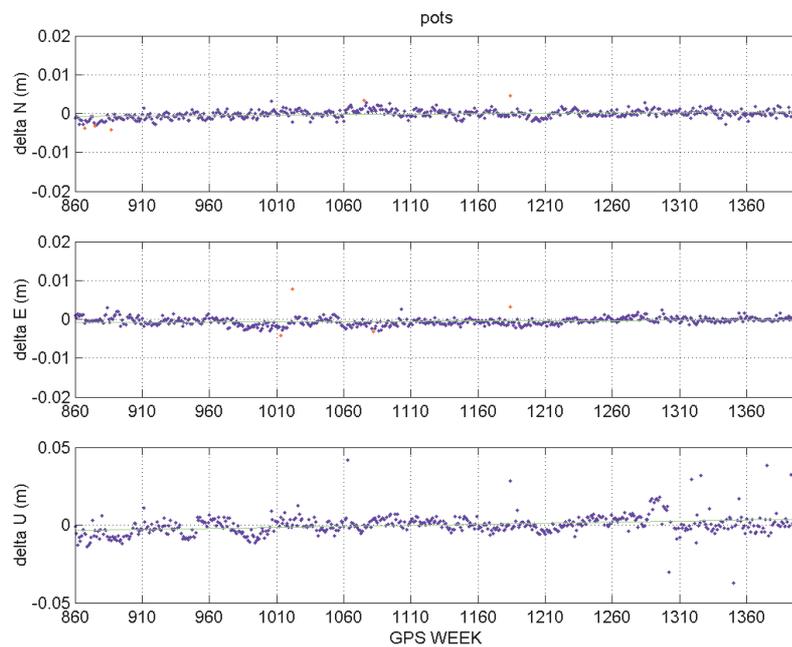


Figura 8.4: Serie storica del sito POTS

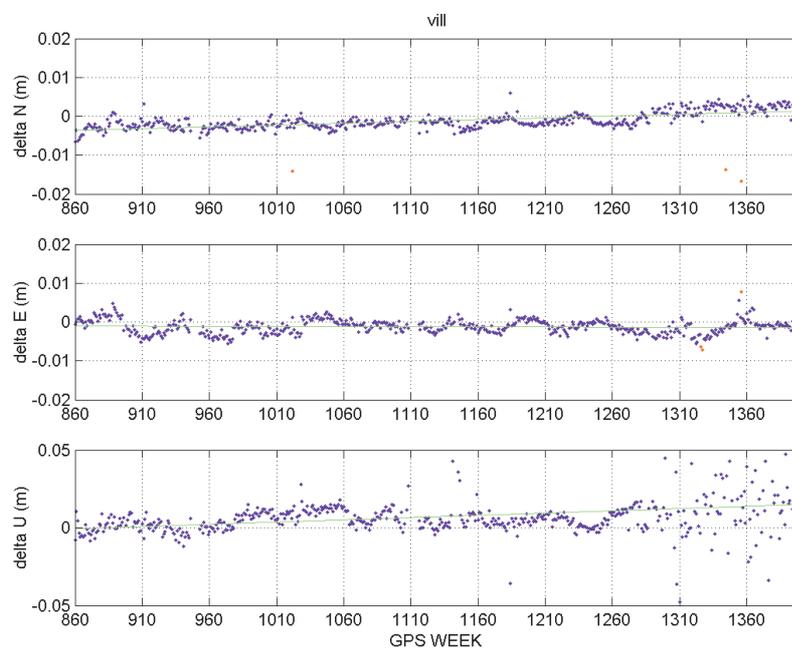


Figura 8.5: Serie storica del sito VILL

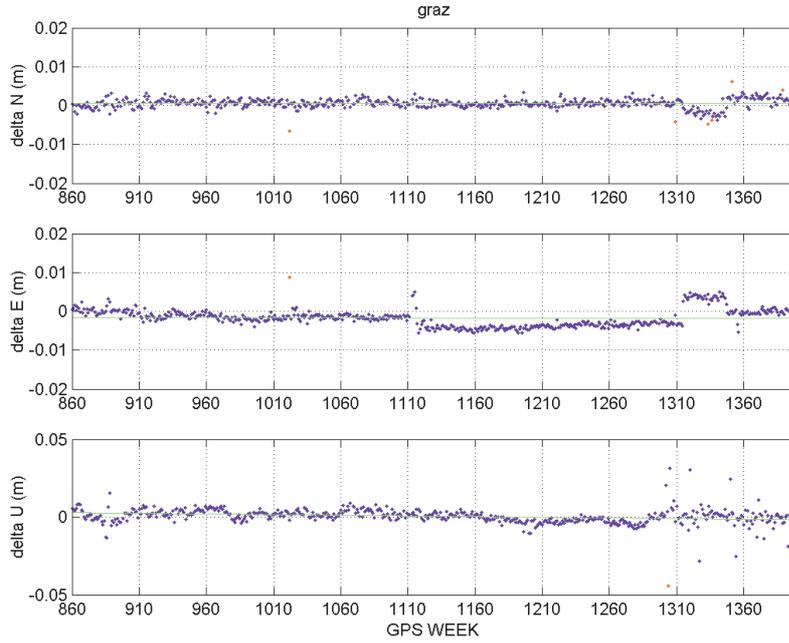


Figura 8.6: Sito GRAZ. La serie storica presenta 3 discontinuità in prossimità delle settimane GPS 1112, 1315 e 1348.

8.2.2 Correzione delle discontinuità

Le discontinuità nelle serie temporali sono, nella maggior parte dei casi, dovute a cambiamenti dell'antenna. Tali cambiamenti sono origine di biases nelle coordinate orizzontali e verticali, che si riflettono negativamente sulla stima delle velocità. Infatti molto spesso tali discontinuità sono associate a cambiamenti delle pendenze delle serie temporali. Il software da noi utilizzato non permette la stima di tali biases, tuttavia è possibile ugualmente la correzione da apportare nel modo seguente: supponiamo che una serie storica copra l'intervallo temporale $[t_a, t_b]$ e che presenti un discontinuità all'istante t_{disc} con $t_a < t_{disc} < t_b$. Approssimiamo la serie storica negli intervalli $[t_a, t_{disc}]$ e $[t_{disc}, t_b]$ con due rette di equazioni

$$\begin{aligned} x_a(t) &= a_{a,disc} + v_{a,disc}t \\ x_b(t) &= b_{disc,b} + v_{disc,b}t \end{aligned} \quad (8.1)$$

allora possiamo definire la discontinuità all'epoca t_{disc} come:

$$\Delta_{ab} = x_b(t_{disc}) - x_a(t_{disc}) = b_{disc,b} - a_{a,disc} + (v_{disc,b} - v_{a,disc})t_{disc} \quad (8.2)$$

Il software che si occupa della combinazione delle equazioni normali richiede 3 tipi di files in input:

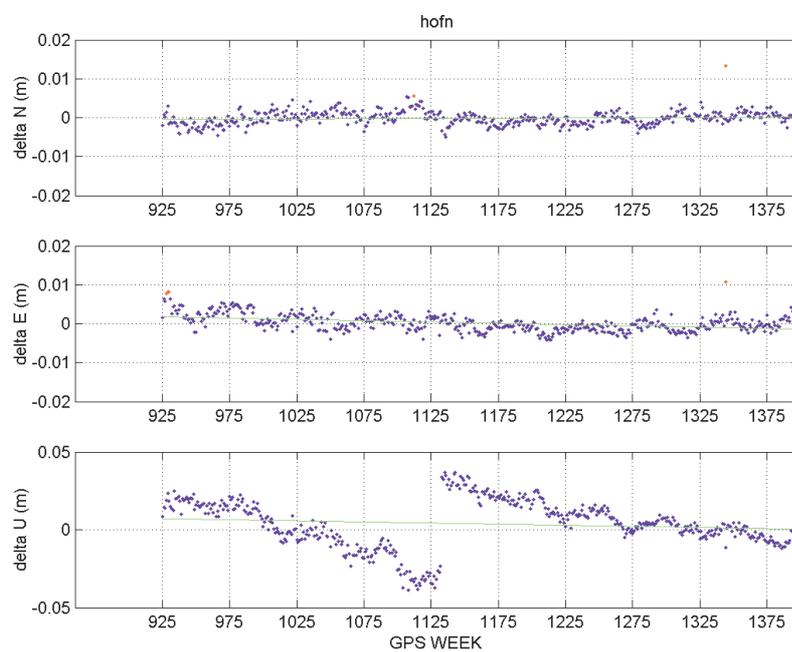


Figura 8.7: Stazione HOFN. Si può desumere il cambiamento dell'antenna dalla discontinuità evidente alla settimana GPS 1133. A questa discontinuità è anche dovuta la pendenza assunta dalle due parti di serie storica divisi dalla discontinuità.

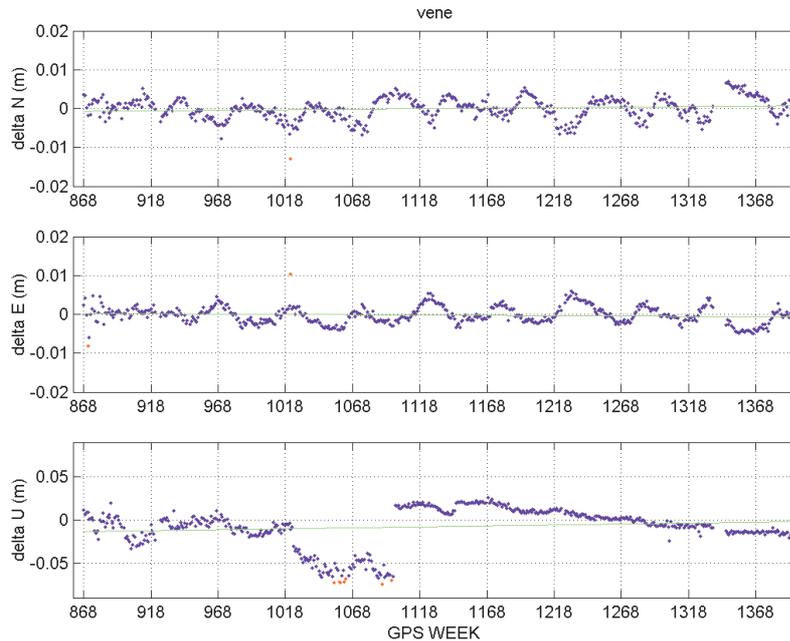


Figura 8.8: Serie storica della stazione VENE. Si osservi l'andamento anomalo della componente verticale.

1. Un file contenente le coordinate a priori di tutti i siti (di estensione .CRD).
2. Un file contenente le velocità a priori di tutti i siti (di estensione .VEL).
3. Un file contenente le informazioni sulle stazioni (di estensione .STA).

Editando opportunamente il file .STA è possibile introdurre le correzioni alle discontinuità determinate per mezzo dell'equazione (8.2). Inoltre è possibile *rinominare* un sito, cioè suddividere l'insieme di dati di un sito in diversi sottoinsiemi, ed utilizzare ciascun sottoinsieme per ottenere una stima indipendente dei parametri di interesse (nel nostro caso coordinate e velocità). Inoltre, sempre editando opportunamente il file .STA è possibile vincolare i parametri relativi alle diverse realizzazioni di una stessa stazione (secondo i vincoli descritti dall'equazione 5.81). Operativamente si sono osservate le seguenti regole:

1. Nel caso si riscontrino n discontinuità, il sito viene suddiviso in $n + 1$ realizzazioni.
2. Viene individuato un sistema di riferimento provvisorio tale che le serie storiche di tutte le stazioni fiduciarie (provvisorie) siano continue nell'intervallo compreso tra la fine della serie storica in questione e la penultima discontinuità.

3. Le coordinate e le velocità dell'ultima realizzazione vengono vincolate a quelle della penultima. Le coordinate e le velocità delle restanti realizzazioni non vengono vincolate.
4. Viene effettuata la combinazione delle equazioni normali.
5. Ogni sistema settimanale viene risolto con gli stessi vincoli usati per la soluzione combinata, le coordinate settimanali vengono trasformate nel sistema di riferimento della soluzione combinata attraverso una trasformazione di Helmert a 7 parametri e viene formata la serie temporale dei residui.
6. Dalla serie temporale di ciascuna componente vengono eliminati i residui $> 3\sigma$.
7. Vengono determinate le rette $x_a(t)$ e $x_b(t)$ e la discontinuità Δ_{ab} .
8. La discontinuità Δ_{ab} viene inserita corretta nel file .STA e viene eliminata la rinominazione per l'ultima e la penultima realizzazione.
9. Si ripete dal punto 1) finché tutte le discontinuità non sono state corrette.

Consideriamo la serie storica del sito HOFN, senza correzione della discontinuità le ripetibilità delle componenti nord, est e verticale sono

Stazione	N (mm)	E (mm)	U (mm)
HOFN	1.83	2.26	15.76

I valori delle discontinuità, calcolati con il metodo descritto in precedenza, sono i seguenti

Stazione	ΔN (mm)	ΔE (mm)	ΔU (mm)
HOFN	-2.4	-0.3	64.8

Una volta introdotte le correzioni, i valori delle ripetibilità delle componenti nord, est e verticale diminuiscono

Stazione	N (mm)	E (mm)	U (mm)
HOFN	1.73	2.06	7.42

La serie temporale corretta per la discontinuità è riportata in fig. 8.10; Per provare la correttezza del metodo utilizzato mostriamo il caso della serie storica di un sito affetto da discontinuità multiple. Prima di essere corretta la stazione GRAZ presentava le seguenti ripetibilità

Stazione	N (mm)	E (mm)	U (mm)
GRAZ	1.37	2.81	10.66

Dopo la correzione la serie storica non presenta più discontinuità (fig. 8.11) e i valori delle ripetibilità diminuiscono, come riportato nella tabella seguente

Stazione	N (mm)	E (mm)	U (mm)
GRAZ	1.12	1.41	8.81

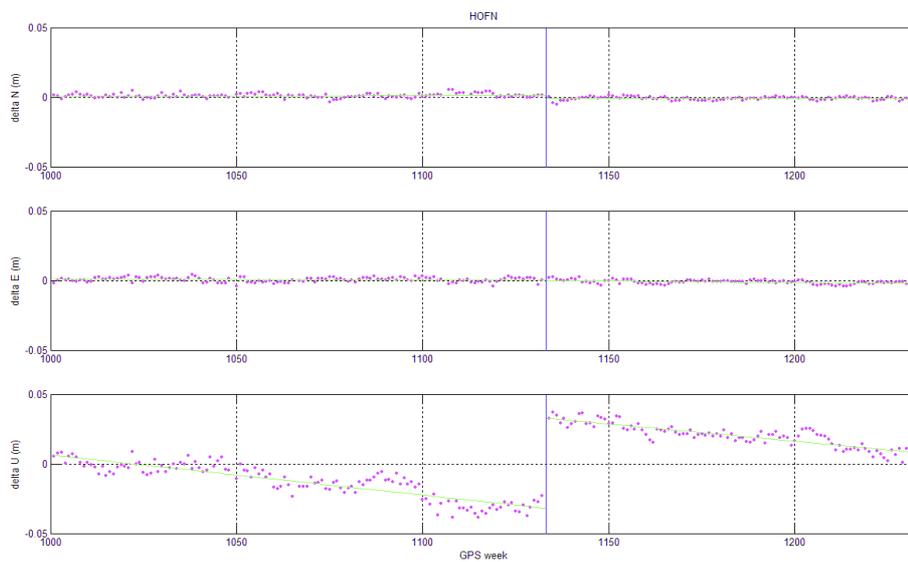


Figura 8.9: Correzione della discontinuità nella componente verticale della serie storica della stazione HOFN.

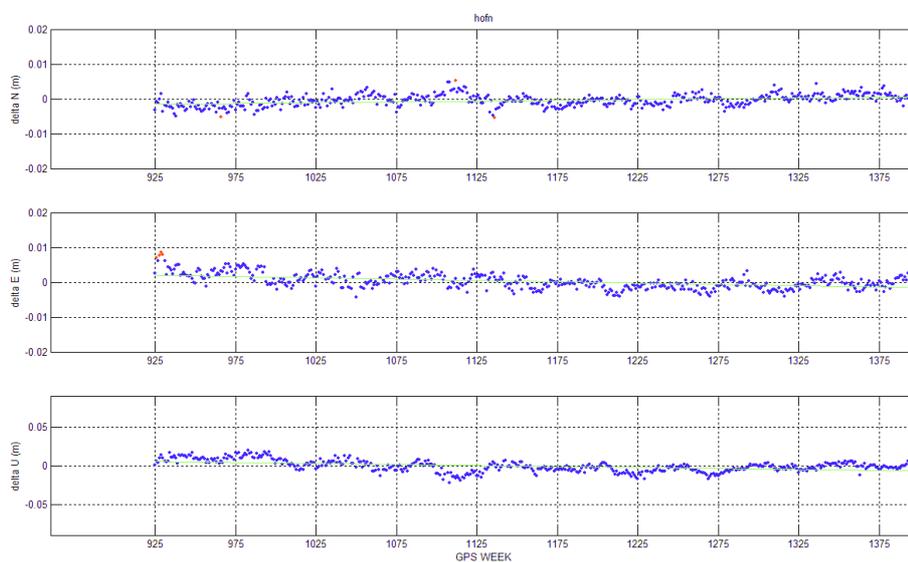


Figura 8.10: Serie temporale della stazione HOFN corretta per la discontinuità. Notare che la pendenza della componente verticale si è ridotta.

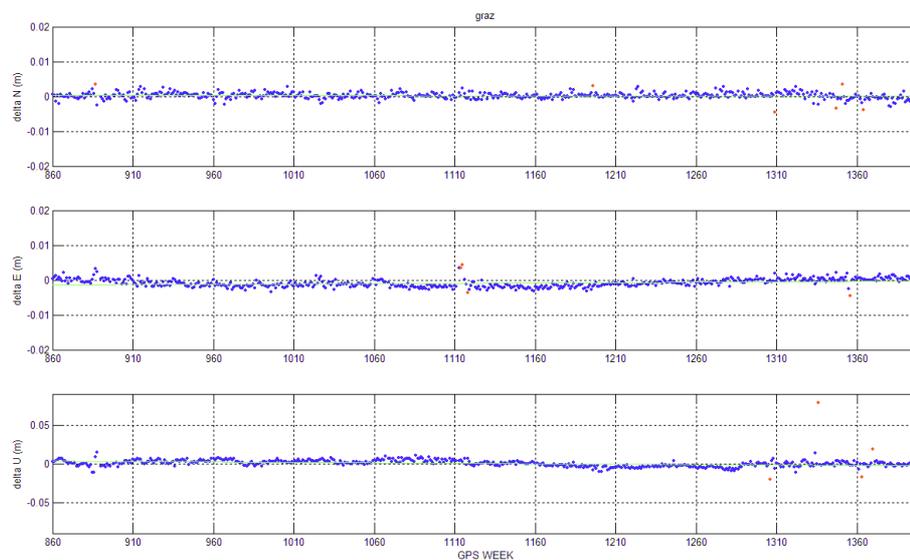


Figura 8.11: Serie temporale della stazione GRAZ, corretta per discontinuità.

Scelta delle stazioni fiduciarie

Una volta corrette le discontinuità, il numero delle stazioni candidabili come siti fiduciarie è aumentato nella misura sufficiente alla realizzazione di un sistema di riferimento comune a tutte le soluzioni settimanali. Le stazioni che abbiamo scelto sono riportate nella seguente tabella (la posizione è riportata nella figura 8.12)

Stazione	Longitudine	Latitudine
BOR1	17.07	52.27
GRAZ	15.49	47.06
JOZE	21.03	52.09
KOSG	5.80	52.17
MATE	16.70	40.64
METS	24.39	60.21
ONSA	11.92	57.39
POTS	13.06	52.37
VILL	-3.95	40.44
ZIMM	7.46	46.87

Le ripetibilità, prima e dopo aver effettuato le correzioni, sono riportate nella tabella seguente

Stazione	Non corretta			Corretta		
	N (mm)	E (mm)	U (mm)	N (mm)	E (mm)	U (mm)
BOR1	0.93	1.45	19.48	1.04	1.45	8.81
GRAZ	1.37	2.81	10.66	1.12	1.41	7.25
KOSG	2.89	1.34	13.64	1.56	1.30	5.35
MATE	2.33	2.12	12.81	1.47	2.30	5.40
ONSA	1.18	1.13	6.36	1.14	1.19	4.94
ZIMM	1.13	1.42	19.22	1.25	1.47	8.24

Riportiamo inoltre anche le epoche in cui si verificano le discontinuità

Stazione	Anno	Giorno dell'anno
BOR1	1999	151
GRAZ	2001	152
GRAZ	2005	079
GRAZ	2005	303
KOSG	2003	110
MATE	199	165
ONSA	1999	033
ZIMM	1998	310

Stazione	Longitudine	Latitudine
BOR1	17.07	52.27
GRAZ	15.49	47.06
JOZE	21.03	52.09
KOSG	5.80	52.17
MATE	16.70	40.64
METS	24.39	60.21
ONSA	11.92	57.39
POTS	13.06	52.37
VILL	-3.95	40.44
ZIMM	7.46	46.87

8.2.3 Tabella delle discontinuità.

Una volta definito il sistema di riferimento, abbiamo proseguito nella correzione delle discontinuità. Abbiamo verificato che 43 erano affetti da discontinuità evidenti. Nella seguente tabella riportiamo le diverse realizzazioni dei siti, l'intervallo temporale relativo a ciascuna realizzazione, e le correzioni per le componenti nord, est e verticale, come richieste dal software ADDNEQ2.

Realizzazione	inizio	fine	N (m)	E (m)	U (m)
ALAC 13433M001A	1996 06 30 00 00 00	2006 05 27 23 59 59	0.0004	0.0044	3.0333
ALAC 13433M001A	2006 05 28 00 00 00		0.0000	0.0000	3.0350
ANKR 20805M002A	1996 06 30 00 00 00	1999 08 16 23 59 59	-0.0050	0.0241	0.0319
ANKR 20805M002B	1999 08 17 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0540
BOGO 12207M002A	1996 06 30 00 00 00	2001 08 17 23 59 59	-0.0025	-0.0011	0.0048
BOGO 12207M002B	2001 08 18 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000
BOR1 12205M002A	1996 06 30 00 00 00	1999 06 12 23 59 59	-0.0007	-0.0046	0.0624
BOR1 12205M002B	1999 06 13 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0624
CREU 13432M001A	1996 06 30 00 00 00	2001 04 07 23 59 59	0.0165	0.0135	0.0724
CREU 13432M001B	2001 04 08 00 00 00	2003 08 02 23 59 59	0.0180	0.0043	0.0731
CREU 13432M001C	2003 08 03 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0540
GRAS 10002M006A	1996 06 30 00 00 00	2004 10 20 23 59 59	-0.0045	-0.0020	0.0350
GRAS 10002M006B	2004 10 21 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0350
BZRG 12751M001A	1996 06 30 00 00 00	2000 12 02 23 59 59	0.0000	0.0000	0.2355
BZRG 12751M001B	2000 12 03 00 00 00		0.0000	0.0000	0.2120
BRUS 13101M004A	1996 06 30 00 00 00	2000 04 22 23 59 59	0.0000	0.0000	3.9702
BRUS 13101M004B	2000 04 23 00 00 00		0.0000	0.0000	3.9702
CAGL 12725M003A	1996 06 30 00 00 00	2001 07 14 23 59 59	-0.0010	-0.0030	0.0485
CAGL 12725M003B	2001 07 15 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0450
CEUT 13449M001A	1996 06 30 00 00 00	2005 01 15 23 59 59	-0.0089	0.0010	0.0071
CEUT 13449M001B	2005 01 16 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000
DEL F 13502M004A	1996 06 30 00 00 00	2000 07 22 23 59 59	-0.0013	0.0004	-0.0131
DEL F 13502M004B	2000 07 23 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000
DOUR 13113M001A	1996 06 30 00 00 00	2001 10 06 23 59 59	-0.0026	-0.0092	0.7489
DOUR 13113M001B	2001 10 07 00 00 00		0.0000	0.0000	0.7530
DRES 14108M001A	1996 06 30 00 00 00	2003 01 18 23 59 59	-0.0055	0.0029	0.5661
DRES 14108M001B	2003 01 19 00 00 00		0.0000	0.0000	0.5943
EUSK 14258M003A	1996 06 30 00 00 00	2001 05 05 23 59 59	0.0014	0.0023	0.0130
EUSK 14258M003B	2001 05 06 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0510

Stazione	inizio	fine	N (m)	E (m)	U (m)
GRAZ 11001M002A	1996 06 30 00 00 00	2001 05 31 23 59 59	-0.0018	0.0000	1.9656
GRAZ 11001M002B	2001 06 01 00 00 00	2005 03 19 23 59 59	-0.0023	-0.0027	1.9681
GRAZ 11001M002C	2005 03 20 00 00 00	2005 10 29 23 59 59	-0.0053	0.0038	1.9681
GRAZ 11001M002D	2005 10 30 00 00 00		0.0000	0.0000	1.9640
HOBU 14202M003A	1996 06 30 00 00 00	2002 06 22 23 59 59	0.0011	-0.0030	0.0526
HOBU 14202M003B	2002 06 23 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0510
HOFN 10204M002A	1996 06 30 00 00 00	2001 09 20 23 59 59	0.0000	0.0000	0.0005
HOFN 10204M002B	2001 09 21 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0510
KARL 14216M001A	1996 06 30 00 00 00	2001 05 05 23 59 59	0.0000	0.0000	0.0293
KARL 14216M001B	2001 05 06 00 00 00	2002 07 06 23 59 59	0.0000	-0.0042	0.0650
KARL 14216M001C	2002 07 07 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0650
KELY 43005M001A	1996 06 30 00 00 00	2001 09 15 23 59 59	-0.0039	0.0091	0.0379
KELY 43005M001B	2001 09 16 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0762
KLOP 14214M002A	1996 06 30 00 00 00	2001 05 05 23 59 59	-0.0033	0.0000	0.0314
KLOP 14214M002B	2001 05 06 00 00 00	2002 06 29 23 59 59	-0.0051	-0.0016	0.0600
KLOP 14214M002C	2002 06 30 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0610
KOSG 13504M003A	1996 06 30 00 00 00	2003 04 19 23 59 59	0.0084	0.0019	0.1033
KOSG 13504M003B	2003 04 20 00 00 00		0.0000	0.0000	0.1050
LAMA 12209M001A	1996 06 30 00 00 00	2000 10 05 23 59 59	0.0023	0.0042	0.0720
LAMA 12209M001B	2000 10 06 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0610
MALL 13444M001A	1996 06 30 00 00 00	2003 08 09 23 59 59	0.0128	0.0040	-0.0033
MALL 13444M001B	2003 08 10 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000
MATE 12734M008A	1996 06 30 00 00 00	1999 06 14 23 59 59	0.0037	-0.0040	0.1035
MATE 12734M008B	1999 06 15 00 00 00		0.0000	0.0000	0.1010
NICO 14302M001A	1996 06 30 00 00 00	1999 08 20 23 59 59	-0.0018	0.0013	0.0522
NICO 14302M001B	1999 08 21 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0500
NYIR 11208M001A	1996 06 30 00 00 00	2005 02 12 23 59 59	0.0145	-0.0088	-0.0018
NYIR 11208M001B	2005 02 13 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000

Realizzazione	inizio	fine	N (m)	E (m)	U (m)
NPLD 13234M003A	1996 06 30 00 00 00	2004 08 21 23 59 59	0.0095	0.0049	0.0751
NPLD 13234M003B	2004 08 22 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0796
ONSA 10402M004A	1996 06 30 00 00 00	1999 02 02 23 59 59	0.0000	0.0000	1.0073
ONSA 10402M004B	1999 02 03 00 00 00		0.0000	0.0000	0.9950
OROS 11207M001A	1996 06 30 00 00 00	2004 08 14 23 59 59	-0.0033	0.0026	0.0011
OROS 11207M001B	2004 08 15 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000
PENC 11206M006A	1996 06 30 00 00 00	2003 05 21 23 59 59	-0.0026	-0.0023	0.0399
PENC 11206M006B	2003 05 22 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0300
PFAN 11005S002AA	1996 06 30 00 00 00	1999 10 30 23 59 59	-0.0077	0.0038	0.0479
PFAN 11005S002B	1999 10 31 00 00 00	2001 03 11 23 59 59	-0.0031	0.0087	0.0035
PFAN 11005S002C	2001 03 11 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000
PTBB 14234M001A	1996 06 30 00 00 00	2002 03 23 23 59 59	0.0011	0.0028	0.0771
PTBB 14234M001B	2002 03 23 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0562
RAMO 20703S001A	1996 06 30 00 00 00	2000 07 16 23 59 59	0.0114	0.0050	-0.0180
RAMO 20703S001B	2000 07 17 00 00 00	2004 03 16 23 59 59	-0.0037	-0.0193	-0.0049
RAMO 20703S001C	2004 03 17 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0030
REYK 10202M001A	1996 06 30 00 00 00	2000 07 15 23 59 59	-0.0049	0.0060	0.0695
REYK 10202M001B	2000 07 16 00 00 00	2003 06 12 23 59 59	0.0012	0.0007	0.0805
REYK 10202M001C	2003 06 13 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0555
RIGA 12302M002A	1996 06 30 00 00 00	2004 12 25 23 59 59	-0.0013	-0.0053	0.0867
RIGA 12302M002B	2004 12 26 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0850
SFER 13402M004A	1996 06 30 00 00 00	2002 03 05 23 59 59	-0.0016	0.0024	1.6241
SFER 13402M004B	2002 03 06 00 00 00	2003 06 07 23 59 59	-0.0085	0.0059	1.6232
SFER 13402M004C	2003 06 08 00 00 00		0.0000	0.0000	1.6260
SVTL 12350M001A	1996 06 30 00 00 00	2004 11 27 23 59 59	-0.0123	-0.0033	0.0158
SVTL 12350M001B	2004 11 28 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0285
SULD 10113M001A	1996 06 30 00 00 00	2005 06 11 23 59 59	0.0006	-0.0038	-0.0029
SULD 10113M001B	2005 06 12 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000
TRO1 10302M006A	1996 06 30 00 00 00	2004 07 17 23 59 59	0.0048	0.0086	-0.0048
TRO1 10302M006B	2004 07 18 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000
UNPG 12752M001A	1996 06 30 00 00 00	2002 05 18 23 59 59	-0.0034	0.0028	0.0726
UNPG 12752M001B	2002 05 19 00 00 00	2006 04 22 23 59 59	-0.0106	0.0046	0.0761
UNPG 12752M001C	2006 04 23 00 00 00		0.0000	0.0000	0.1000
WARE 13114M001A	1996 06 30 00 00 00	1998 01 10 23 59 59	-0.0042	0.0113	0.5068
WARE 13114M001B	1998 01 11 00 00 00	2003 01 18 23 59 59	-0.0069	0.0090	0.5050
WARE 13114M001C	2003 01 19 00 00 00		0.0000	0.0000	0.5050
ZIMM 14001M004A	1996 06 30 00 00 00	1998 10 31 23 59 30	0.0000	-0.0045	0.0144
ZIMM 14001M004B	1998 11 01 00 00 00		0.0000	0.0000	0.0000

Rimozione degli outliers

Nelle serie temporali si possono notare singoli punti che scartano più di 3σ dalla media, o addirittura interi intervalli di dati che mostrano un andamento anomalo. L'effetto di tali dati degrada la stima delle velocità, in particolare i punti isolati che si trovano all'estremità di una serie storica. Per eliminare tali dati si utilizza il metodo della pre eliminazione dei parametri. L'esame manuale delle serie storiche ha permesso di determinare 190 tra intervalli e punti isolati da pre eliminare. Nelle seguenti tabelle riportiamo gli intervalli di dati che sono stati eliminati e la stazione a cui si riferiscono.

Stazione	inizio	fine
ACOR 13434M001	1999 09 29 00 00 00	2000 01 05 23 59 59
ACOR 13434M001	2002 07 31 00 00 00	2004 01 28 23 59 59
AJAC 10077M005	2001 08 01 00 00 00	2001 08 29 23 59 59
AJAC 10077M005	2005 02 13 00 00 00	2005 02 19 23 59 59
ALAC 13433M001	2004 10 13 00 00 00	2004 10 13 23 59 59
ALME 13437M001	2001 02 21 00 00 00	2001 02 28 23 59 59
ALME 13437M001	2001 05 30 00 00 00	2001 07 04 23 59 59
ALME 13437M001	2001 10 17 00 00 00	2001 10 17 23 59 59
ALME 13437M001	2005 02 13 00 00 00	2005 02 19 23 59 59
ANKR 20805M002	1996 08 07 00 00 00	1996 08 07 23 59 59
ANKR 20805M002	1998 11 25 00 00 00	1998 11 25 23 59 59
ANKR 20805M002	1999 08 18 00 00 00	1999 12 15 23 59 59
ANKR 20805M002	2000 03 22 00 00 00	2000 03 22 23 59 59
ANKR 20805M002	2004 04 14 00 00 00	2004 07 28 23 59 59
BOGO 12207M002	1996 07 03 00 00 00	1997 03 26 23 59 59
BOGO 12207M002	2001 07 18 00 00 00	2001 08 01 23 59 59
BOGO 12207M002	2001 07 25 11 59 59	2001 07 25 11 59 59
BOGO 12207M002	2001 08 01 11 59 59	2001 08 01 11 59 59
BOR1 12205M002	1998 02 04 00 00 00	1998 02 11 23 59 59
BOR1 12205M002	1999 08 08 00 00 00	1999 08 14 23 59 59
BOR1 12205M002	2005 01 26 00 00 00	2005 01 26 23 59 59
BOR1 12205M002	2006 05 21 00 00 00	2006 05 27 23 59 59
BORK 14268M001	2003 04 12 00 00 00	2003 06 25 23 59 59
BRUS 13101M004	2000 04 26 00 00 00	2000 04 26 23 59 59
BUCU 11401M001	1999 03 24 00 00 00	1999 08 04 23 59 59
BZRG 12751M001	2001 07 18 00 00 00	2002 07 03 23 59 59
CASC 13909S001	1998 11 11 00 00 00	1999 10 20 23 59 59
CEUT 13449M001	2001 12 19 00 00 00	2002 05 08 23 59 59
CEUT 13449M001	2005 01 19 00 00 00	2005 03 02 23 59 59
CREU 13432M001	1999 02 10 00 00 00	1999 06 30 23 59 59
CREU 13432M001	2002 12 18 00 00 00	2003 07 30 23 59 59

Stazione	inizio	fine
DENT 13112M001	1996 07 03 00 00 00	1997 05 28 23 59 59
DOUR 13113M001	1996 07 03 00 00 00	1996 12 21 23 59 59
DOUR 13113M001	2001 04 29 00 00 00	2001 10 06 23 59 59
DRAG 20710S001	2001 10 24 00 00 00	2001 10 24 23 59 59
DRAG 20710S001	2002 04 03 00 00 00	2002 05 01 23 59 59
DRAG 20710S001	2002 09 25 00 00 00	2002 09 25 23 59 59
DRAG 20710S001	2002 11 27 00 00 00	2002 11 27 23 59 59
DRAG 20710S001	2003 01 01 00 00 00	2003 01 01 23 59 59
DRAG 20710S001	2003 03 19 00 00 00	2003 03 19 23 59 59
DRAG 20710S001	2003 05 07 00 00 00	2003 05 14 23 59 59
DRES 14108M001	2003 01 22 00 00 00	2003 01 22 23 59 59
EIJS 13533M001	1999 06 30 00 00 00	2000 05 03 23 59 59
ELBA 12721M002	2004 11 03 00 00 00	2004 11 03 23 59 59
ESCO 13435M001	2003 05 07 00 00 00	2003 05 07 23 59 59
GAIA 13902M001	2002 10 16 00 00 00	2002 10 16 23 59 59
GAIA 13902M001	2003 01 01 00 00 00	2003 01 01 23 59 59
GLSV 12356M001	2005 01 26 00 00 00	2005 03 09 23 59 59
GOPE 11502M002	1999 11 10 00 00 00	2001 12 26 23 59 59
GRAZ 11001M002	1996 07 03 00 00 00	1996 08 28 23 59 59
GRAZ 11001M002	1996 12 25 00 00 00	1997 01 15 23 59 59
GRAZ 11001M002	2001 05 09 00 00 00	2001 05 23 23 59 59
GRAZ 11001M002	2005 02 09 00 00 00	2005 02 09 23 59 59
GSR1 14501M001	2001 02 25 00 00 00	2001 03 03 23 59 59
GSR1 14501M001	2001 03 07 00 00 00	2001 12 26 23 59 59
GSR1 14501M001	2002 05 29 00 00 00	2002 05 29 23 59 59
HERS 13212M007	1996 07 03 00 00 00	1996 11 06 23 59 59
HERS 13212M007	1999 04 28 00 00 00	2001 06 06 23 59 59
HFLK 11006S003	2002 10 23 00 00 00	2003 02 12 23 59 59
HFLK 11006S003	2003 10 22 00 00 00	2003 12 03 23 59 59
HOBU 14202M003	2002 06 05 00 00 00	2002 06 19 23 59 59
JOEN 10512M001	1996 11 13 00 00 00	1997 09 03 23 59 59
JOEN 10512M001	2002 12 11 00 00 00	2003 01 15 23 59 59
JOZE 12204M001	2006 01 11 00 00 00	2006 02 01 23 59 59
KIRO 10422M001	1996 11 13 00 00 00	1997 04 23 23 59 59
KIRU 10403M002	1998 01 28 00 00 00	1998 02 25 23 59 59
KIRU 10403M002	1998 03 18 00 00 00	1998 03 18 23 59 59
KIRU 10403M002	1999 11 24 00 00 00	2000 01 26 23 59 59
KIRU 10403M002	2000 03 01 00 00 00	2000 03 15 23 59 59
KIRU 10403M002	2000 12 06 00 00 00	2001 01 10 23 59 59

Stazione	inizio	fine
KIRU 10403M002	2001 02 14 00 00 00	2001 03 28 23 59 59
KIRU 10403M002	2001 11 21 00 00 00	2001 12 05 23 59 59
KIRU 10403M002	2002 02 13 00 00 00	2002 03 13 23 59 59
KIRU 10403M002	2004 01 14 00 00 00	2004 02 11 23 59 59
KIRU 10403M002	2004 12 29 00 00 00	2005 02 23 23 59 59
KIRU 10403M002	2005 12 14 00 00 00	2006 01 11 23 59 59
KOSG 13504M003	1996 07 03 00 00 00	1996 10 30 23 59 59
KOSG 13504M003	2003 03 19 00 00 00	2003 04 16 23 59 59
LAGO 13903M001	2003 03 19 00 00 00	2003 03 19 23 59 59
LAMA 12209M001	2000 03 15 00 00 00	2000 10 04 23 59 59
LAMA 12209M001	2001 01 03 00 00 00	2001 01 03 23 59 59
LAMA 12209M001	2006 01 25 00 00 00	2006 02 08 23 59 59
LAMP 12706M002	2005 03 09 00 00 00	2005 03 09 23 59 59
LAMP 12706M002	1999 08 08 00 00 00	1999 08 14 23 59 59
LLIV 13436M001	2001 04 18 00 00 00	2001 04 18 23 59 59
LLIV 13436M001	2004 09 29 00 00 00	2004 09 29 23 59 59
MALL 13444M001	1999 05 05 00 00 00	1999 05 05 23 59 59
MARS 10073M008	1999 05 05 00 00 00	1999 05 05 23 59 59
MATE 12734M008	2006 02 08 11 59 52	2006 02 08 11 59 52
MATE 12734M008	2006 06 07 11 59 52	2006 06 07 11 59 52
MEDI 12711M003	1998 11 25 00 00 00	1998 12 09 23 59 59
MEDI 12711M003	2002 11 20 00 00 00	2003 01 08 23 59 59
METS 10503S011	1998 11 04 00 00 00	1998 11 18 23 59 59
MLVL 10092M001	2000 10 25 00 00 00	2000 11 15 23 59 59
MOPI 11507M001	1996 11 27 00 00 00	1998 05 13 23 59 59
MOPI 11507M001	1998 12 09 00 00 00	1998 12 09 23 59 59
MOPI 11507M001	1998 12 23 00 00 00	1998 12 23 23 59 59
MOPI 11507M001	1999 10 13 00 00 00	1999 10 20 23 59 59
MOPI 11507M001	2000 01 19 00 00 00	2000 01 26 23 59 59
MOPI 11507M001	2002 12 25 00 00 00	2002 12 25 23 59 59
MOPI 11507M001	2003 11 26 00 00 00	2003 12 03 23 59 59
MOPI 11507M001	2003 12 31 00 00 00	2003 12 31 23 59 59
MOPI 11507M001	2004 01 07 00 00 00	2004 01 07 23 59 59
MOPI 11507M001	2004 01 28 00 00 00	2004 01 28 23 59 59
MOPI 11507M001	2004 03 03 00 00 00	2004 03 03 23 59 59
MORP 13299S001	2004 10 27 00 00 00	2004 10 27 23 59 59
MORP 13299S001	2005 10 12 00 00 00	2005 11 30 23 59 59
MORP 13299S001	2006 01 04 00 00 00	2006 03 29 23 59 59
NSSP 12312M001	2001 05 23 00 00 00	2001 05 23 23 59 59
NSSP 12312M001	2002 01 16 00 00 00	2002 01 30 23 59 59
NSSP 12312M001	2003 02 12 00 00 00	2003 02 12 23 59 59

Stazione	inizio	fine
NYA1 10317M003	1998 12 30 00 00 00	1998 12 30 23 59 59
NYA1 10317M003	2004 01 14 00 00 00	2004 01 14 23 59 59
NYIR 11208M001	2003 02 12 00 00 00	2003 02 12 23 59 59
NYIR 11208M001	2005 01 19 00 00 00	2005 02 09 23 59 59
OBE2 14208M003	2001 09 12 00 00 00	2001 10 24 23 59 59
ORID 15601M001	2003 12 31 00 00 00	2003 12 31 23 59 59
ORID 15601M001	2004 03 03 00 00 00	2004 03 03 23 59 59
ORID 15601M001	2004 10 20 00 00 00	2004 10 20 23 59 59
OROS 11207M001	2001 12 19 00 00 00	2002 04 10 23 59 59
OSLS 10307M001	2001 01 03 00 00 00	2001 01 24 23 59 59
OSLS 10307M001	2002 12 18 00 00 00	2003 01 15 23 59 59
OSLS 10307M001	2004 01 07 00 00 00	2004 01 21 23 59 59
PADO 12750S001	2001 11 28 00 00 00	2002 08 07 23 59 59
PDEL 31906M004	2001 09 26 00 00 00	2001 10 10 23 59 59
PENC 11206M006	1997 01 15 00 00 00	1997 01 15 23 59 59
PFAN 11005S002	2004 01 21 00 00 00	2004 01 28 23 59 59
PFAN 11005S002	2005 12 21 00 00 00	2005 12 28 23 59 59
POTS 14106M003	1999 08 08 00 00 00	1999 08 14 23 59 59
QAQ1 43007M001	2002 09 18 00 00 00	2003 01 01 23 59 59
QAQ1 43007M001	2003 09 10 00 00 00	2003 12 03 23 59 59
QAQ1 43007M001	2005 06 01 00 00 00	2005 06 01 23 59 59
RAMO 20703S001	2001 06 20 00 00 00	2001 07 11 23 59 59
RIGA 12302M002	1997 01 08 00 00 00	1997 01 29 23 59 59
RIGA 12302M002	2003 01 01 00 00 00	2003 01 08 23 59 59
RIGA 12302M002	2003 10 08 00 00 00	2003 10 08 23 59 59
SBGZ 11031S001	1999 02 10 00 00 00	1999 10 27 23 59 59
SBGZ 11031S001	2001 11 28 00 00 00	2001 12 26 23 59 59
SBGZ 11031S001	2006 07 16 00 00 00	
SFER 13402M004	1996 07 03 00 00 00	1997 12 24 23 59 59
SFER 13402M004	2001 03 21 00 00 00	2001 03 21 23 59 59
SJDV 10090M001	1998 08 12 00 00 00	1999 03 10 23 59 59
SJDV 10090M001	2001 07 25 00 00 00	2001 08 29 23 59 59
SJDV 10090M001	2003 05 14 00 00 00	2003 05 14 23 59 59
SODA 10513M001	1997 02 26 00 00 00	1998 03 25 23 59 59
SODA 10513M001	1998 11 18 00 00 00	1998 11 18 23 59 59
SODA 10513M001	1999 01 06 00 00 00	1999 03 24 23 59 59
SODA 10513M001	2000 02 23 00 00 00	2000 03 15 23 59 59
SODA 10513M001	2000 12 27 00 00 00	2001 01 10 23 59 59
SODA 10513M001	2001 01 31 00 00 00	2001 01 31 23 59 59
SODA 10513M001	2001 11 21 00 00 00	2002 01 09 23 59 59

Stazione	inizio	fine
SODA 10513M001	2002 12 04 00 00 00	2003 03 05 23 59 59
SODA 10513M001	2004 02 04 00 00 00	2004 02 18 23 59 59
SODA 10513M001	2004 12 15 00 00 00	2005 03 23 23 59 59
SODA 10513M001	2005 12 14 00 00 00	2006 03 15 23 59 59
SOFI 11101M002	2001 12 26 00 00 00	2002 01 02 23 59 59
SOFI 11101M002	2003 10 22 00 00 00	2003 10 22 23 59 59
SRJV 11801S001	2000 04 19 00 00 00	2000 09 27 23 59 59
SRJV 11801S001	2003 01 08 00 00 00	2003 01 15 23 59 59
SVTL 12350M001	1996 11 27 00 00 00	1997 06 04 23 59 59
SVTL 12350M001	2001 01 10 00 00 00	2001 03 07 23 59 59
SVTL 12350M001	2002 11 20 00 00 00	2002 11 20 23 59 59
SVTL 12350M001	2002 12 25 00 00 00	2003 01 15 23 59 59
SVTL 12350M001	2004 01 28 00 00 00	2004 01 28 23 59 59
THU3 43001M002	2005 06 01 00 00 00	2005 06 01 23 59 59
TUBI 20806M001	1999 08 11 00 00 00	1999 08 11 23 59 59
UZHL 12301M001	2003 01 15 00 00 00	2003 01 15 23 59 59
VAAS 10511M001	1996 11 13 00 00 00	1997 04 23 23 59 59
VAAS 10511M001	1998 11 11 00 00 00	1998 11 11 23 59 59
VAAS 10511M001	1999 12 01 00 00 00	1999 12 22 23 59 59
VAAS 10511M001	2000 12 27 00 00 00	2001 01 10 23 59 59
VAAS 10511M001	2001 02 21 00 00 00	2001 03 07 23 59 59
VAAS 10511M001	2002 11 20 00 00 00	2002 12 11 23 59 59
VAAS 10511M001	2003 01 01 00 00 00	2003 01 15 23 59 59
VAAS 10511M001	2005 11 30 00 00 00	2006 01 11 23 59 59
VALE 13439M001	2005 05 01 00 00 00	2005 05 07 23 59 59
VALE 13439M001	2002 05 22 00 00 00	2002 06 05 23 59 59
VALE 13439M001	2003 05 14 00 00 00	2003 05 14 23 59 59
VALE 13439M001	2003 06 18 00 00 00	2003 06 18 23 59 59
VALE 13439M001	2004 05 19 00 00 00	2004 05 19 23 59 59
VALE 13439M001	2005 05 04 00 00 00	2005 05 04 23 59 59
VE NE 12741M001	1996 08 21 00 00 00	2001 12 12 23 59 59
VLNS 10801M001	1999 03 24 00 00 00	1999 04 28 23 59 59
VLNS 10801M001	2002 09 25 00 00 00	2002 09 25 23 59 59
VLNS 10801M001	2005 02 02 00 00 00	2005 02 09 23 59 59
WARE 13114M001	1996 07 03 00 00 00	1996 11 06 23 59 59
WSRT 13506M005	1997 08 27 00 00 00	1998 03 11 23 59 59
ZECK 12351M001	1997 11 26 00 00 00	1997 11 26 23 59 59
ZECK 12351M001	1997 12 10 00 00 00	1997 12 10 23 59 59
ZIMM 14001M004	1997 01 01 00 00 00	1997 01 01 23 59 59
ZOUF 12763M001	2004 12 15 00 00 00	2004 12 15 23 59 59

8.2.4 Il campo di velocità nel riferimento ITRF00

Una volta corrette tutte le discontinuità ed eliminati gli outliers, è possibile effettuare una stima del campo di velocità, sulla base delle formule relative all'espansione dei sistemi normati. Nelle tabelle seguenti riportiamo le velocità di ogni sito nel sistema di riferimento ITRF2000, unitamente alle incertezze formali, espresse come valori dei semiassi dell'ellisse di errore e come angolo del semiasse maggiore di tale ellisse rispetto alla direzione Nord.

Lon	Lat	V _n (mm/yr)	V _e (mm/yr)	Semiassi minore	Semiassi maggiore	Azimuth	Stazione
8.97	39.14	0.0203	0.0154	0.0000	0.0000	108.3	CAGL
-3.95	40.44	0.0179	0.0164	0.0000	0.0000	73.4	VILL
16.70	40.65	0.0224	0.0191	0.0000	0.0000	138.3	MATE
14.99	36.88	0.0192	0.0184	0.0001	0.0001	89.8	NOTO
17.07	52.28	0.0190	0.0145	0.0000	0.0000	88.9	BOR1
5.81	52.18	0.0170	0.0162	0.0000	0.0000	93.4	KOSG
4.36	50.80	0.0166	0.0152	0.0000	0.0000	93.5	BRUS
21.04	52.48	0.0202	0.0142	0.0001	0.0000	90.3	BOGO
24.40	60.22	0.0197	0.0125	0.0000	0.0000	80.2	METS
7.47	46.88	0.0188	0.0159	0.0000	0.0000	91.1	ZIMM
14.79	49.91	0.0199	0.0148	0.0000	0.0000	86.5	GOPE
15.49	47.07	0.0209	0.0154	0.0000	0.0000	91.3	GRAZ
0.34	50.87	0.0163	0.0167	0.0000	0.0000	94.9	HERS
21.03	52.10	0.0203	0.0142	0.0000	0.0000	87.9	JOZE
20.97	67.86	0.0157	0.0152	0.0000	0.0000	90.4	KIRU
11.65	44.52	0.0224	0.0172	0.0000	0.0000	91.8	MEDI
11.93	57.40	0.0167	0.0146	0.0000	0.0000	89.6	ONSA
13.07	52.38	0.0183	0.0150	0.0000	0.0000	91.1	POTS
-21.96	64.14	-0.0106	0.0204	0.0000	0.0000	83.9	REYK
12.88	49.14	0.0194	0.0153	0.0000	0.0000	97.0	WTZR
20.67	53.89	0.0192	0.0143	0.0000	0.0000	89.2	LAMA
-68.79	76.54	-0.0229	0.0054	0.0001	0.0001	135.8	THU1
19.28	47.79	0.0213	0.0143	0.0000	0.0000	88.9	PENC
-50.94	66.99	-0.0176	0.0118	0.0000	0.0000	82.9	KELY
-6.21	36.46	0.0149	0.0172	0.0000	0.0000	106.4	SFER
11.39	47.31	0.0200	0.0161	0.0000	0.0000	88.7	HFLK
11.88	45.41	0.0208	0.0176	0.0001	0.0000	86.8	UPAD
4.59	50.09	0.0162	0.0154	0.0000	0.0000	91.8	DOUR
4.39	51.99	0.0167	0.0158	0.0000	0.0000	91.1	DELF
5.25	50.69	0.0181	0.0158	0.0000	0.0000	92.4	WARE

Lon	Lat	Vn (mm/yr)	Ve (mm/yr)	Semiassse minore	Semiassse maggiore	Azimuth	Stazione
3.40	50.93	0.0166	0.0162	0.0000	0.0000	92.8	DENT
32.76	39.89	0.0012	0.0121	0.0000	0.0000	86.2	ANKR
6.92	43.75	0.0194	0.0155	0.0000	0.0000	94.8	GRAS
0.49	40.82	0.0192	0.0156	0.0000	0.0000	97.8	EBRE
21.77	62.96	0.0179	0.0132	0.0001	0.0000	92.2	VAAS
30.10	62.39	0.0200	0.0117	0.0000	0.0000	93.3	JOEN
21.06	67.88	0.0158	0.0144	0.0000	0.0000	93.3	KIR0
17.26	60.60	0.0179	0.0137	0.0000	0.0000	90.5	MAR6
16.56	64.70	0.0152	0.0148	0.0000	0.0000	91.6	VIL0
24.06	56.95	0.0196	0.0129	0.0001	0.0000	91.9	RIGA
18.37	57.65	0.0184	0.0135	0.0000	0.0000	90.2	VIS0
21.77	62.96	0.0179	0.0132	0.0001	0.0000	92.2	VAAS
30.10	62.39	0.0200	0.0117	0.0000	0.0000	93.3	JOEN
21.06	67.88	0.0158	0.0144	0.0000	0.0000	93.3	KIR0
17.26	60.60	0.0179	0.0137	0.0000	0.0000	90.5	MAR6
16.56	64.70	0.0152	0.0148	0.0000	0.0000	91.6	VIL0
24.06	56.95	0.0196	0.0129	0.0001	0.0000	91.9	RIGA
18.37	57.65	0.0184	0.0135	0.0000	0.0000	90.2	VIS0
29.78	60.53	0.0206	0.0112	0.0001	0.0001	86.2	SVTL
17.27	48.37	0.0206	0.0151	0.0001	0.0001	89.4	MOPI
17.06	51.11	0.0191	0.0145	0.0001	0.0000	89.9	WROC
26.39	67.42	0.0175	0.0131	0.0001	0.0000	94.6	SODA
17.06	51.11	0.0191	0.0145	0.0001	0.0000	89.9	WROC
21.04	52.48	0.0202	0.0142	0.0001	0.0000	90.3	BOGO
17.27	48.37	0.0206	0.0151	0.0001	0.0001	89.4	MOPI
17.06	51.11	0.0191	0.0145	0.0001	0.0000	89.9	WROC
18.37	57.65	0.0184	0.0135	0.0000	0.0000	90.2	VIS0
21.06	67.88	0.0158	0.0144	0.0000	0.0000	93.3	KIR0
16.56	64.70	0.0152	0.0148	0.0000	0.0000	91.6	VIL0
30.10	62.39	0.0200	0.0117	0.0000	0.0000	93.3	JOEN
24.06	56.95	0.0196	0.0129	0.0001	0.0000	91.9	RIGA
29.78	60.53	0.0206	0.0112	0.0001	0.0001	86.2	SVTL
21.77	62.96	0.0179	0.0132	0.0001	0.0000	92.2	VAAS
9.78	47.52	0.0202	0.0159	0.0000	0.0000	90.2	PFAN
26.39	67.42	0.0175	0.0131	0.0001	0.0000	94.6	SODA
23.39	42.56	0.0234	0.0118	0.0001	0.0000	87.7	SOFI
33.40	35.14	0.0186	0.0153	0.0001	0.0001	73.5	NICO
6.60	52.91	0.0170	0.0161	0.0001	0.0000	90.8	WSRT
41.57	43.79	0.0251	0.0114	0.0001	0.0001	83.5	ZECK
-15.20	64.27	0.0125	0.0146	0.0000	0.0000	85.4	HOFN
5.25	50.69	0.0181	0.0158	0.0000	0.0000	92.4	WARE
30.50	50.36	0.0217	0.0125	0.0001	0.0000	89.6	GLSV

Lon	Lat	V _n (mm/yr)	V _e (mm/yr)	Semiassse minore	Semiassse maggiore	Azimuth	Stazione
4.68	45.88	0.0188	0.0156	0.0001	0.0001	91.3	SJDV
6.76	50.67	0.0181	0.0163	0.0001	0.0000	90.5	EUSK
5.35	43.28	0.0196	0.0166	0.0001	0.0001	92.5	MARS
8.41	49.01	0.0190	0.0159	0.0001	0.0000	89.8	KARL
-9.42	38.69	0.0176	0.0171	0.0001	0.0001	100.7	CASC
34.76	30.60	0.0223	0.0211	0.0001	0.0001	72.0	RAMO
7.47	46.88	0.0188	0.0159	0.0000	0.0000	91.1	ZIMM
11.34	46.50	0.0194	0.0154	0.0001	0.0001	89.3	BZRG
8.92	44.42	0.0200	0.0154	0.0001	0.0001	91.5	GENO
-4.50	48.38	0.0159	0.0169	0.0001	0.0001	91.7	BRST
12.36	43.12	0.0201	0.0164	0.0001	0.0001	90.2	UNPG
1.40	41.60	0.0186	0.0162	0.0001	0.0001	87.1	BELL
7.66	45.06	0.0195	0.0158	0.0001	0.0001	90.5	TORI
3.32	42.32	0.0214	0.0177	0.0001	0.0001	92.8	CREU
13.11	47.80	0.0206	0.0153	0.0001	0.0000	89.8	SBGZ
25.30	54.65	0.0210	0.0133	0.0002	0.0001	88.9	VLNS
26.13	44.46	0.0226	0.0121	0.0001	0.0000	85.8	BUCU
12.61	35.50	0.0191	0.0186	0.0001	0.0001	90.8	LAMP
1.97	42.48	0.0189	0.0157	0.0001	0.0001	94.9	LLIV
5.22	53.36	0.0180	0.0148	0.0001	0.0001	89.7	TERS
5.68	50.76	0.0173	0.0161	0.0001	0.0001	90.1	EIJS
11.87	78.93	0.0103	0.0148	0.0001	0.0000	88.3	NYA1
18.94	69.66	0.0141	0.0146	0.0001	0.0000	92.4	TRO1
0.16	48.02	0.0181	0.0157	0.0001	0.0001	91.4	MANS
22.30	48.63	0.0211	0.0136	0.0001	0.0001	88.8	UZHL
29.45	40.79	0.0230	0.0095	0.0001	0.0000	82.3	TUBI
-15.63	27.76	0.0155	0.0179	0.0001	0.0001	128.5	MAS1
-8.40	43.36	0.0210	0.0163	0.0001	0.0001	97.2	ACOR
-0.48	38.34	0.0191	0.0168	0.0001	0.0001	96.2	ALAC
0.98	42.69	0.0187	0.0163	0.0001	0.0001	92.3	ESCO
13.73	51.03	0.0195	0.0156	0.0001	0.0000	89.8	DRES
8.73	50.22	0.0184	0.0153	0.0001	0.0000	89.3	KLOP
18.41	43.87	0.0224	0.0160	0.0001	0.0001	85.7	SRJV
7.89	54.17	0.0169	0.0160	0.0001	0.0000	89.6	HELG
29.02	41.10	0.0255	0.0095	0.0001	0.0000	82.1	ISTA
39.78	40.99	0.0248	0.0131	0.0001	0.0001	80.5	TRAB
8.76	41.93	0.0203	0.0159	0.0001	0.0001	89.3	AJAC
10.46	52.30	0.0187	0.0154	0.0001	0.0000	88.3	PTBB
10.48	53.05	0.0181	0.0153	0.0001	0.0000	89.6	HOBV
20.79	41.13	0.0236	0.0114	0.0001	0.0001	80.3	ORID
14.99	36.88	0.0204	0.0198	0.0001	0.0001	81.3	NOT1
18.11	42.65	0.0227	0.0185	0.0001	0.0001	84.7	DUBR

Lon	Lat	Vn (mm/yr)	Ve (mm/yr)	Semiassse minore	Semiassse maggiore	Azimuth	Stazione
18.68	45.56	0.0218	0.0152	0.0001	0.0001	86.4	OSJE
-3.09	40.52	0.0181	0.0163	0.0001	0.0001	98.8	YEBE
2.59	48.84	0.0173	0.0158	0.0001	0.0001	91.4	MLVL
10.32	63.37	0.0136	0.0161	0.0001	0.0000	87.3	TRDS
-0.41	46.13	0.0181	0.0164	0.0001	0.0001	94.4	CHIZ
6.75	53.56	0.0173	0.0153	0.0001	0.0000	88.4	BORK
35.39	31.59	0.0229	0.0200	0.0001	0.0001	68.4	DRAG
11.34	46.50	0.0194	0.0154	0.0001	0.0001	89.3	BZRG
5.60	59.02	0.0147	0.0157	0.0001	0.0000	86.3	STAS
10.37	59.74	0.0154	0.0151	0.0001	0.0001	90.0	OSLS
31.03	70.34	0.0173	0.0126	0.0001	0.0001	98.9	VAR5
-3.80	43.47	0.0171	0.0174	0.0001	0.0001	96.0	CANT
-2.46	36.85	0.0179	0.0157	0.0001	0.0001	103.4	ALME
2.62	39.55	0.0174	0.0163	0.0001	0.0001	92.5	MALL
-25.66	37.75	0.0119	0.0165	0.0001	0.0001	165.5	PDEL
-8.59	41.11	0.0176	0.0168	0.0001	0.0001	97.9	GAIA
-8.67	37.10	0.0167	0.0176	0.0001	0.0001	153.9	LAGO
-0.34	39.48	0.0200	0.0153	0.0001	0.0001	99.3	VALE
-0.34	51.42	0.0165	0.0163	0.0001	0.0001	88.9	NPLD
-6.85	34.00	0.0152	0.0179	0.0001	0.0001	109.7	RABT
14.54	46.05	0.0209	0.0174	0.0001	0.0001	87.3	GSR1
9.78	47.52	0.0202	0.0159	0.0000	0.0000	90.2	PFAN
1.48	43.56	0.0189	0.0158	0.0001	0.0001	91.8	TLSE
3.32	42.32	0.0214	0.0177	0.0001	0.0001	92.8	CREU
8.41	49.01	0.0190	0.0159	0.0001	0.0000	89.8	KARL
8.73	50.22	0.0184	0.0153	0.0001	0.0000	89.3	KLOP
6.76	50.67	0.0181	0.0163	0.0001	0.0000	90.5	EUSK
-6.34	39.48	0.0178	0.0169	0.0001	0.0001	97.1	CACE
14.28	48.31	0.0200	0.0154	0.0002	0.0001	87.6	LINZ
34.54	49.60	0.0223	0.0124	0.0001	0.0001	88.5	POLV
11.28	48.09	0.0198	0.0155	0.0001	0.0001	88.4	OBE2
-15.20	64.27	0.0125	0.0146	0.0000	0.0000	85.4	HOFN
16.59	49.21	0.0202	0.0147	0.0001	0.0001	86.6	TUBO
-50.94	66.99	-0.0176	0.0118	0.0000	0.0000	82.9	KELY
13.35	42.37	0.0218	0.0178	0.0001	0.0001	88.7	AQUI
10.21	42.75	0.0201	0.0161	0.0001	0.0001	86.2	ELBA
24.01	49.84	0.0215	0.0139	0.0001	0.0001	87.1	SULP
4.59	50.09	0.0162	0.0154	0.0000	0.0000	91.8	DOUR
11.90	45.41	0.0207	0.0156	0.0002	0.0001	88.5	PADO
-5.31	35.90	0.0149	0.0172	0.0002	0.0002	101.8	CEUT

Lon	Lat	V _n (mm/yr)	V _e (mm/yr)	Semiassse minore	Semiassse maggiore	Azimuth	Stazione
20.67	46.56	0.0224	0.0140	0.0002	0.0001	86.7	OROS
-6.21	36.46	0.0149	0.0172	0.0000	0.0000	106.4	SFER
-17.89	28.76	0.0154	0.0172	0.0002	0.0002	124.0	LPAL
-1.22	46.16	0.0176	0.0160	0.0002	0.0001	94.8	LROC
12.36	43.12	0.0201	0.0164	0.0001	0.0001	90.2	UNPG
8.73	50.22	0.0184	0.0153	0.0001	0.0000	89.3	KLOP
8.41	49.01	0.0190	0.0159	0.0001	0.0000	89.8	KARL
12.89	57.71	0.0170	0.0144	0.0002	0.0001	90.2	SPT0
-46.05	60.72	-0.0183	0.0144	0.0002	0.0002	92.4	QAQ1
21.04	52.47	0.0201	0.0142	0.0002	0.0002	89.5	BOGI
-1.69	55.21	0.0154	0.0156	0.0002	0.0001	89.6	MORP
31.97	46.97	0.0230	0.0118	0.0002	0.0001	86.8	MIKL
22.14	47.84	0.0221	0.0129	0.0002	0.0002	87.5	NYIR
-68.83	76.54	-0.0231	0.0049	0.0002	0.0002	110.2	THU3
12.50	55.74	0.0177	0.0149	0.0001	0.0001	90.9	BUDP
13.73	51.03	0.0195	0.0156	0.0001	0.0000	89.8	DRES
5.25	50.69	0.0181	0.0158	0.0000	0.0000	92.4	WARE
19.92	50.07	0.0206	0.0147	0.0002	0.0001	88.0	KRAW
19.28	47.79	0.0213	0.0143	0.0000	0.0000	88.9	PENC
-6.21	36.46	0.0149	0.0172	0.0000	0.0000	106.4	SFER
-21.96	64.14	-0.0106	0.0204	0.0000	0.0000	83.9	REYK
5.14	50.00	0.0182	0.0158	0.0003	0.0002	90.4	REDU
9.56	55.64	0.0165	0.0153	0.0002	0.0001	90.3	SMID
9.74	56.84	0.0167	0.0150	0.0002	0.0001	90.2	SULD
-4.22	57.49	0.0133	0.0167	0.0003	0.0002	89.5	INVE
11.10	43.89	0.0210	0.0173	0.0002	0.0002	92.1	PRAT
-2.64	53.34	0.0154	0.0161	0.0003	0.0002	90.9	DARE
3.32	42.32	0.0214	0.0177	0.0001	0.0001	92.8	CREU
2.62	39.55	0.0174	0.0163	0.0001	0.0001	92.5	MALL
19.04	50.25	0.0217	0.0100	0.0003	0.0002	87.7	KATO
19.21	49.69	0.0208	0.0146	0.0003	0.0002	87.9	ZYWI
0.33	50.87	0.0155	0.0162	0.0002	0.0002	88.5	HERT
13.64	54.51	0.0178	0.0148	0.0002	0.0001	89.6	SASS
21.03	52.10	0.0204	0.0137	0.0003	0.0002	86.7	JOZ2
8.97	39.14	0.0214	0.0160	0.0003	0.0003	90.4	CAGZ
21.05	64.88	0.0170	0.0150	0.0002	0.0002	89.9	SKE0
12.10	54.17	0.0179	0.0151	0.0002	0.0001	90.3	WARN
20.32	49.03	0.0195	0.0148	0.0003	0.0002	87.9	GANP
12.97	46.56	0.0207	0.0161	0.0003	0.0002	93.4	ZOUF

Lon	Lat	Vn (mm/yr)	Ve (mm/yr)	Semiassse minore	Semiassse maggiore	Azimuth	Stazione
7.64	45.02	0.0198	0.0154	0.0003	0.0002	93.1	IENG
34.76	30.60	0.0223	0.0211	0.0001	0.0001	72.0	RAMO
9.10	45.80	0.0209	0.0130	0.0004	0.0003	91.9	COMO
-5.54	50.10	0.0152	0.0164	0.0004	0.0002	92.9	NEWL
-0.34	51.42	0.0165	0.0163	0.0001	0.0001	88.9	NPLD
11.65	44.52	0.0221	0.0181	0.0004	0.0003	92.1	MSEL
6.92	43.75	0.0194	0.0155	0.0000	0.0000	94.8	GRAS
24.06	56.95	0.0196	0.0129	0.0001	0.0000	91.9	RIGA
-5.31	35.90	0.0149	0.0172	0.0002	0.0002	101.8	CEUT
36.24	50.01	0.0238	0.0077	0.0006	0.0004	90.2	KHAR
-50.94	66.99	-0.0176	0.0118	0.0000	0.0000	82.9	KELY
12.36	43.12	0.0201	0.0164	0.0001	0.0001	90.2	UNPG

Il campo di velocità è rappresentato nella figura (8.13). Come ci si aspettava, l'orientamento dei vettori che rappresentano le velocità dei siti è compatibile con quello relativo alla descrizione di un moto rigido. Se immaginiamo che la placca europea sia rigida, possiamo descriverne il moto per mezzo di un vettore velocità angolare. Sia $\boldsymbol{\omega}$ la velocità angolare, e \mathbf{r}_{sito} la posizione cartesiana del sito (nel sistema ITRF2000), allora la velocità sarà:

$$\mathbf{v}_{sito} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{sito} \quad (8.3)$$

Per indagare le deformazioni della placca è necessario rimuovere la componente del campo di velocità dovuta al moto rigido. Sottraendo il campo di velocità calcolato con l'eq. (8.3) otteniamo i valori riportati nelle seguenti tabelle:

Lat	lon	Vn	Ve	Sito
8.97	39.14	0.0013	-0.0007	CAGL
-3.95	40.44	0.0007	-0.0008	VILL
16.70	40.65	0.0063	0.0004	MATE
14.99	36.88	0.0053	-0.0029	NOTO
17.07	52.28	0.0017	-0.0016	BOR1
5.81	52.18	0.0016	-0.0015	KOSG
4.36	50.80	0.0004	-0.0018	BRUS
21.04	52.48	0.0022	-0.0010	BOGO
24.40	60.22	0.0012	-0.0007	METS
7.47	46.88	0.0016	-0.0009	ZIMM

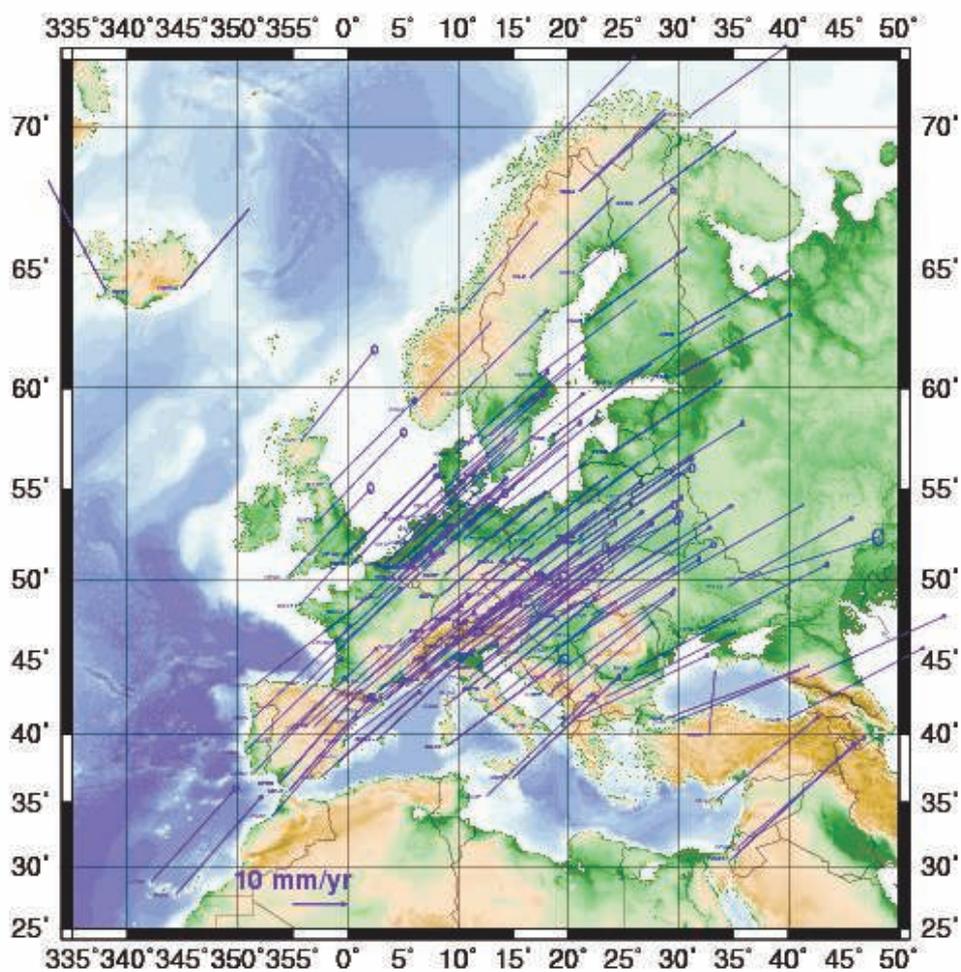


Figura 8.13: Campo di velocità della placca eurpoea, espresso nel sistema di riferimento ITRF2000.

14.79	49.91	0.0016	-0.0007	GOPE
15.49	47.07	0.0024	-0.0002	GRAZ
0.34	50.87	0.0015	-0.0013	HERS
21.03	52.10	0.0022	-0.0010	JOZE
20.97	67.86	0.0032	-0.0024	KIRU
11.65	44.52	0.0035	0.0016	MEDI
11.93	57.40	0.0010	-0.0020	ONSA
13.07	52.38	0.0015	-0.0015	POTS
-21.96	64.14	0.0039	-0.0195	REYK
12.88	49.14	0.0018	-0.0009	WTZR
20.67	53.89	0.0022	-0.0017	LAMA
-68.79	76.54	-0.0060	-0.0159	THU1
19.28	47.79	0.0020	-0.0003	PENC
-50.94	66.99	-0.0027	-0.0182	KELY
-6.21	36.46	0.0013	-0.0040	SFER
11.39	47.31	0.0024	-0.0004	HFLK
11.88	45.41	0.0039	0.0001	UPAD
4.59	50.09	0.0007	-0.0024	DOUR
4.39	51.99	0.0011	-0.0015	DEL F
5.25	50.69	0.0012	-0.0005	WARE
3.40	50.93	0.0013	-0.0016	DENT
32.76	39.89	0.0026	-0.0229	ANKR
6.92	43.75	0.0011	-0.0007	GRAS
0.49	40.82	0.0004	-0.0002	EBRE
21.77	62.96	0.0013	-0.0015	VAAS
30.10	62.39	0.0016	-0.0009	JOEN
21.06	67.88	0.0024	-0.0023	KIRO
17.26	60.60	0.0010	-0.0011	MAR6
16.56	64.70	0.0019	-0.0028	VIL0
24.06	56.95	0.0015	-0.0014	RIGA
18.37	57.65	0.0010	-0.0014	VIS0
29.78	60.53	0.0011	-0.0006	SVTL
17.27	48.37	0.0024	-0.0006	MOPI
17.06	51.11	0.0017	-0.0017	WROC
26.39	67.42	0.0022	-0.0017	SODA
17.06	51.11	0.0017	-0.0017	WROC
21.04	52.48	0.0022	-0.0010	BOGO
17.27	48.37	0.0024	-0.0006	MOPI
17.06	51.11	0.0017	-0.0017	WROC
18.37	57.65	0.0010	-0.0014	VIS0

Lat	lon	Vn	Ve	Sito
21.06	67.88	0.0024	-0.0023	KIRO
16.56	64.70	0.0019	-0.0028	VIL0
30.10	62.39	0.0016	-0.0009	JOEN
24.06	56.95	0.0015	-0.0014	RIGA
29.78	60.53	0.0011	-0.0006	SVTL
21.77	62.96	0.0013	-0.0015	VAAS
9.78	47.52	0.0019	0.0002	PFAN
26.39	67.42	0.0022	-0.0017	SODA
23.39	42.56	0.0003	0.0006	SOFI
33.40	35.14	0.0060	-0.0057	NICO
6.60	52.91	0.0017	-0.0015	WSRT
41.57	43.79	0.0041	0.0003	ZECK
-15.20	64.27	-0.0018	0.0019	HOFN
5.25	50.69	0.0012	-0.0005	WARE
30.50	50.36	0.0025	-0.0012	GLSV
4.68	45.88	0.0009	-0.0006	SJDV
6.76	50.67	0.0019	-0.0008	EUSK
5.35	43.28	0.0020	-0.0003	MARS
8.41	49.01	0.0017	-0.0005	KARL
-9.42	38.69	0.0010	-0.0004	CASC
34.76	30.60	0.0016	-0.0026	RAMO
7.47	46.88	0.0016	-0.0009	ZIMM
11.34	46.50	0.0017	-0.0011	BZRG
8.92	44.42	0.0013	-0.0003	GENO
-4.50	48.38	0.0012	-0.0012	BRST
12.36	43.12	0.0028	-0.0010	UNPG
1.40	41.60	0.0011	-0.0008	BELL
7.66	45.06	0.0015	-0.0005	TORI
3.32	42.32	0.0028	0.0017	CREU
13.11	47.80	0.0018	0.0000	SBGZ
25.30	54.65	0.0022	-0.0006	VLNS
26.13	44.46	0.0011	-0.0004	BUCU
12.61	35.50	0.0051	-0.0028	LAMP
1.97	42.48	0.0007	-0.0005	LLIV
5.22	53.36	0.0002	-0.0001	TERS
5.68	50.76	0.0015	-0.0014	EIJS
11.87	78.93	0.0011	-0.0027	NYA1
18.94	69.66	0.0022	-0.0031	TRO1
0.16	48.02	0.0004	-0.0000	MANS
22.30	48.63	0.0018	-0.0009	UZHL
29.45	40.79	-0.0007	-0.0007	TUBI

Lat	lon	Vn	Ve	Sito
-15.63	27.76	0.0015	-0.0032	MAS1
-8.40	43.36	0.0003	0.0037	ACOR
-0.48	38.34	0.0015	-0.0005	ALAC
0.98	42.69	0.0011	-0.0005	ESCO
13.73	51.03	0.0023	-0.0007	DRES
8.73	50.22	0.0012	-0.0010	KLOP
18.41	43.87	0.0035	0.0004	SRJV
7.89	54.17	0.0017	-0.0016	HELG
29.02	41.10	-0.0008	0.0019	ISTA
39.78	40.99	0.0054	0.0001	TRAB
8.76	41.93	0.0018	-0.0003	AJAC
10.46	52.30	0.0015	-0.0007	PTBB
10.48	53.05	0.0014	-0.0011	HOBU
20.79	41.13	-0.0007	0.0010	ORID
14.99	36.88	0.0067	-0.0017	NOT1
18.11	42.65	0.0059	0.0007	DUBR
18.68	45.56	0.0027	-0.0000	OSJE
-3.09	40.52	0.0007	-0.0007	YEBE
2.59	48.84	0.0008	-0.0012	MLVL
10.32	63.37	0.0022	-0.0034	TRDS
-0.41	46.13	0.0011	-0.0003	CHIZ
6.75	53.56	0.0009	-0.0011	BORK
35.39	31.59	0.0006	-0.0020	DRAG
11.34	46.50	0.0017	-0.0011	BZRG
5.60	59.02	0.0011	-0.0023	STAS
10.37	59.74	0.0012	-0.0024	OSLS
31.03	70.34	0.0027	-0.0019	VAR5
-3.80	43.47	0.0017	-0.0011	CANT
-2.46	36.85	0.0002	-0.0015	ALME
2.62	39.55	0.0013	-0.0025	MALL
-25.66	37.75	0.0000	-0.0034	PDEL
-8.59	41.11	0.0008	-0.0001	GAIA
-8.67	37.10	0.0016	-0.0017	LAGO
-0.34	39.48	-0.0000	0.0006	VALE
-0.34	51.42	0.0010	-0.0009	NPLD
-6.85	34.00	0.0020	-0.0039	RABT
14.54	46.05	0.0042	-0.0002	GSR1
9.78	47.52	0.0019	0.0002	PFAN
1.48	43.56	0.0007	-0.0003	TLSE
3.32	42.32	0.0028	0.0017	CREU
8.41	49.01	0.0017	-0.0005	KARL

Lat	lon	Vn	Ve	Sito
8.73	50.22	0.0012	-0.0010	KLOP
6.76	50.67	0.0019	-0.0008	EUSK
-6.34	39.48	0.0010	-0.0006	CACE
14.28	48.31	0.0021	-0.0007	LINZ
34.54	49.60	0.0034	-0.0013	POLV
11.28	48.09	0.0017	-0.0004	OBE2
-15.20	64.27	-0.0018	0.0019	HOFN
16.59	49.21	0.0019	-0.0008	TUBO
-50.94	66.99	-0.0027	-0.0182	KELY
13.35	42.37	0.0044	0.0005	AQUI
10.21	42.75	0.0022	-0.0007	ELBA
24.01	49.84	0.0025	-0.0006	SULP
4.59	50.09	0.0007	-0.0024	DOUR
11.90	45.41	0.0019	-0.0000	PADO
-5.31	35.90	0.0014	-0.0042	CEUT
20.67	46.56	0.0019	0.0004	OROS
-6.21	36.46	0.0013	-0.0040	SFER
-17.89	28.76	0.0007	-0.0028	LPAL
-1.22	46.16	0.0006	-0.0006	LROC
12.36	43.12	0.0028	-0.0010	UNPG
8.73	50.22	0.0012	-0.0010	KLOP
8.41	49.01	0.0017	-0.0005	KARL
12.89	57.71	0.0009	-0.0018	SPT0
-46.05	60.72	-0.0007	-0.0223	QAQ1
21.04	52.47	0.0022	-0.0011	BOGI
-1.69	55.21	0.0002	-0.0008	MORP
31.97	46.97	0.0022	-0.0005	MIKL
22.14	47.84	0.0011	0.0000	NYIR
-68.83	76.54	-0.0064	-0.0161	THU3
12.50	55.74	0.0013	-0.0014	BUDP
13.73	51.03	0.0023	-0.0007	DRES
5.25	50.69	0.0012	-0.0005	WARE
19.92	50.07	0.0025	-0.0008	KRAW
19.28	47.79	0.0020	-0.0003	PENC
-6.21	36.46	0.0013	-0.0040	SFER
-21.96	64.14	0.0039	-0.0195	REYK
5.14	50.00	0.0012	-0.0005	REDU
9.56	55.64	0.0013	-0.0020	SMID
9.74	56.84	0.0010	-0.0016	SULD
-4.22	57.49	0.0010	-0.0018	INVE

Lat	lon	Vn	Ve	Sito
11.10	43.89	0.0035	0.0002	PRAT
-2.64	53.34	0.0006	-0.0011	DARE
3.32	42.32	0.0028	0.0017	CREU
2.62	39.55	0.0013	-0.0025	MALL
19.04	50.25	-0.0024	0.0005	KATO
19.21	49.69	0.0022	-0.0005	ZYWI
0.33	50.87	0.0010	-0.0021	HERT
13.64	54.51	0.0014	-0.0018	SASS
21.03	52.10	0.0017	-0.0009	JOZ2
8.97	39.14	0.0019	0.0004	CAGZ
21.05	64.88	0.0030	-0.0018	SKE0
12.10	54.17	0.0015	-0.0014	WARN
20.32	49.03	0.0027	-0.0021	GANP
12.97	46.56	0.0026	-0.0000	ZOUF
7.64	45.02	0.0011	-0.0002	IENG
34.76	30.60	0.0016	-0.0026	RAMO
9.10	45.80	-0.0011	0.0007	COMO
-5.54	50.10	0.0006	-0.0013	NEWL
-0.34	51.42	0.0010	-0.0009	NPLD
11.65	44.52	0.0044	0.0013	MSEL
6.92	43.75	0.0011	-0.0007	GRAS
24.06	56.95	0.0015	-0.0014	RIGA
-5.31	35.90	0.0014	-0.0042	CEUT
36.24	50.01	-0.0009	0.0001	KHAR
-50.94	66.99	-0.0027	-0.0182	KELY
12.36	43.12	0.0028	-0.0010	UNPG

Come si può vedere in fig. (8.14) il campo determinato è in accordo con i valori forniti dal modello nella regione centrale dell'europa: questa è la parte più interna, e quindi più rigida, della placca europea. Si vede che le velocità stimate differiscono notevolmente da quelle dedotte dall'eq. 8.3 nelle regioni periferiche, che corrispondono alle zone di interazione tra la placca europea e le placche vicine.

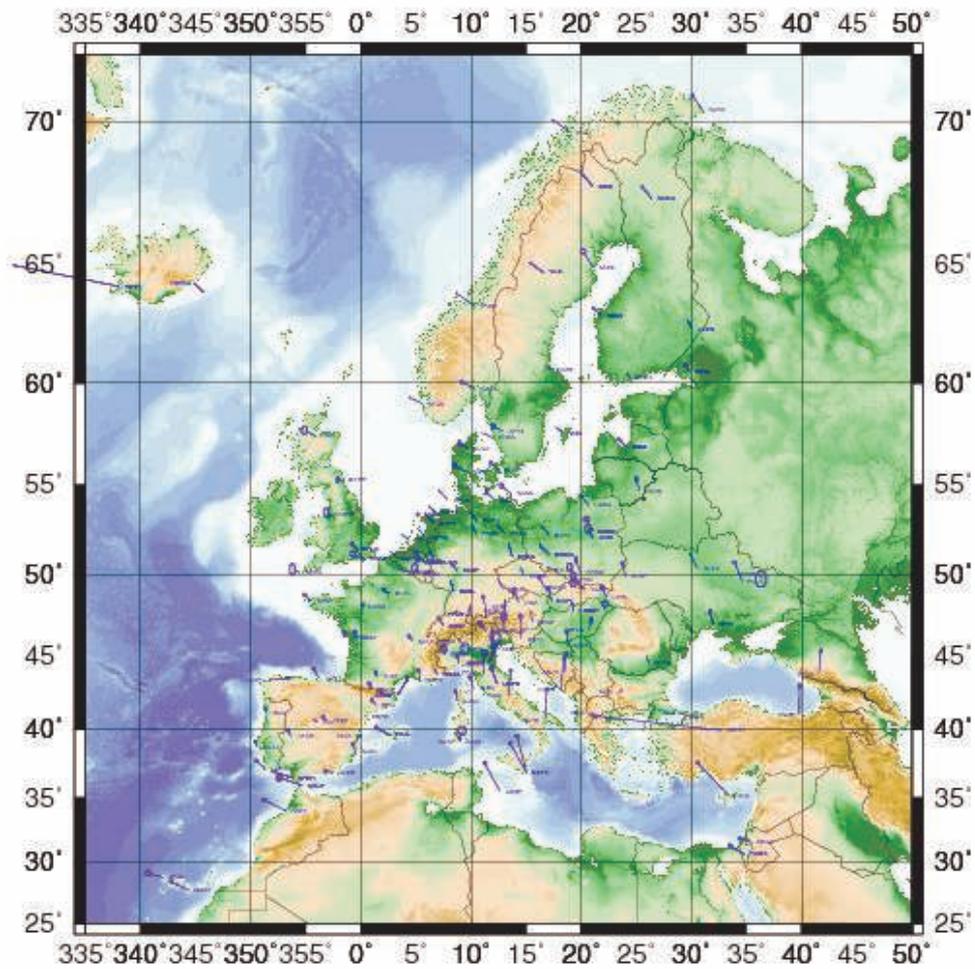


Figura 8.14: Campo di velocità intraplacca.

Capitolo 9

Infittimento del campo di velocità

9.1 Introduzione

Nel capitolo precedente abbiamo determinato il campo di velocità a partire dalle equazioni normali della rete EUREF; tali dati non sono però sufficienti a caratterizzare il campo di deformazione in quanto la distanza media tra i siti della rete EUREF, essendo questa una rete nata per scopi cartografici, è troppo elevata per prestarsi ad applicazioni geofisiche. Tuttavia le equazioni normali EUREF sono necessarie perchè definiscono ed infittiscono il sistema di riferimento ITRF nella regione europea. Il principio di combinazione delle equazioni normali permette di infittire la rete EUREF per mezzo di soluzioni locali. Il nostro gruppo di ricerca esegue da molto tempo il calcolo, su base settimanale, delle coordinate di una rete di stazioni GPS in territorio italiano ed austriaco (rete UPA) sulla base delle stesse procedure e dello stesso software utilizzato. Inoltre abbiamo a disposizione lo stesso tipo di soluzioni settimanali per una rete molto fitta disposta su territorio austriaco (rete GP). Le soluzioni settimanali UPA e GP condividono un limitato (e variabile) numero di siti con le corrispondenti soluzioni settimanali EUREF. Questo fatto consente di allineare ogni soluzione settimanale UPA e GP alla rete EUREF. Per ottenere un campo di velocità combinato correttamente allineato al sistema di riferimento ITRF (in questo caso scegliamo il riferimento ITRF05, definito dal file¹ `itr05_trf.snx`) è necessario definire una strategia di combinazione rigorosa. Tale strategia è costituita da 4 punti principali:

1. Soluzione preliminare multianno settimanale per EUREF, UPA e GP, separatamente.
2. Introduzione offsets e rimozione outliers.
3. Combinazione delle soluzioni settimanali EUREF, UPA, GP.
4. Combinazione multianno delle soluzioni settimanali combinate.

¹ftp://itrf.ensg.ign.fr/pub/itrf/itr2005/ITRF2005_TRF.SNX.gz

9.2 Descrizione della strategia di combinazione

9.2.1 La definizione del sistema di riferimento

Abbiamo visto che i sistemi di equazioni normali ottenuti dall'elaborazione di dati GPS sono singolari, a causa del fatto che l'osservabile permette di determinare la posizione di un sito a meno di una traslazione, una rotazione ed un fattore di scala. Quando si intende stimare anche le velocità il sistema delle equazioni normali rimane ancora singolare. Per invertire tali sistemi è necessario vincolare il sistema di riferimento inserendo 14 nuove equazioni (7 per eliminare la singolarità per le coordinate e 7 per eliminare la singolarità per le velocità). Operativamente si ha a disposizione un insieme di valori a priori per coordinate e velocità che servono a vincolare il sistema di equazioni normali. Tuttavia, nel caso delle soluzioni UPA e GP, il numero di siti di cui si dispone coordinate e velocità a priori nel sistema di riferimento ITRF05 è esiguo e non efficacemente distribuito su tutta la rete. Questo fatto comporta problemi di allineamento e di singolarità dei sistemi di equazioni normali settimanali, non permettendo di comprendere se i drift che si presentano nelle serie storiche di alcuni siti siano da imputarsi a presenza di outliers, presenza di offsets non risolti o a scarsità di siti che definiscono il sistema di riferimento. In sostanza non si comprende se i drift nelle serie storiche dipendano dalla qualità del sito o dall'inadeguatezza del sistema di riferimento.

9.2.2 Software di combinazione

Nel capitolo precedente è proceduto alla combinazione delle eq. normali tramite il software ADDNEQ2. il software in questione non è risultato totalmente idoneo per svolgere tale mansione, infatti durante i ripetuti run si sono verificati comportamenti anomali e difficilmente riproducibili (errori di allocazione degli arrays, errori di associazione tra siti e coordinate e velocità, lentezza nell'elaborazione) che ci hanno portato ad utilizzare un altro software di combinazione. Abbiamo perciò deciso di utilizzare il software CATREF (Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames), sviluppato da Z. Altamimi e utilizzato da anni per la definizione delle varie realizzazioni dell'ITRF. Il modello di osservabile su cui si basa CATREF è costituito da una trasformazione di similitudine come quella definita dalle eq. (5.106).

9.2.3 Classificazione dei vincoli.

Seguendo Altamimi, i vincoli che vengono applicati ai sistemi di equazioni normali contenuti nei files SINEX possono essere suddivisi in 4 categorie:

1. *Tight constraints*: $\sigma \geq 10^{-10}m$.
2. *Removable constraints*: $\sigma \approx 10^{-5}m$.
3. *Loose constraints*: $\sigma \geq 1m$.

4. *Minimum Constraints.*

I vincoli di tipo 1) sono praticamente equivalenti a fissare la posizione dei siti scelti per definire il riferimento. Questo tipo di vincoli comporta dei problemi di natura numerica che ne impediscono la rimozione. I vincoli di tipo 2) possono essere rimossi, dalla singola soluzione s , per mezzo dell'equazione:

$$(\boldsymbol{\Sigma}_s^{unc})^{-1} = (\boldsymbol{\Sigma}_s^{est})^{-1} - (\boldsymbol{\Sigma}_s^{const})^{-1}. \quad (9.1)$$

I vincoli di tipo 3) non sono sufficienti a stabilizzare il sistema di riferimento, nel senso che, nel caso di una combinazione multianno, i parametri di Helmert delle soluzioni individuali, rispetto alla soluzione combinata, mostrano valori molto elevati, dell'ordine del metro.

9.2.4 Rimozione e imposizione di nuovi vincoli.

CATREF richiede che da ciascuna soluzione individuale s vengano rimossi i vincoli esistenti e vengano imposti i vincoli di tipo 3). I sistemi di eq. normali che abbiamo a disposizione contengono i vincoli di tipo 2) e 3). Nel caso di vincoli di tipo 2) è necessario utilizzare l'eq. (9.1) per rimuoverli, e imporre i minimi vincoli tramite l'eq.:

$$(\boldsymbol{\Sigma}_s^{mc})^{-1} = (\boldsymbol{\Sigma}_s^{unc})^{-1} + \mathbf{B}^T \boldsymbol{\Sigma}^{\Theta-1} \mathbf{B} \quad (9.2)$$

dove \mathbf{B} è la matrice:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (9.3)$$

ed \mathbf{A} è la matrice disegno della trasformazione di similitudine (5.119). Nel caso di vincoli di tipo 3) possiamo applicare direttamente i minimi vincoli, utilizzando l'equazione:

$$\boldsymbol{\Sigma}_s^{mc} = \boldsymbol{\Sigma}_s^{est} - \boldsymbol{\Sigma}_s^{est} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \boldsymbol{\Sigma}_s^{est} \mathbf{B}^T + \boldsymbol{\Sigma}^{\Theta})^{-1} \mathbf{B} \boldsymbol{\Sigma}_s^{est}. \quad (9.4)$$

L'eq. (9.4) deriva dall'eq. (9.2) attraverso l'identità matriciale:

$$[\boldsymbol{\Lambda}_1 - \boldsymbol{\Lambda}_{12} \boldsymbol{\Lambda}_2^{-1} \boldsymbol{\Lambda}_{21}]^{-1} = \boldsymbol{\Lambda}_1 + \boldsymbol{\Lambda}_1^{-1} \boldsymbol{\Lambda}_{12} [\boldsymbol{\Lambda}_2 - \boldsymbol{\Lambda}_{21} \boldsymbol{\Lambda}_1^{-1} \boldsymbol{\Lambda}_{12}]^{-1} \boldsymbol{\Lambda}_{21} \boldsymbol{\Lambda}_1^{-1} \quad (9.5)$$

dove $\boldsymbol{\Lambda}_1$, $\boldsymbol{\Lambda}_{12}$, $\boldsymbol{\Lambda}_{21}$, $\boldsymbol{\Lambda}_2$ sono le submatrici che costituiscono la seguente matrice invertibile:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\Lambda}_1 & \boldsymbol{\Lambda}_{12} \\ \boldsymbol{\Lambda}_{21} & \boldsymbol{\Lambda}_2 \end{pmatrix}. \quad (9.6)$$

Il secondo termine di destra dell'eq. (9.4):

$$\boldsymbol{\Sigma}_s^{est} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \boldsymbol{\Sigma}_s^{est} \mathbf{B}^T + \boldsymbol{\Sigma}^{\Theta})^{-1} \mathbf{B} \boldsymbol{\Sigma}_s^{est} \quad (9.7)$$

viene detto proiettore, e descrive l'effetto del sistema di riferimento sulla matrice di covarianza $\boldsymbol{\Sigma}_s^{mc}$.

9.2.5 Vincoli relativi tra le velocità

Come abbiamo visto nei capitoli precedenti, salti nelle serie storiche degradano la stima delle velocità di un sito. E' necessario vincolare quindi le diverse realizzazioni dello stesso sito. Per vincolare la terna delle componenti della velocità (x_i, y_i, z_i) alla terna di valori (x_j, y_j, z_j) ad un livello specificato da $(\dot{\sigma}_x, \dot{\sigma}_y, \dot{\sigma}_z)$ si devono gli elementi della matrice di covarianza nel seguente modo (vedi [10]):

$$N_{6k-2,6k-2} = N_{6k-2,6k-2} + \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (9.8)$$

$$N_{6k-1,6k-1} = N_{6k-1,6k-1} + \frac{1}{\sigma_y^2} \quad (9.9)$$

$$N_{6k,6k} = N_{6k,6k} + \frac{1}{\sigma_z^2}. \quad (9.10)$$

I termini di covarianza sono:

$$N_{6i-2,6j-2} = N_{6i-2,6j-2} + \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (9.11)$$

$$N_{6i-1,6j-i} = N_{6i-1,6j-1} + \frac{1}{\sigma_y^2} \quad (9.12)$$

$$N_{6i,6j} = N_{6i,6j} + \frac{1}{\sigma_z^2} \quad (9.13)$$

ed essendo la matrice normale simmetrica:

$$N_{6j-2,6i-2} = N_{6j-2,6i-2} + \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (9.14)$$

$$N_{6j-1,6i-i} = N_{6j-1,6i-1} + \frac{1}{\sigma_y^2} \quad (9.15)$$

$$N_{6j,6i} = N_{6j,6i} + \frac{1}{\sigma_z^2}. \quad (9.16)$$

9.2.6 Stima dei pesi relativi alle soluzioni individuali

La qualità dei risultati derivati da un processo di stima ai minimi quadrati viene effettuata attraverso un confronto tra i residui postfit e la varianza a priori delle osservazioni. Il livello di accordo è indicato dalla varianza di peso unitario (variance factor) calcolata a posteriori. Generalizzando possiamo utilizzare la varianza di peso unitario per determinare i pesi relativi alle soluzioni individuali:

$$\sigma_s = \frac{v_s^T \Sigma_s^{-1} v_s}{f_s} \quad (9.17)$$

dove v_s è il vettore dei residui postfit associato ad una soluzione individuale, Σ_s è la matrice di covarianza e f_s un fattore di rindondanza definito come:

$$f_s = 6n_s - tr(A_s \Sigma_{comb}^{-1} A_s^T \Sigma_s^{-1}) \quad (9.18)$$

dove n_s è il numero di siti contenuti nella soluzione individuale, Σ_{comb} la matrice di covarianza della soluzione combinata, A_s la design matrix della soluzione individuale e Σ_s ma matrice di covarianza relativa. Con questa definizione le varianze delle soluzioni vengono aumentate o ridotte di un fattore σ_s , che dipende essenzialmente dai residui di ciascuna soluzione.

9.2.7 Stima statistica della qualità della combinazione

Per ogni soluzione individuale si può calcolare il WRMS come:

$$WRMS = \sqrt{\frac{v_s^T D(\Sigma_s)^{-1} v_s}{\frac{tr(D(\Sigma_s^{-1}))}{3n_s} (f_s - 1)}} \quad (9.19)$$

dove v_s è il vettore dei residui relativi alla posizione, $D(\Sigma_s)$ è la diagonale della matrice di covarianza associata alla soluzione individuale. Analogamente il WRMS può essere calcolato anche per le velocità.

9.2.8 Sull'utilizzo dei vincoli interni

Abbiamo visto che un sistema di eq. normali singolare, come quelli che spesso si trovano in geodesia, può essere invertito senza la definizione di un sistema di riferimento interno, attraverso i vincoli interni. Il software CATREF permette di calcolare una soluzione combinata utilizzando i vincoli interni. La soluzione combinata ottenuta non sarà, in generale, allineata ad un sistema di riferimento terrestre, ma conserverà la propria consistenza interna, i residui delle coordinate delle soluzioni individuali rispetto alla soluzione combinata saranno uguali a quelli calcolati rispetto ad una soluzione vincolata tramite i minimi vincoli. Ne segue che le serie storiche dei siti saranno identiche. Le due soluzioni combinate differiranno per una trasformazione di similitudine. La possibilità di effettuare lo stacking delle eq. normali e lo screening dei residui senza doversi preoccupare di definire un sistema di riferimento esterno velocizza molto il processo di analisi e permette di separare, nella serie storica di un particolare sito, l'effetto della qualità intrinseca del sito da quello dovuto alla definizione del sistema di riferimento.

9.3 Pre-processamento delle equazioni normali

Le matrici di covarianza settimanali vengono immagazzinate in file SINEX, in questo tipo di file ogni sito è individuato da 3 codici:

1. Site name: codice alfanumerico di 4 caratteri.
2. Domes code: codice alfanumerico di 9 caratteri.

3. Solution number: codice numerico di 2 caratteri.

Nei sinex della rete EUREF Site name e Domes code vengono sempre specificati, e vengono ogni giorno controllati automaticamente da un software attraverso un confronto con i relativi log files. Il solution number permette di definire le varie realizzazioni dello stesso sito; generalmente serve per indicare un cambiamento di hardware per un particolare sito (nella maggior parte dei casi un cambiamento di antenna a cui è associato un offset).

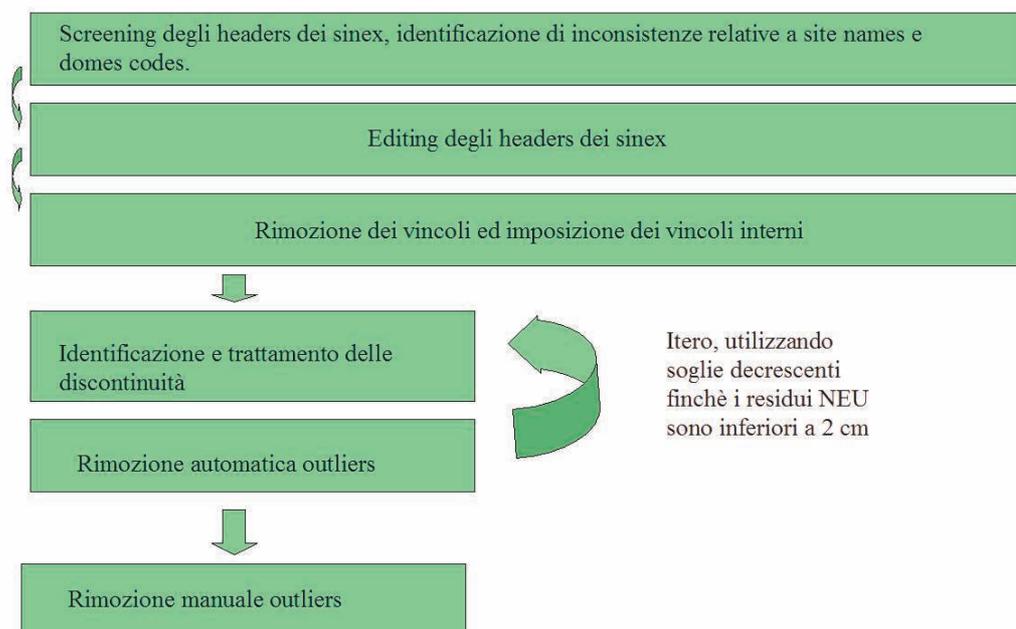
La situazione è più complicata per i files SINEX della rete UPA e GP; per tali files il controllo automatico della correttezza dei codici identificativi non viene eseguito, e quindi può accadere che lo stesso sito abbia codici identificativi diversi in diversi SINEX della stessa rete, oppure, caso più grave, può accadere che siti diversi abbiano gli stessi codici identificativi. In quest'ultimo caso informazioni di siti differenti concorrono a stimare coordinate e velocità di un unico sito, risultando, nella maggior parte dei casi, nello stop del processo di combinazione, senza alcuna possibilità di risalire al sito che ha causato tale problema.

La soluzione adottata è consistita nello screening della sezione SITE/ID di ogni SINEX. In questa sezione sono riportate le coordinate geodetiche approssimate di ogni sito presente nel file. Un semplice script matlab calcola la distanza approssimata, in coordinate locali, tra la posizioni occupate dal sito considerato in due settimane contigue. Il risultato è un grafico nel quale le discontinuità vengono rilevate da picchi improvvisi. Questa tecnica permette di determinare discontinuità dell'ordine di 3 metri. Un secondo script permette di editare in modo interattivo site name e domes code; in caso di discontinuità dell'ordine di metri si è proceduto modificando il domes code del sito dopo la discontinuità.

9.3.1 Soluzioni preliminari multianno

Da ogni soluzioni settimanale sono stati rimossi i vincoli e poi è stata effettuata una combinazione utilizzando vincoli interni. Dal momento che i vincoli interni non permettono di fissare il sistema di riferimento, le soluzioni così ottenute non permettono di stimare un campo di velocità realistico, tuttavia consentono di individuare outliers e discontinuità presenti nelle serie storiche, inoltre tali serie storiche non risentono di effetti dovuti alla scelta del sottoinsieme di siti che realizza effettivamente il riferimento. Alla luce di queste considerazioni si comprende bene l'importanza che l'utilizzo dei vincoli interni riveste per un corretto preprocessing delle equazioni normali. Il processo di preprocessing è iterativo: all'iterazione 0 sono stati introdotte le discontinuità mentre nelle iterazioni successive sono stati eliminati gli outliers. Nelle prime iterazioni la rimozione degli outliers viene effettuata in maniera automatica: si è partiti dal valore di soglia di 1 metro e ad ogni iterazione tale valore è stato ridotto di 10 cm. Una volta raggiunto il valore di 10 cm si è proceduto con decrementi di 1 cm fino a raggiungere la soglia di 2 cm. Empiricamente, a partire dalla soglia di 2 cm si osserva un brusco decremento del variance factor, che raggiunge valori vicini

all'unità. Dalla soglia di 2 cm in giù gli outliers vengono eliminati manualmente a seguito dell'ispezione visuale di ciascuna serie storica.



Schema di combinazione per le soluzioni preliminari.

9.3.2 Combinazione preliminare EUREF

Informazioni generali

Una corretta combinazione delle equazioni normali settimanali EUREF è di fondamentale importanza, poichè consentono di allineare ogni altra soluzione locale al sistema di riferimento ITRF. Nel corso degli anni il numero di siti è andato aumentando: come si vede dalla figura (9.1), nell'intervallo di tempo considerato, il numero di siti è quasi quadruplicato. Anche la qualità delle soluzioni settimanali, dipendendo dalla qualità delle orbite IGS utilizzate, è variabile. Infine le diverse realizzazioni dei sistemi di riferimento ITRF che si sono avvicinate nel corso degli anni concorrono a diminuire la consistenza delle soluzioni. In effetti, da anni è nota alla comunità scientifica di riprocessare tutti i dati grezzi, assicurando la massima omogeneità per quanto riguarda le orbite IGS e le strategie di elaborazione.

Rimozione ed imposizione di nuovi vincoli

Dal punto di vista dei vincoli, l'insieme delle soluzioni settimanali viene delimitato dalla settimana GPS 1302: infatti a partire da tale epoca le soluzioni settimanali sono vincolate tramite minimi vincoli. Per epoche antecedenti sono stati utilizzati i

vincoli di tipo 2). Perciò abbiamo ritenuto opportuno utilizzare le eq. (9.1) e (9.2) per le equazioni normali riferite ad un'epoca precedente alla settimana 1302, e l'eq. (9.4) per le soluzioni successive a tale epoca. La soluzione combinata è stata infine vincolata per mezzo dei vincoli interni.

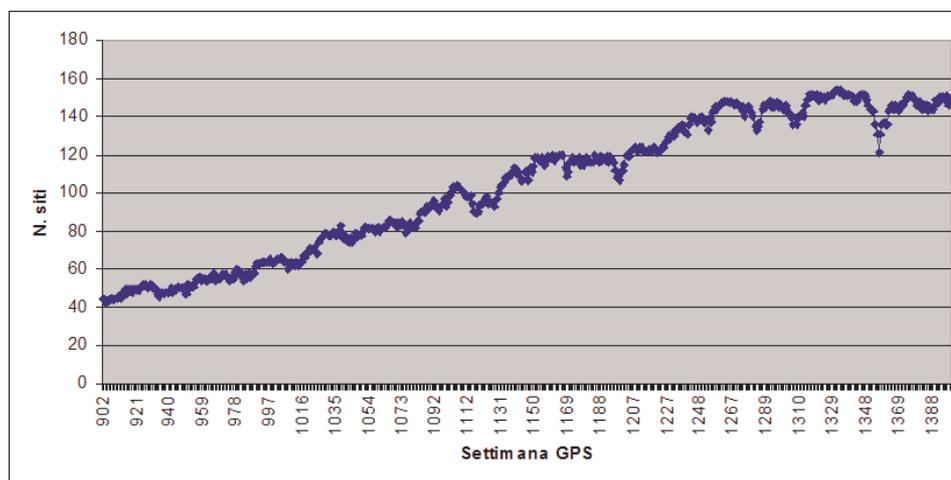


Figura 9.1: Numero di siti presenti in ogni soluzione settimanale EUREF.

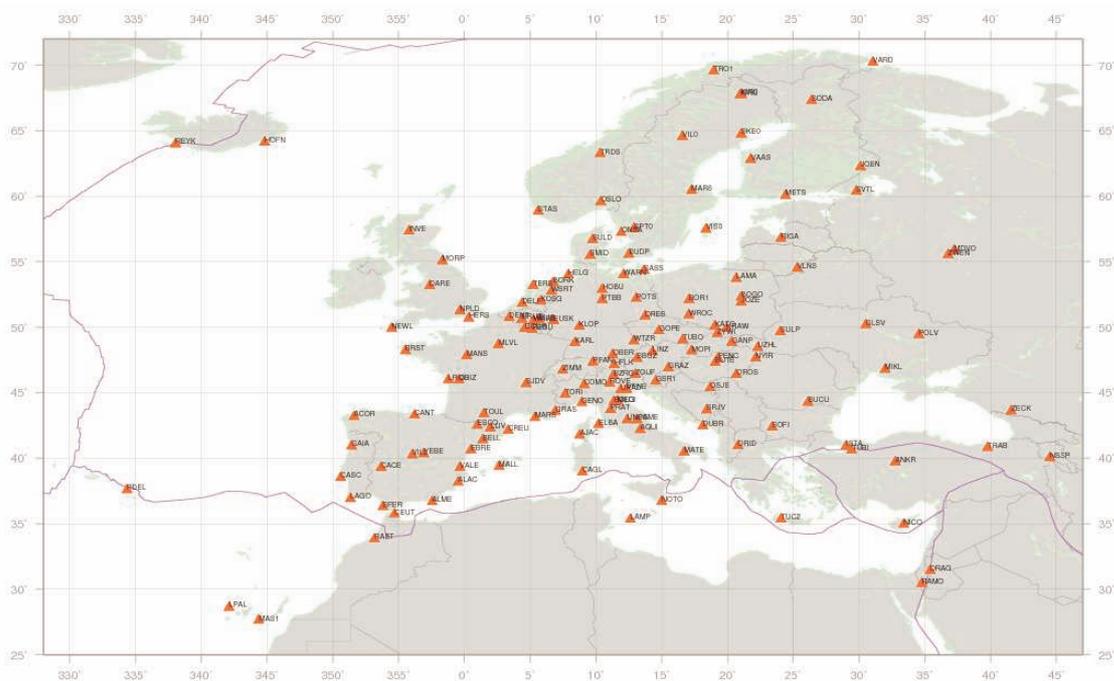


Figura 9.2: Posizione delle stazioni EUREF considerate.

Discontinuità e intervallo temporale

Lo screening manuale dei residui post-fit delle coordinate dei siti ha permesso di determinare le epoche in cui si verificano le discontinuità. Sono state determinate circa 230 discontinuità. Riportiamo in tabella il numero di discontinuità. Le velocità dei siti affetti da tali discontinuità sono stati vincolate per mezzo delle eq. (9.8), (9.11) e (9.14). Tra le coordinate non sono stati imposti vincoli relativi.

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
ACOR	13434M001	1	252	00:023	06:308	6.78
AJAC	10077M005	1	299	00:051	06:308	6.7
ALAC	13433M001	1	324	99:248	06:089	6.56
ALAC	13433M001	2	22	06:155	06:308	0.42
ALME	13437M001	1	276	01:021	06:308	5.79
ANKR	20805M002	1	68	97:110	98:269	1.44
ANKR	20805M002	2	29	98:270	99:149	0.67
ANKR	20805M002	3	304	99:325	06:308	6.95
AQUI	12757M001	1	249	01:287	06:308	5.06
BELL	13431M001	1	387	99:031	06:308	7.76
BOGI	12207M003	1	185	02:265	06:308	4.12
BOGO	12207M002	1	214	97:110	01:174	4.18
BOGO	12207M002	2	257	01:238	06:308	5.19
BOLG	12771M001	1	80	05:086	06:308	1.61
BOR1	12205M002	1	99	97:110	99:079	1.92
BOR1	12205M002	2	358	99:157	06:308	7.41
BORK	14268M001	1	284	00:324	06:308	5.96
BRST	10004M004	1	270	98:361	05:064	6.19
BRST	10004M004	2	41	05:107	06:032	0.79
BRUS	13101M004	1	156	97:110	00:106	2.99
BRUS	13101M004	2	320	00:128	06:308	6.49
BUCU	11401M001	1	361	99:255	06:308	7.15
BUDP	10101M003	1	172	03:019	06:308	3.79
BUTE	11209M001	1	101	04:305	06:308	2.01
BZRG	12751M001	1	97	98:361	00:309	1.86
BZRG	12751M001	3	210	02:223	06:308	4.23
CACE	13447M001	1	246	01:273	06:308	5.1
CAGL	12725M003	1	219	97:110	01:202	4.25
CAGL	12725M003	2	225	01:203	06:308	5.29
CAGZ	12725M004	1	149	03:264	06:308	3.12
CAME	12754M001	1	124	01:035	03:277	2.66
CAME	12754M001	2	67	03:355	06:308	2.87
CANT	13438M001	1	282	01:021	06:308	5.79

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
CASC	13909S001	1	357	99:276	06:308	7.09
CEUT	13449M001	1	128	02:146	05:001	2.6
CEUT	13449M001	2	64	05:093	06:231	1.38
CHIZ	10020M001	1	294	00:317	06:308	5.98
COMO	12761M001	1	83	04:102	05:351	1.68
COMO	12761M001	2	44	05:353	06:308	0.88
CREU	13432M001	1	86	99:199	01:090	1.7
CREU	13432M001	2	20	01:119	01:258	0.38
CREU	13432M001	3	154	03:250	06:305	3.15
DARE	13208S001	1	153	03:208	06:308	3.27
DELF	13502M004	1	170	97:110	00:211	3.28
DELF	13502M004	2	317	00:212	06:308	6.26
DENT	13112M001	1	144	97:110	00:029	2.78
DENT	13112M001	2	110	00:030	02:075	2.12
DENT	13112M001	3	180	02:076	05:295	3.6
DENT	13112M001	4	53	05:296	06:308	1.03
DOUR	13113M001	1	207	97:110	01:110	4
DOUR	13113M001	2	252	01:294	06:308	5.04
DRAG	20710S001	1	219	00:331	06:308	5.94
DRES	14108M001	1	167	99:304	03:018	3.22
DRES	14108M001	2	184	03:026	06:308	3.77
DUBR	11901M001	1	193	00:289	05:238	4.86
DUBR	11901M001	2	15	05:241	05:348	0.29
EBRE	13410M001	1	476	97:110	06:308	9.54
EIJS	13533M001	1	45	99:171	00:120	0.86
EIJS	13533M001	2	317	00:163	06:308	6.4
ELBA	12721M002	1	237	01:287	06:308	5.06
ESCO	13435M001	1	259	99:248	06:308	7.16
EUSK	14258M003	1	135	98:242	01:125	2.68
EUSK	14258M003	2	268	01:133	06:308	5.48
GAIA	13902M001	1	273	01:042	06:308	5.73
GANP	11515M001	1	139	03:320	06:245	2.79
GANP	11515M001	2	9	06:246	06:308	0.17
GENO	12712M002	1	392	98:361	06:308	7.85
GLSV	12356M001	1	408	98:130	06:308	8.49
GOPE	11502M002	1	133	97:110	02:005	4.71
GOPE	11502M002	2	228	02:006	06:203	4.54
GOPE	11502M002	3	15	06:204	06:308	0.28
GRAS	10002M006	1	358	97:110	04:290	7.49
GRAS	10002M006	2	102	04:298	06:308	2.03
GRAZ	11001M002	1	207	97:110	01:111	4
GRAZ	11001M002	2	187	01:168	05:085	3.77

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
GRAZ	11001M002	3	32	05:086	05:309	0.61
GRAZ	11001M002	4	43	05:310	06:308	0.99
GSR1	14501M001	2	239	02:006	06:308	4.83
HELG	14264M001	1	337	99:332	06:308	6.93
HERS	13212M007	1	25	97:110	98:192	1.22
HERS	13212M007	2	35	98:193	99:072	0.67
HERS	13212M007	3	260	01:245	06:308	5.17
HERT	13212M010	1	154	03:243	06:308	3.18
HFLK	11006S003	1	268	97:110	05:302	8.53
HFLK	11006S003	2	52	05:303	06:308	1.01
HOBU	14202M003	1	99	00:163	02:145	1.95
HOBU	14202M003	2	213	02:181	06:308	4.35
HOFN	10204M002	1	173	97:334	01:160	3.52
HOFN	10204M002	2	249	01:308	06:308	5
IENG	12724S001	1	131	04:032	06:308	2.76
INVE	13221S001	1	153	03:187	06:308	3.33
ISTA	20807M001	1	91	00:030	02:026	1.99
ISTA	20807M001	2	239	02:027	06:308	4.77
JOEN	10512M001	1	406	97:243	06:308	9.18
JOZ2	12204M002	1	154	03:257	06:307	3.14
JOZE	12204M001	1	389	97:110	04:346	7.65
JOZE	12204M001	2	88	04:347	06:308	1.89
KARL	14216M001	1	129	98:277	01:125	2.58
KARL	14216M001	2	56	01:133	02:194	1.17
KARL	14216M001	3	216	02:195	06:308	4.31
KATO	12219S001	1	143	03:222	06:308	3.24
KIRO	10422M001	1	435	97:110	06:308	9.54
KIRU	10403M002	1	388	97:110	06:308	9.54
KLOP	14214M002	1	78	99:304	01:125	1.51
KLOP	14214M002	2	51	01:133	02:187	1.15
KLOP	14214M002	3	213	02:188	06:308	4.33
KOSG	13504M003	1	302	97:110	03:067	5.88
KOSG	13504M003	2	143	03:117	06:308	3.52
KRAW	12218M001	1	174	03:026	06:308	3.77
LAGO	13903M001	1	265	01:042	06:308	5.73
LAMA	12209M001	1	146	97:110	00:036	2.8
LAMA	12209M001	2	298	00:289	06:308	6.05
LAMP	12706M002	1	327	99:171	06:308	7.38
LINZ	11033S001	1	60	01:231	02:348	1.32
LINZ	11033S001	2	52	05:268	06:308	1.11
LLIV	13436M001	1	356	99:171	06:308	7.38
LPAL	81701M001	1	222	02:132	06:308	4.48

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
LROC	10023M001	1	223	02:132	06:308	4.48
MALL	13444M001	1	95	01:280	03:221	1.84
MALL	13444M001	2	156	03:264	06:308	3.12
MANS	10091M001	1	86	99:199	01:202	2.01
MANS	10091M001	2	247	01:336	06:308	4.92
MAR6	10405M002	1	93	97:110	99:030	1.78
MAR6	10405M002	2	389	99:038	06:308	7.74
MARS	10073M008	1	225	98:277	03:095	4.5
MARS	10073M008	2	55	03:096	04:129	1.09
MARS	10073M008	3	114	04:207	06:308	2.28
MAS1	31303M002	1	447	97:110	06:308	9.54
MATE	12734M008	1	112	97:110	99:170	2.16
MATE	12734M008	2	359	99:171	06:308	7.38
MDVO	12309M002	1	228	97:110	01:321	4.58
MDVO	12309M002	2	51	01:322	02:306	0.96
MEDI	12711M003	1	190	97:110	01:097	3.96
MEDI	12711M003	2	266	01:098	06:308	5.58
METS	10503S011	1	442	97:110	06:308	9.54
MIKL	12335M001	1	178	02:314	06:308	3.98
MLVL	10092M001	1	272	00:331	06:308	5.94
MOPI	11507M001	1	34	97:173	98:073	0.73
MOPI	11507M001	2	406	98:200	06:308	8.3
MORP	13299S001	1	158	02:307	06:308	4
MSEL	12711M008	1	102	04:284	06:308	2.07
NEWL	13273M103	1	114	04:179	06:307	2.35
NICO	14302M001	1	78	97:173	99:030	1.61
NICO	14302M001	2	315	99:255	06:166	6.76
NOT1	12717M004	1	311	00:247	06:308	6.17
NOTO	12717M003	1	65	97:110	98:199	1.24
NOTO	12717M003	2	95	98:319	00:253	1.82
NPLD	13234M003	1	133	01:049	04:220	3.47
NPLD	13234M003	2	107	04:256	06:298	2.12
NSSP	12312M001	2	116	03:075	06:308	3.64
NYA1	10317M003	1	375	98:123	06:308	8.51
NYIR	11208M001	1	98	02:342	05:015	2.1
NYIR	11208M001	2	87	05:051	06:308	1.7
OBE2	14208M003	1	247	01:322	06:308	4.96
OBER	14208M001	1	206	97:110	01:146	4.1
OBET	14208M004	1	90	03:187	05:129	1.84
ONSA	10402M004	1	93	97:110	99:037	1.8
ONSA	10402M004	2	385	99:038	06:308	7.74
ORID	15601M001	1	279	00:212	06:294	6.22

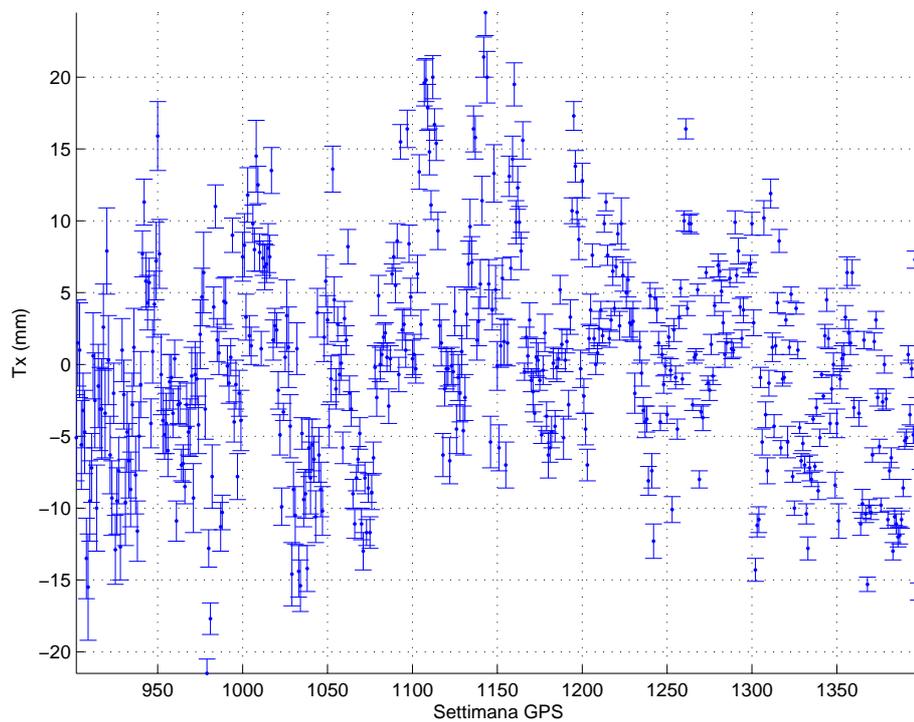
Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
OROS	11207M001	1	18	01:343	02:103	0.34
OROS	11207M001	2	227	02:111	06:308	4.54
OSJE	11902M001	1	245	00:289	05:273	4.96
OSLO	10307M001	4	275	01:056	06:308	5.69
PADO	12750S001	1	237	01:329	06:308	4.94
PDEL	31906M004	1	83	01:042	02:355	1.86
PDEL	31906M004	2	190	02:356	06:308	3.87
PENC	11206M006	1	317	97:110	03:144	6.09
PENC	11206M006	2	170	03:145	06:308	3.45
PFAN	11005S002	1	126	97:110	99:310	2.55
PFAN	11005S002	2	66	99:311	01:076	1.36
PFAN	11005S002	3	268	01:084	06:308	5.61
POLV	12336M001	1	248	01:252	06:308	5.15
POTS	14106M003	1	487	97:110	06:308	9.54
PRAT	12760M001	1	161	03:194	06:308	3.31
PTBB	14234M001	1	98	00:114	02:075	1.89
PTBB	14234M001	2	57	02:083	03:123	1.11
PTBB	14234M001	3	19	03:124	03:277	0.42
PTBB	14234M001	4	154	03:278	06:308	3.08
QAQ1	43007M001	1	164	03:012	06:308	3.81
RABT	35001M002	1	282	01:056	06:308	5.69
RAMO	20703S001	1	84	98:305	00:190	1.68
RAMO	20703S001	2	153	00:240	04:066	3.52
RAMO	20703S001	4	129	04:088	06:308	2.6
REDU	13102M001	1	161	03:173	06:308	3.37
REYK	10202M001	1	135	97:110	00:015	2.74
REYK	10202M001	2	139	00:282	03:165	2.68
REYK	10202M001	3	162	03:166	06:308	3.39
RIGA	12302M002	1	378	97:110	04:346	7.65
RIGA	12302M002	2	61	05:072	06:147	1.21
RIGA	12302M002	3	23	06:148	06:308	0.44
ROVE	12774M001	1	30	06:099	06:308	0.57
SASS	14281M001	1	47	03:250	04:241	0.98
SASS	14281M001	2	109	04:249	06:308	2.16
SBGZ	11031S001	1	213	99:318	06:187	6.64
SBGZ	11031S001	2	15	06:204	06:308	0.28
SFER	13402M004	1	170	98:284	02:061	3.39
SFER	13402M004	2	64	02:069	03:165	1.26
SFER	13402M004	3	168	03:166	06:308	3.39
SJDV	10090M001	1	118	99:080	01:251	2.47
SJDV	10090M001	2	248	01:252	06:308	5.15
SKE0	10426M001	1	127	03:278	06:308	3.08

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
SMID	10114M001	1	160	03:222	06:308	3.24
SODA	10513M001	1	377	97:110	06:308	9.54
SOFI	11101M002	1	164	97:173	00:330	3.43
SOFI	11101M002	2	268	01:084	06:308	5.61
SPT0	10425M001	1	198	02:230	06:308	4.21
SRJV	11801S001	1	201	99:325	06:234	6.75
STAS	10330M001	1	297	00:345	06:308	5.9
SULD	10113M001	1	87	03:187	05:162	1.93
SULD	10113M001	2	71	05:166	06:308	1.39
SULP	12366M001	1	250	01:294	06:308	5.04
SVTL	12350M001	1	340	97:110	04:332	7.61
SVTL	12350M001	2	95	04:361	06:308	1.85
TERS	13534M001	1	45	99:171	00:127	0.88
TERS	13534M001	2	67	00:142	01:251	1.3
TERS	13534M001	3	260	01:252	06:308	5.15
THU1	43001M001	1	214	97:110	03:011	5.73
THU3	43001M002	1	186	03:012	06:308	3.81
TLSE	10003M009	1	259	01:252	06:308	5.15
TORI	12724M002	1	386	99:031	06:308	7.76
TOUL	10003M004	1	159	97:194	00:351	3.43
TRAB	20808M001	1	332	00:030	06:308	6.76
TRDS	10331M001	1	294	00:317	06:308	5.98
TRO1	10302M006	1	32	98:123	98:353	0.63
TRO1	10302M006	2	69	99:010	00:176	1.45
TRO1	10302M006	3	201	00:177	04:164	3.96
TRO1	10302M006	4	110	04:235	06:308	2.2
TUBI	20806M001	1	123	99:241	02:026	2.41
TUBI	20806M001	2	240	02:027	06:308	4.77
TUBO	11503M001	1	202	01:266	05:358	4.25
TUBO	11503M001	2	43	05:359	06:308	0.86
TUC2	12617M003	1	102	04:298	06:308	2.03
UNPG	12752M001	1	164	99:031	02:145	3.31
UNPG	12752M001	2	188	02:146	06:105	3.89
UNPG	12752M001	3	27	06:120	06:308	0.52
UPAD	12750M002	1	35	97:110	97:354	0.67
UPAD	12750M002	2	194	98:004	01:328	3.89
UZHL	12301M001	1	336	99:206	06:290	7.23
VAAS	10511M001	1	440	97:313	06:308	8.99
VALE	13439M001	1	145	01:042	04:157	3.32
VALE	13439M001	2	92	04:200	06:289	2.24
VARD	10322M002	3	294	00:366	06:308	5.84
VEVE	12741M001	1	155	97:222	01:027	3.47

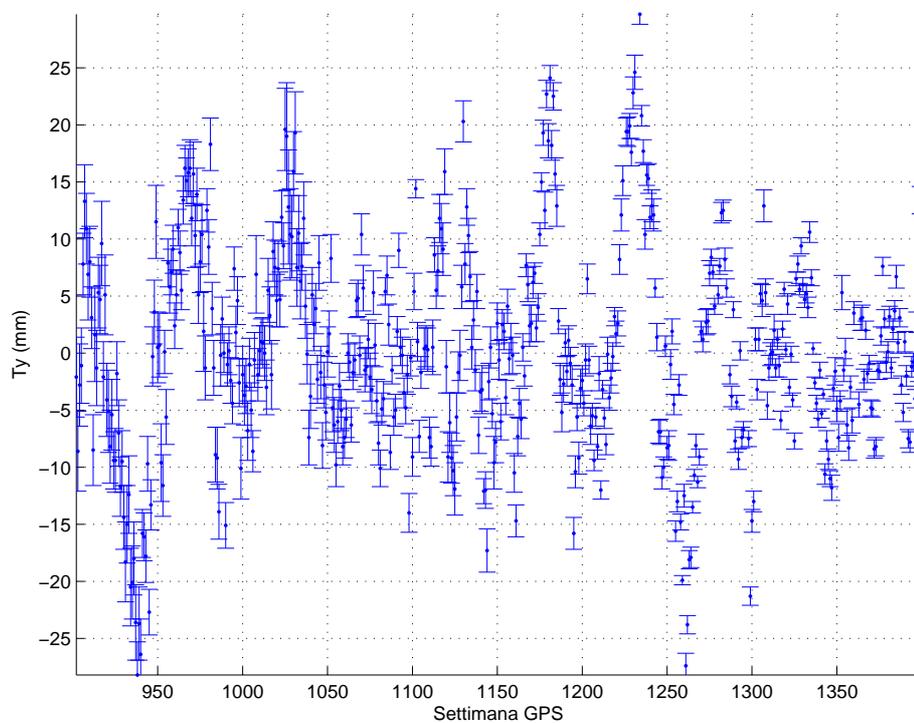
Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
VE NE	12741M001	2	224	01:042	05:302	4.71
VE NE	12741M001	3	52	05:303	06:308	1.01
VI LO	10424M001	1	454	97:110	06:308	9.54
VI LL	13406M001	1	466	97:110	06:294	9.5
VI SO	10423M001	1	475	97:110	06:308	9.54
VL NS	10801M001	1	189	02:314	06:308	3.98
WA RE	13114M001	1	38	97:110	98:017	0.75
WA RE	13114M001	2	245	98:018	03:025	5.02
WA RE	13114M001	3	188	03:026	06:308	3.77
WA RN	14277M002	1	150	03:299	06:308	3.02
WA ROC	12217M001	1	116	97:110	99:191	2.22
WA ROC	12217M001	2	311	00:149	06:224	6.21
WA ROC	12217M001	3	9	06:246	06:308	0.17
WA SRT	13506M005	1	433	98:088	06:308	8.6
WA TZR	14201M010	1	470	97:110	06:308	9.54
YE BE	13420M001	1	299	00:296	06:308	6.03
ZE CK	12351M001	1	183	97:271	01:146	3.66
ZE CK	12351M001	2	165	01:203	04:353	3.41
ZE CK	12351M001	3	50	04:354	06:308	1.87
ZI MM	14001M004	1	80	97:110	98:304	1.53
ZI MM	14001M004	2	405	98:312	06:308	7.99
ZO UF	12763M001	1	127	04:011	06:308	2.81
ZW EN	12330M001	1	238	97:117	03:074	5.88
ZY WI	12220S001	1	139	03:222	06:308	3.24

Parametri di Helmert e WRMS

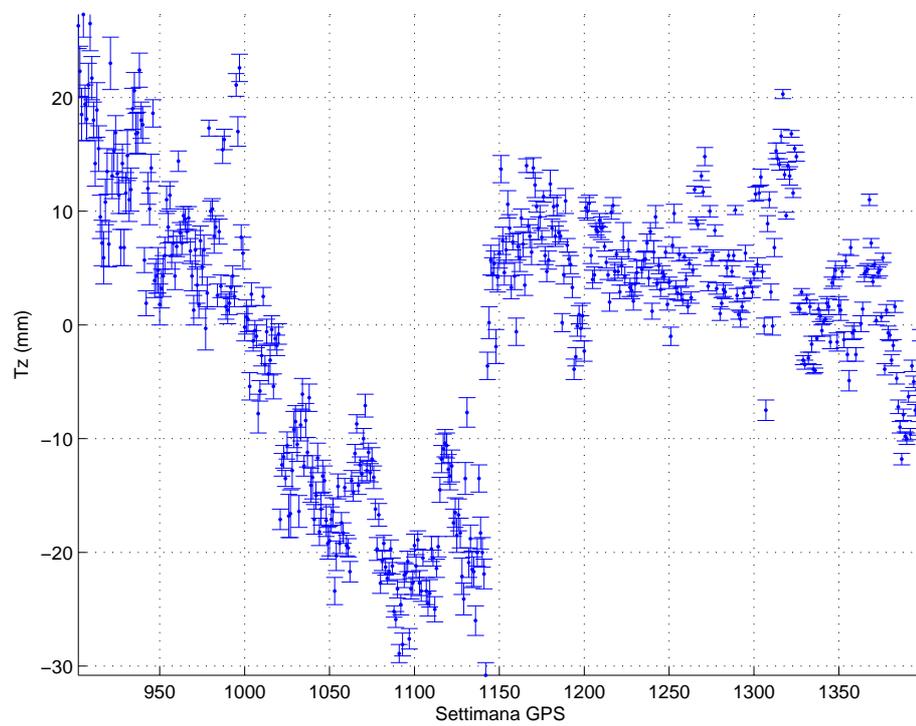
La consistenza delle soluzioni settimanali, in termini di sistema di riferimento, viene descritta dai grafici dei parametri di Helmert. L'analisi dei grafici evidenzia che le soluzioni hanno un livello di consistenza dell'ordine di 2 cm. La serie storica della componente z delle traslazioni rivela una discontinuità alla settimana GPS 1150, dovuta al passaggio da ITRF97 a ITRF00. L'oscillazione del fattore di scala è imputabile ad un bug presente nella subroutine di correzione mareale del software bernese.



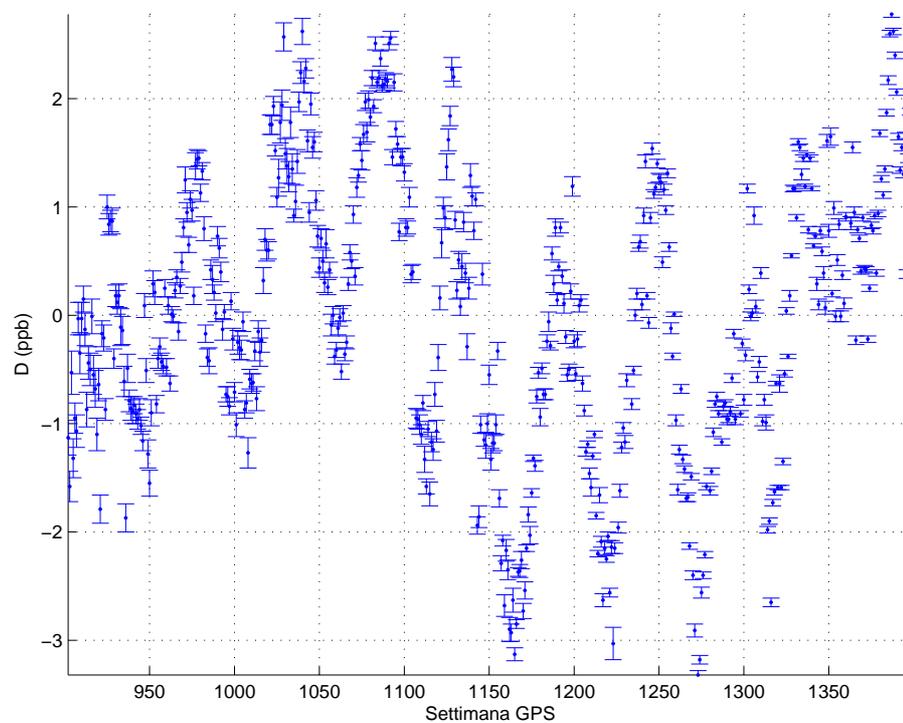
Traslazione lungo la direzione X



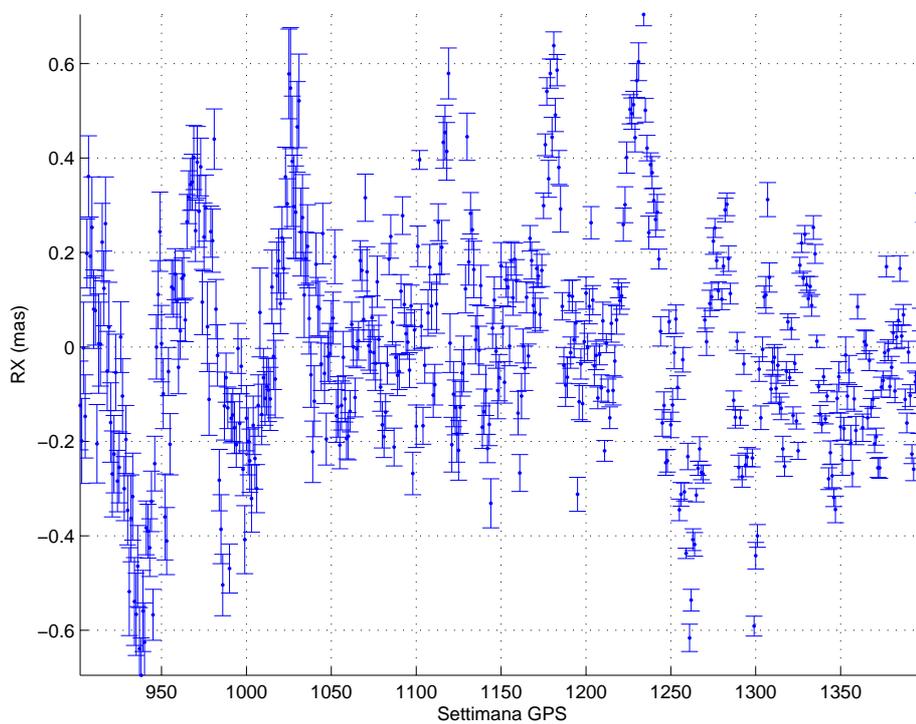
Traslazione lungo la componente Y



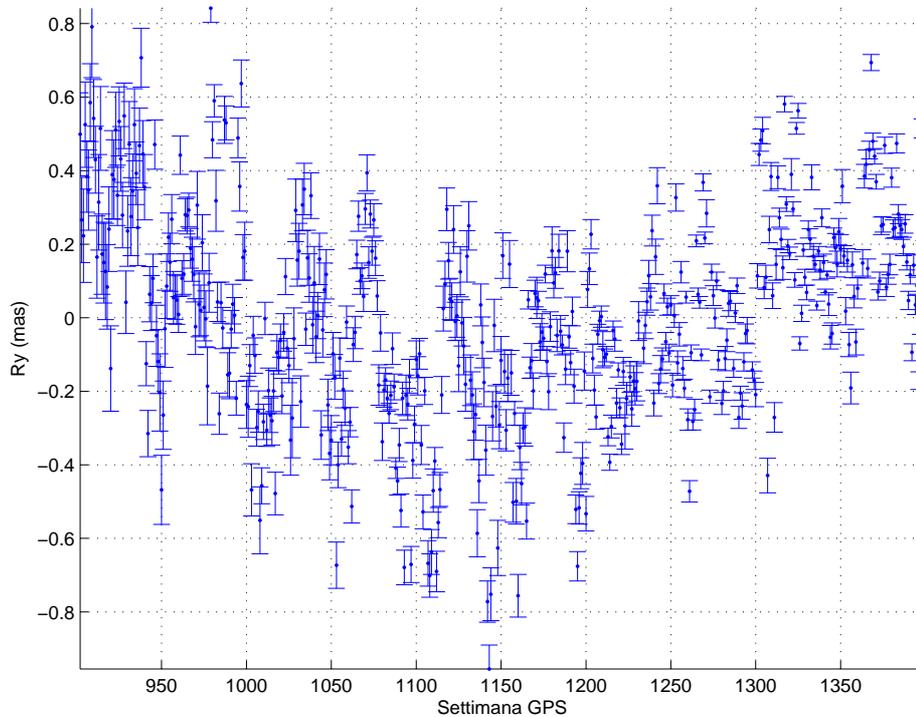
Traslazione lungo la componente Z



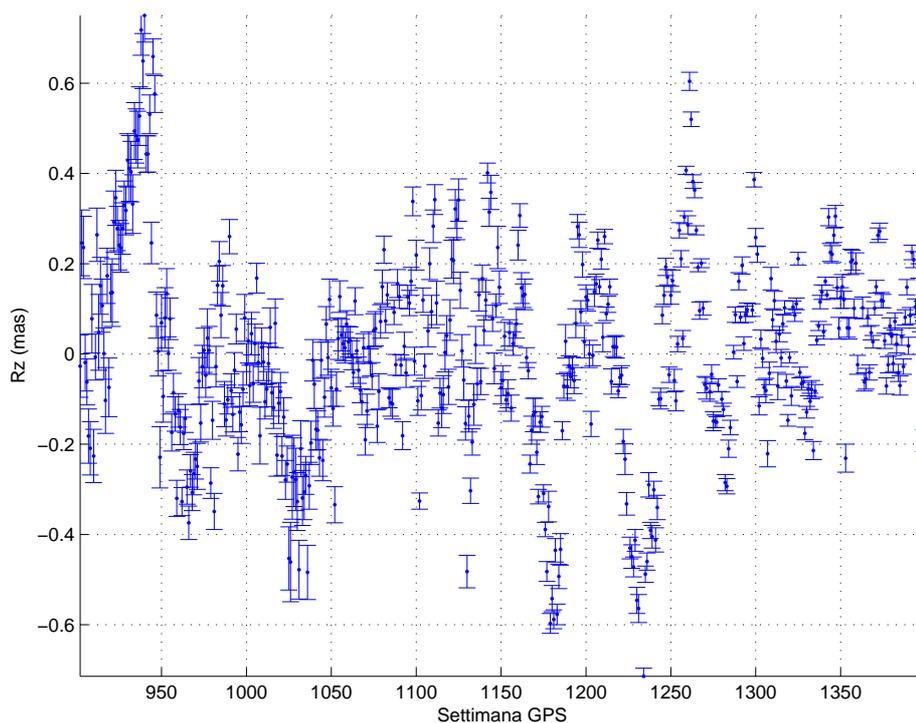
Fattore di scala



Rotazione lungo la direzione X

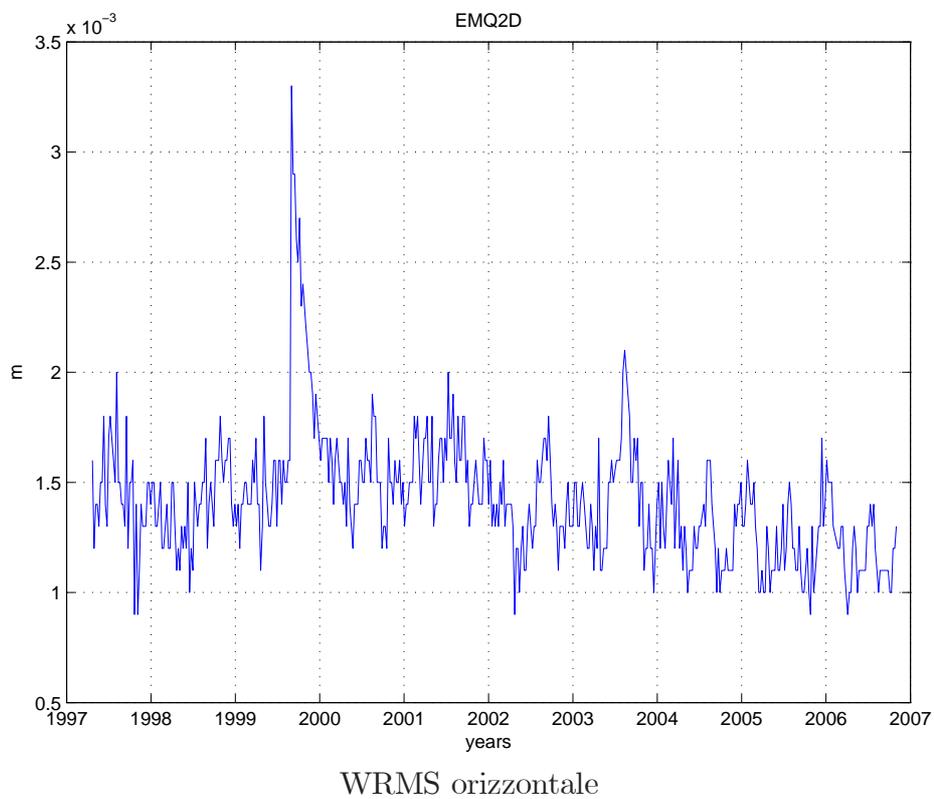
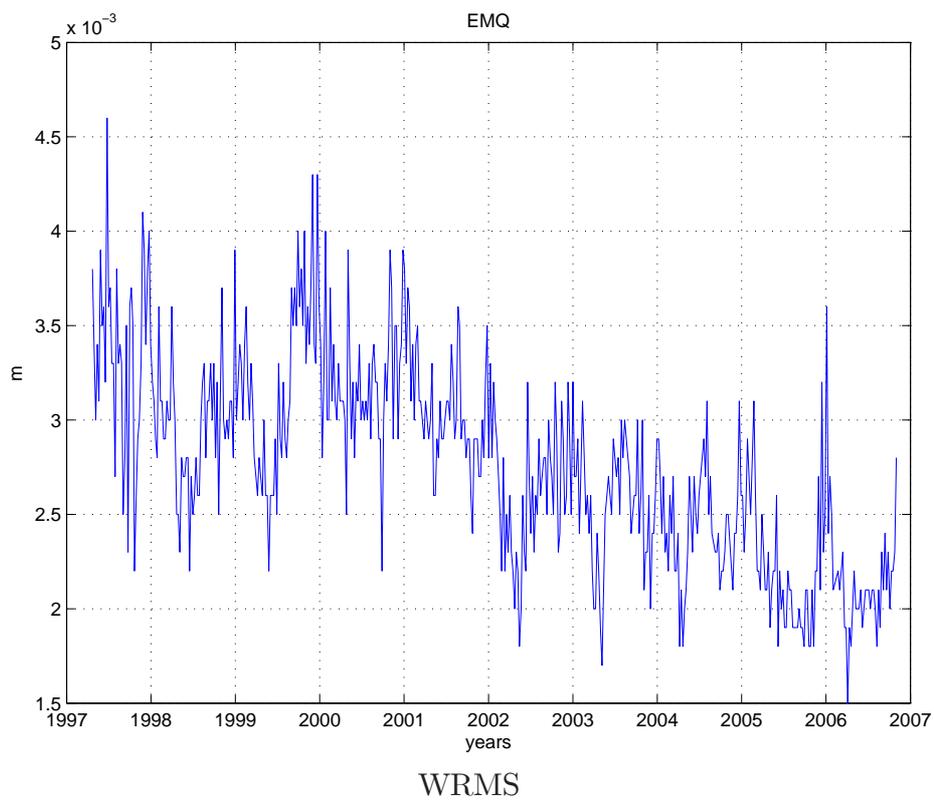


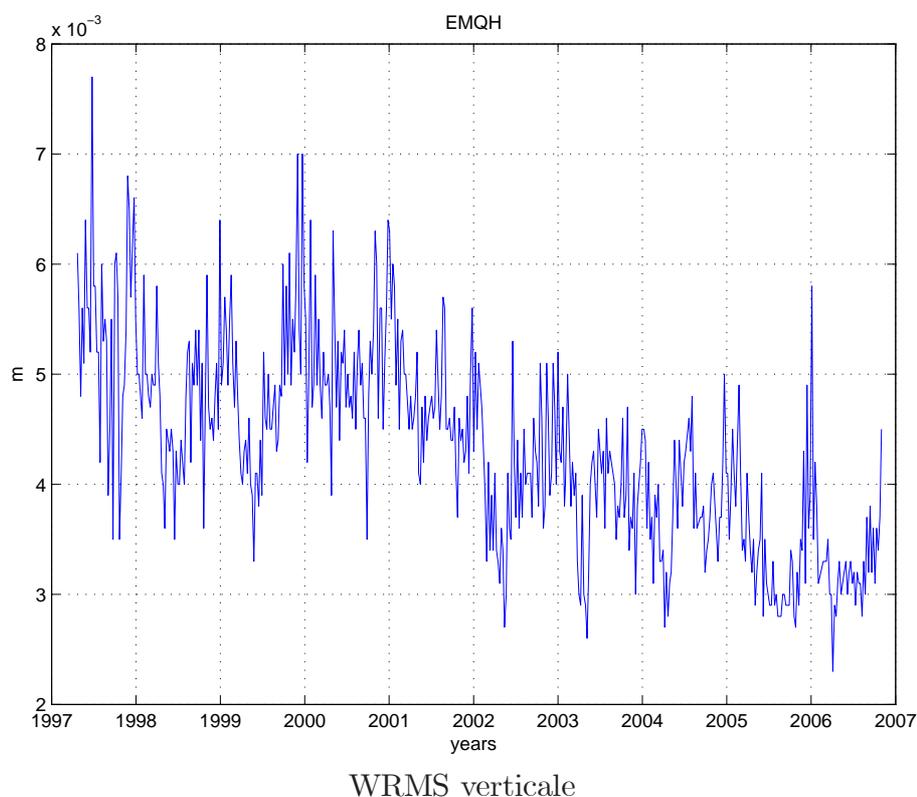
Rotazione lungo la direzione Y



Rotazione lungo la direzione Z

Il WRMS orizzontale post-fit fornisce una misura della presenza di outliers e della correttezza del processo di rimozione dei vincoli. Empiricamente, secondo [48], valori molto bassi del WRMS, al di sotto di 1 cm, sono indicativi del fallimento della rimozione dei vincoli. Nel caso della combinazione preliminare EUREF il WRMS tridimensionale varia tra 3.5 mm e 2 mm. Il WRMS verticale varia tra 5 mm e 3 mm ed è indicativo del fatto che le tecniche GPS forniscono una misura della coordinata verticale meno accurata rispetto a quella delle coordinate orizzontali.





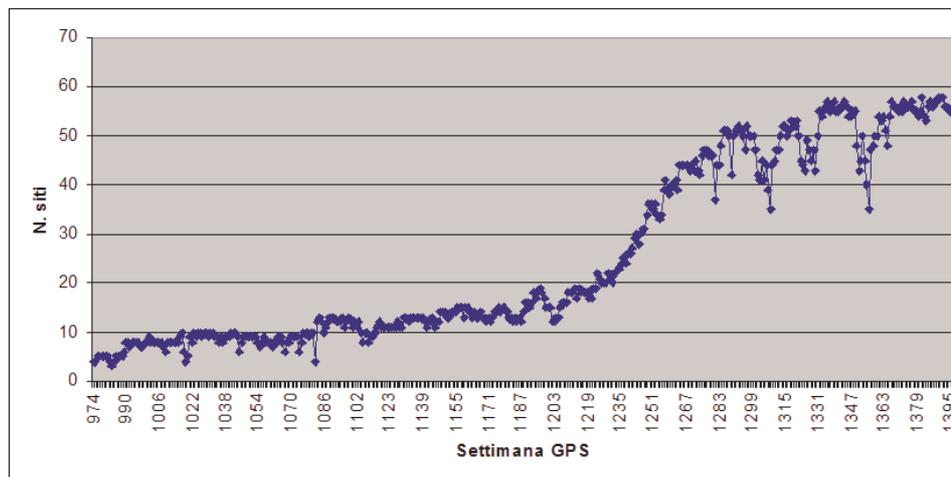
9.3.3 Combinazione preliminare GP

Descrizione generale

La rete GP è disposta su tutto il territorio austriaco. Attualmente è composta a più di 50 siti. L'intervallo temporale su cui si estende è di circa 10 anni, sebbene un incremento del numero di siti si sia verificato solamente dopo la settimana GPS 1235.

Rimozione ed imposizione di nuovi vincoli

I vincoli presenti nelle soluzioni settimanali GP sono di tipo 2), per tutto l'intervallo temporale considerato. I vincoli sono stati rimossi mediante l'eq. (9.1) e sono stati introdotti i minimi vincoli mediante l'eq. (9.2). La soluzione combinata è stata vincolata mediante vincoli interni.



Numero di siti presenti in ogni soluzione settimanale GP

Tabella delle discontinuità e intervalli temporali

Come per la soluzione EUREF, diamo le tabelle che riportano le epoche di discontinuità e numero di soluzioni. il numero di discontinuità rilevate è di circa 110.

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
AMST	88001S001	1	77	05:103	06:287	1.5
ARDE	88002M002	1	117	04:039	06:287	2.68
ASCH	88003S003	1	121	04:088	06:287	2.55
BADT	88004S004	1	115	04:088	06:259	2.47
BLE1	88005M005	1	96	03:208	05:183	1.93
BLE2	88006S006	1	61	05:184	06:287	1.28
BOVE	88008S008	1	69	05:156	06:287	1.36
DAVO	88010M010	1	67	03:348	05:190	1.57
DAVO	88010M010	2	64	05:191	06:287	1.26
DLBG	88012S012	1	85	03:257	05:127	1.64
DLBG	88012S012	2	56	05:198	06:287	1.24
FLDB	88014S014	1	59	05:191	06:287	1.26
FLDK	88015S015	1	78	03:282	05:127	1.58
FLDK	88015S015	2	71	05:156	06:287	1.36

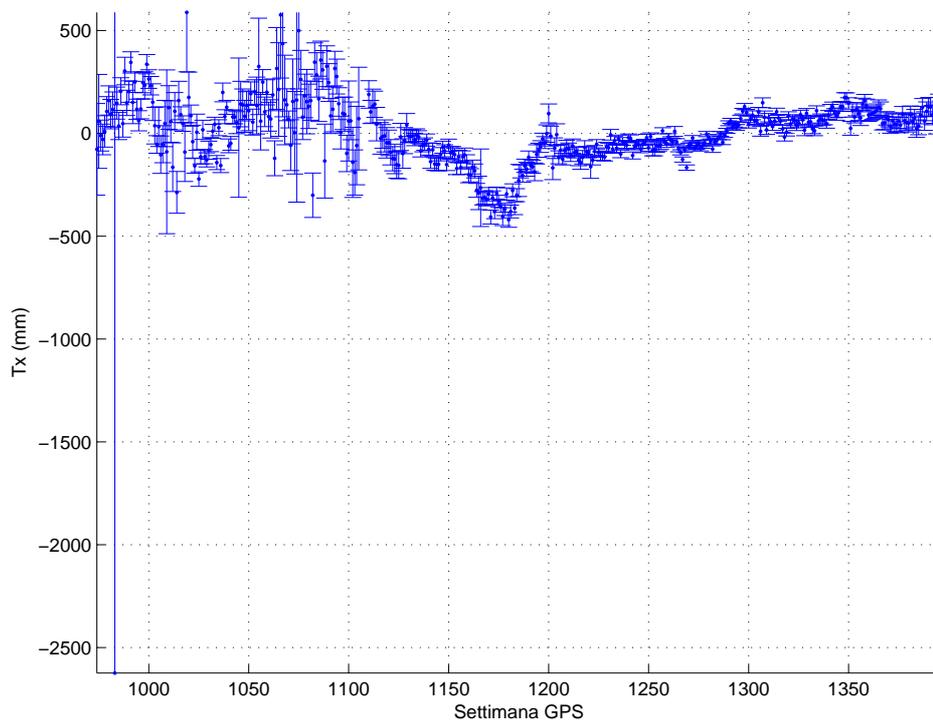
Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
FNST	88016S016	1	31	04:291	05:190	0.72
FNST	88016S016	2	54	05:192	06:287	1.26
FRLG	88017S017	1	74	04:032	05:190	1.43
FRLG	88017S017	2	65	05:191	06:287	1.26
FRST	88018S018	1	71	05:156	06:287	1.36
GMND	88019M019	1	109	03:075	05:134	2.16
GMND	88019M019	2	61	05:205	06:287	1.22
GRAA	88020M020	1	62	98:364	01:059	2.16
GRAB	88021M021	1	309	98:364	05:190	6.52
GRAB	88021M021	2	31	05:192	06:279	1.24
GRAZ	11001M002	1	118	98:252	01:118	2.63
GRAZ	11001M002	2	191	01:154	05:085	3.81
GRAZ	11001M002	3	31	05:086	05:295	0.57
GRAZ	11001M002	4	43	05:317	06:287	0.92
GRMP	88023S023	1	46	04:060	05:022	0.9
GRMP	88023S023	2	85	05:044	06:287	1.67
GUES	11045M001	1	114	03:090	05:190	2.27
GUES	11045M001	2	63	05:191	06:287	1.26
HFLK	11006S003	1	265	98:252	05:302	7.14
HFLK	11006S003	2	51	05:303	06:287	0.96
HKBL	11039S001	1	141	02:195	05:134	2.83
HKBL	11039S001	2	65	05:198	06:287	1.24
KKB1	88076M076	1	78	00:285	02:194	1.75
KLAG	88025S025	1	54	03:208	04:297	1.24
KLAG	88025S025	2	32	04:319	05:183	0.63
KLAG	88025S025	3	58	05:191	06:287	1.26
KOE1	88077M077	1	35	02:286	03:193	0.75
KOE2	88078M078	1	36	03:194	04:150	0.88
KOE2	88078M078	2	46	04:179	05:183	1.01
KOE3	88079M079	1	64	05:184	06:287	1.28
KOP1	88027M027	1	25	04:319	05:127	0.47
KOP1	88027M027	2	65	05:191	06:287	1.26
KOP2	88028S028	1	53	03:300	04:301	1
KRBG	11043S001	1	164	02:045	05:134	3.24
KRBG	11043S001	2	51	05:275	06:287	1.03
KTZB	11038S001	1	35	02:266	04:255	1.97
KTZB	11038S001	2	80	04:277	06:125	1.58
LANK	88030S030	1	22	04:004	04:157	0.42
LANK	88030S030	2	51	04:165	05:183	1.05
LANK	88030S030	3	58	05:191	06:287	1.26
LECH	88031S031	1	82	03:281	05:134	1.6
LECH	88031S031	2	58	05:198	06:287	1.24

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
LEON	88033S033	1	72	03:320	05:183	1.62
LEON	88033S033	2	44	05:191	06:287	1.26
LIES	88035S035	1	71	04:011	05:176	1.45
LIES	88035S035	2	62	05:191	06:287	1.26
LIN1	88075M075	1	18	00:292	01:059	0.36
LIND	88036S036	1	140	03:327	06:287	2.89
LINZ	11033S001	1	55	01:245	02:345	1.27
LINZ	11033S001	2	65	05:179	06:272	1.25
MARI	88040S040	1	44	04:236	05:190	0.87
MARI	88040S040	2	62	05:191	06:287	1.26
MTBG	11030M001	1	141	02:286	05:190	2.74
MTBG	11030M001	2	61	05:191	06:287	1.26
MUEN	88041S041	1	41	04:263	05:183	0.78
MUEN	88041S041	2	58	05:219	06:287	1.19
PASS	88044S044	1	84	03:327	05:190	1.62
PASS	88044S044	2	63	05:191	06:287	1.26
PATK	11029S001	1	328	99:069	06:286	7.59
PENC	11206M006	1	24	02:294	03:116	0.51
PENC	11206M006	2	102	03:152	05:190	2.1
PENC	11206M006	3	57	05:191	06:287	1.26
PFAN	11005S002	1	57	98:252	99:300	1.13
PFAN	11005S002	2	43	99:307	01:066	1.34
PFAN	11005S002	3	262	01:161	06:287	5.35
PFRK	88045S045	1	77	03:348	05:190	1.57
PFRK	88045S045	2	62	05:191	06:287	1.26
RIED	88048M048	1	170	03:173	06:287	3.31
ROHR	88049M049	1	111	03:075	05:127	2.14
ROHR	88049M049	2	62	05:198	06:287	1.24
ROSE	88050S050	1	126	04:088	06:287	2.55
RTMN	99050M050	1	299	99:356	06:287	6.81
SARG	88051M051	1	150	03:243	06:287	3.12
SBGZ	11031S001	1	294	98:357	06:187	7.53
SBGZ	11031S001	2	12	06:204	06:287	0.23
SONN	88064S064	1	75	04:004	05:183	1.49
SONN	88064S064	2	64	05:191	06:287	1.26
STGA	88065M065	1	144	03:327	06:287	2.89
STPO	11041S001	1	167	99:139	02:313	3.48
STPO	11041S001	2	205	02:314	06:287	3.93
TRE1	88067S067	1	76	04:004	05:183	1.49
TRE2	88068S068	1	61	05:184	06:287	1.28
TRFB	11047M001	1	106	04:109	06:287	2.49
VIL1	88080M080	1	99	98:266	00:362	2.26

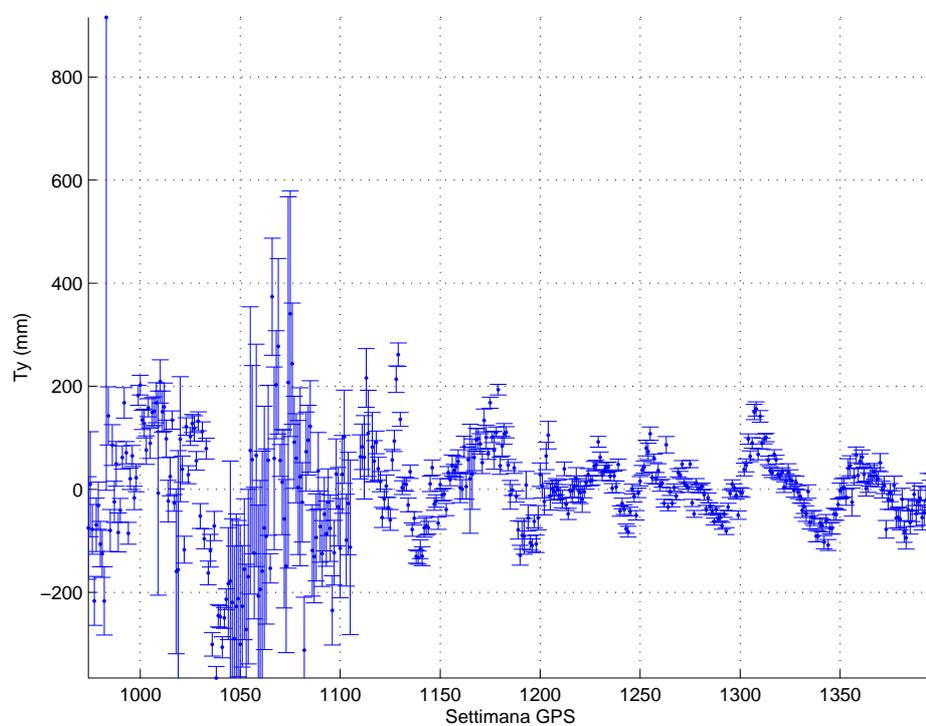
Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
VLCH	11036S001	1	202	01:003	05:190	4.51
VLCH	11036S001	2	66	05:191	06:287	1.26
VLKM	11040S001	1	228	01:105	05:281	4.48
VLKM	11040S001	2	36	06:036	06:287	0.69
WELS	11044S001	1	245	02:006	06:287	4.77
WIEB	88069M069	1	55	05:100	06:287	1.51
WIEN	11035S001	1	195	98:252	02:292	4.11
WIEN	11035S001	2	205	02:300	06:287	3.96
WIND	88070S070	1	47	04:228	05:190	0.9
WIND	88070S070	2	66	05:191	06:287	1.26
WRTH	88071S071	1	112	04:032	06:154	2.33
WRTH	88071S071	2	15	06:183	06:287	0.28
WTZR	14201M010	1	134	02:293	05:190	2.72
WTZR	14201M010	2	56	05:191	06:287	1.26
ZIMM	14001M004	3	197	02:293	06:287	3.98

Parametri di Helmert e wrms

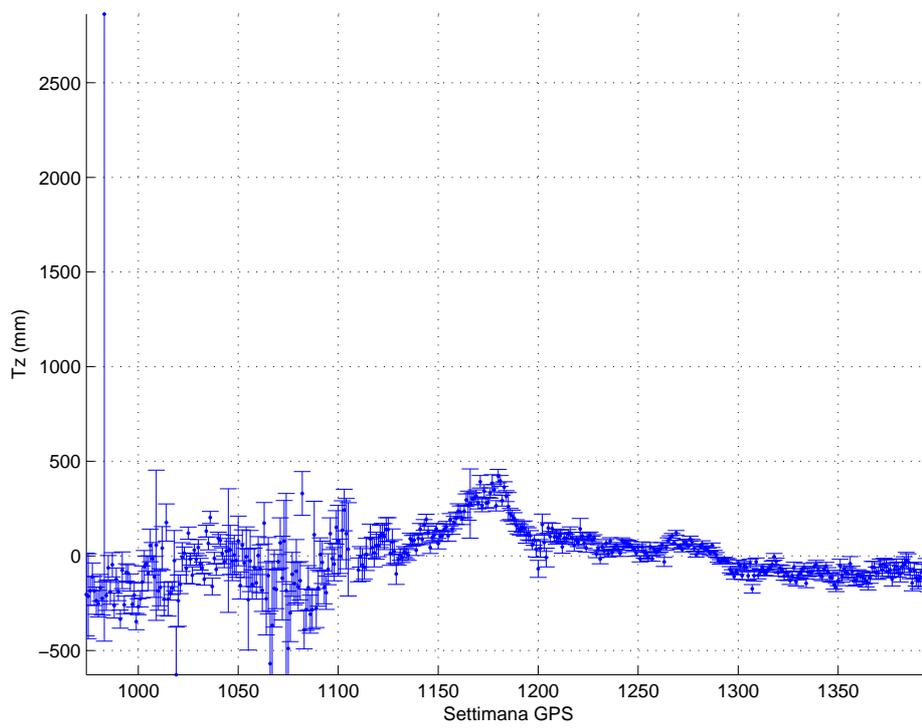
L'analisi dei parametri di Helmert dimostra la scarsa consistenza delle soluzioni individuali. Soprattutto per le settimane antecedenti alla settimana 1100. Non è stato possibile individuare le ragioni di questo comportamento, anche se le poche stazioni processate suggeriscono che le equazioni normali settimanali siano state vincolate utilizzando pochi siti.



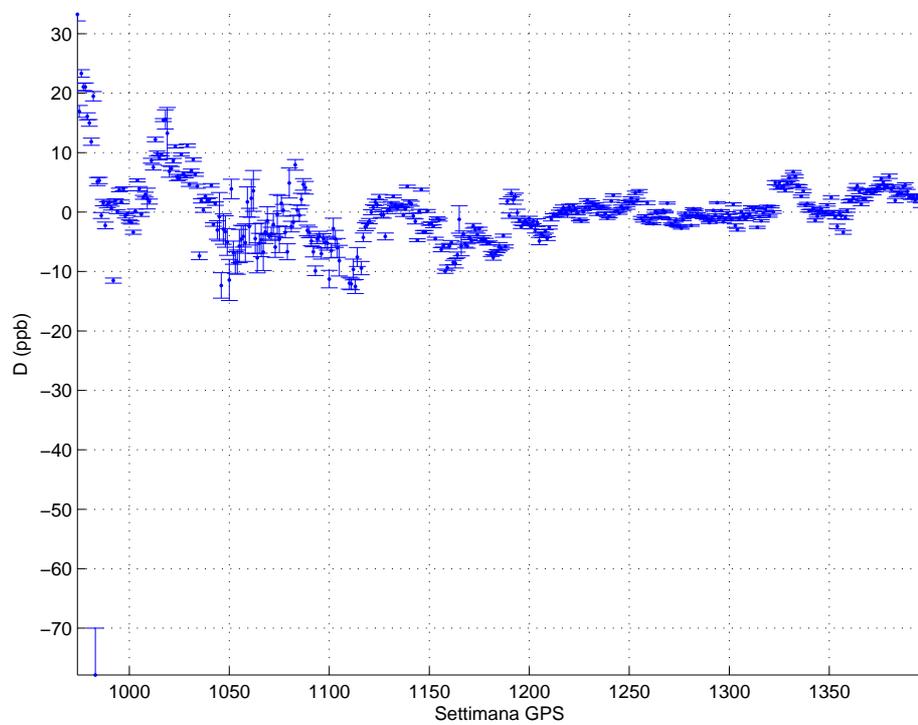
Traslazione lungo la direzione X



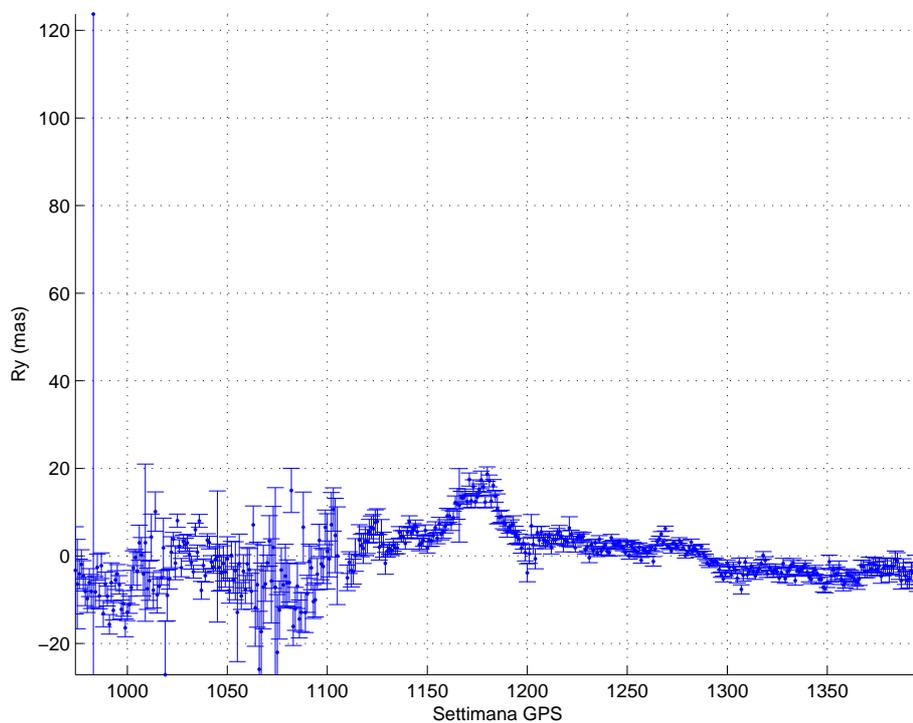
Traslazione lungo la direzione Y



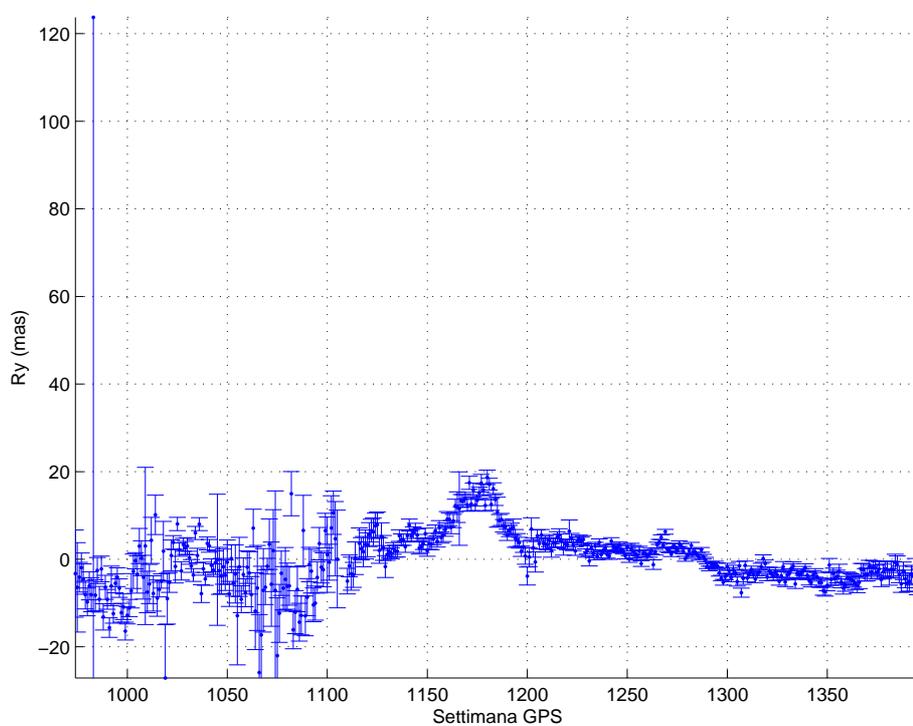
Traslazione lungo la direzione Z



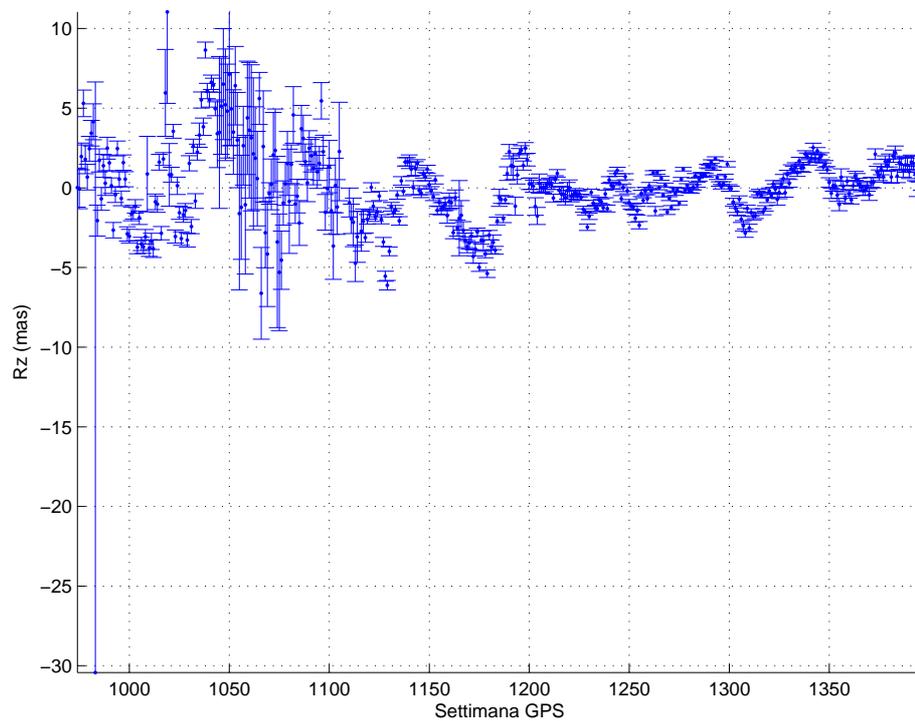
Fattore di scala



Rotazione lungo la direzione X

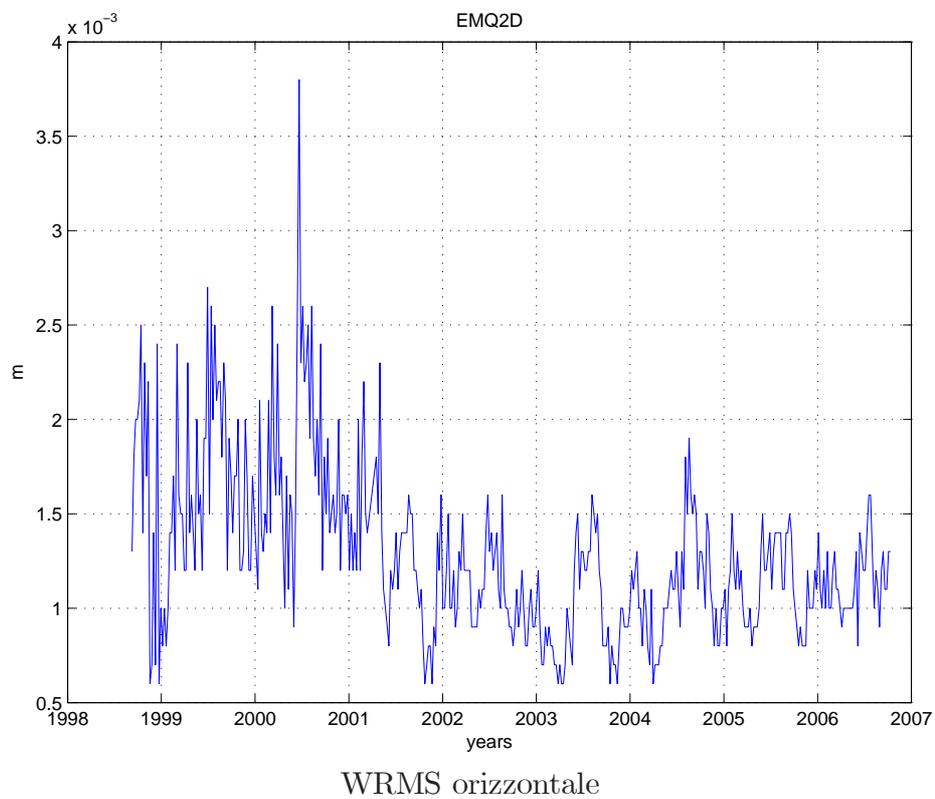
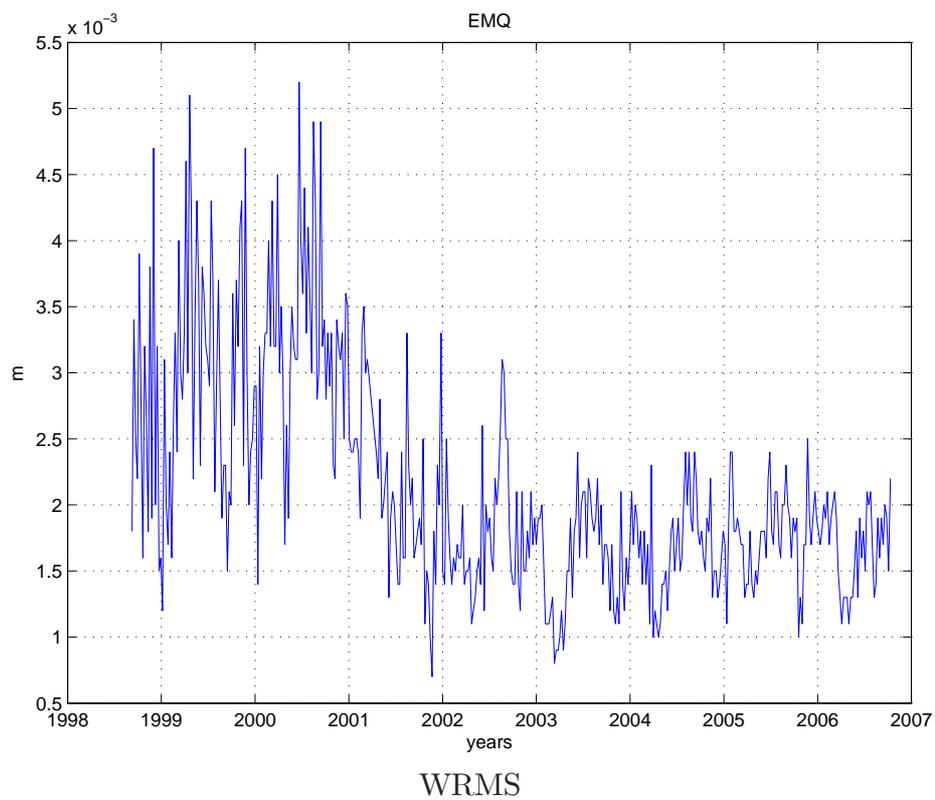


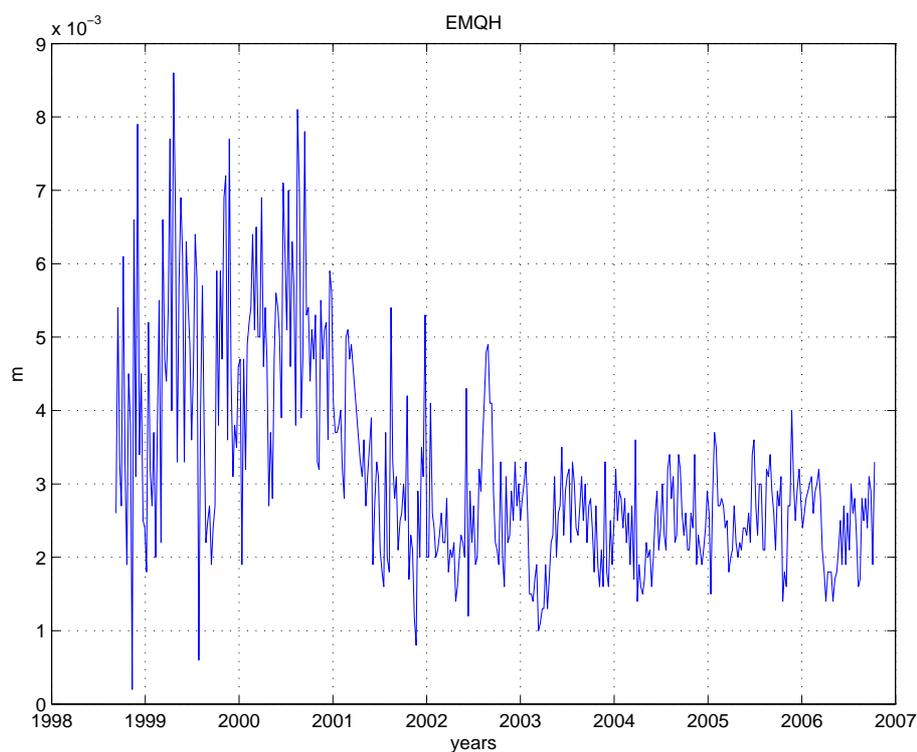
Rotazione lungo la direzione Y



Rotazione lungo la direzione Z

Il WRMS è in linea con i risultati ottenuti per lo stacking preliminare delle equazioni EUREF. La rimozione dei vincoli è stata eseguita correttamente, e tutti gli outliers presenti all'interno dei sistemi di eq. normali sono stati eliminati, in linea con la procedura descritta in precedenza.





WRMS verticale

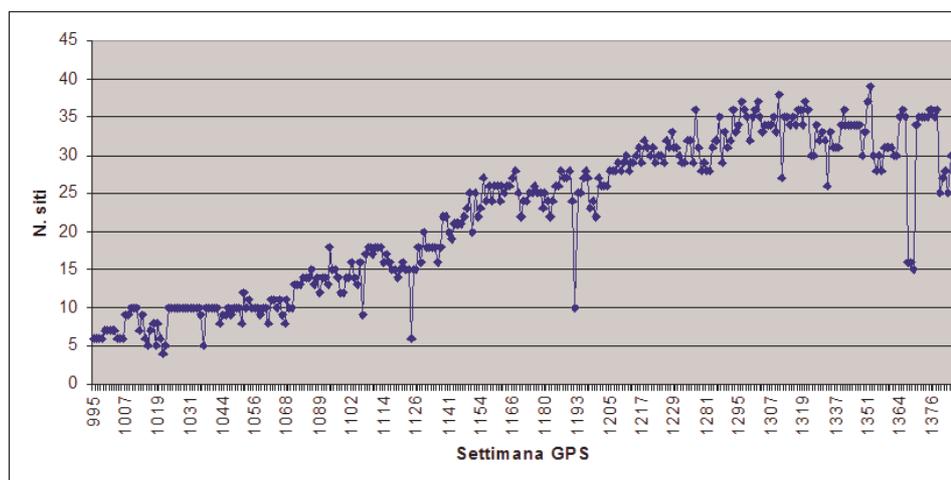
9.3.4 Combinazione preliminare UPA

Descrizione generale

Le soluzioni UPA descrivono una rete disposta sul territorio italiano, con una maggior densità di stazioni nelle regioni settentrionali. Nell'intervallo temporale considerato in numero delle siti è aumentato fino a 35. Il numero di siti tra soluzioni vicine varia molto, e questo fatto porta a supporre che le soluzioni settimanali siano caratterizzate da una scarsa consistenza, in termini di sistema di riferimento comune. E' plausibile supporre che, soprattutto nella prima metà dell'intervallo temporale di interesse, pochi siti siano stati usati per vincolare i sistemi di equazioni normali.

Rimozione ed imposizione di nuovi vincoli

La strategia di processing di UPA è identica a quella di EUREF, ne segue che i sistemi di eq. normali antecedenti alla settimana. L'epoca alla quale è cambiato il tipo di vincoli (dal tipo 2) ai minimi vincoli) è la settimana 1328. La strategia di rimozione dei vincoli e di imposizione dei minimi vincoli è identica a quella descritta per le eq. normali EUREF.



Numero di siti per ogni soluzione settimanale UPA

Discontinuità e intervallo temporale

Anche per la soluzione UPA riportiamo in tabella le epoche corrispondenti alle discontinuità e l'intervallo temporale. Il numero di discontinuità individuate è circa 70.

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
ACOM	12767M001	1	79	03:306	06:308	3.01
AFAL	12766M001	1	73	03:306	06:308	3.01
AQUI	12757M001	1	107	00:352	03:256	2.74
AQUI	12757M001	2	92	03:257	06:308	3.14
BRAS	99004M004	1	118	03:047	06:308	3.72
BRIX	12762M001	1	98	03:040	06:140	3.27
BZRG	12751M001	1	15	99:115	00:337	1.61
BZRG	12751M001	2	167	00:338	06:308	5.92
CAGL	12725M003	1	101	99:115	01:202	2.24
CAGL	12725M003	2	190	01:210	06:161	4.87
CAME	12754M001	1	26	00:135	01:020	0.68
CAME	12754M001	2	163	01:070	06:308	5.65
CAVA	99009M009	1	19	02:034	02:187	0.42
CAVA	99009M009	2	103	02:188	05:248	3.16
COMO	12761M001	1	63	02:132	03:256	1.34
COMO	12761M001	2	51	04:293	05:345	1.14
COMO	12761M001	3	11	06:078	06:308	0.63

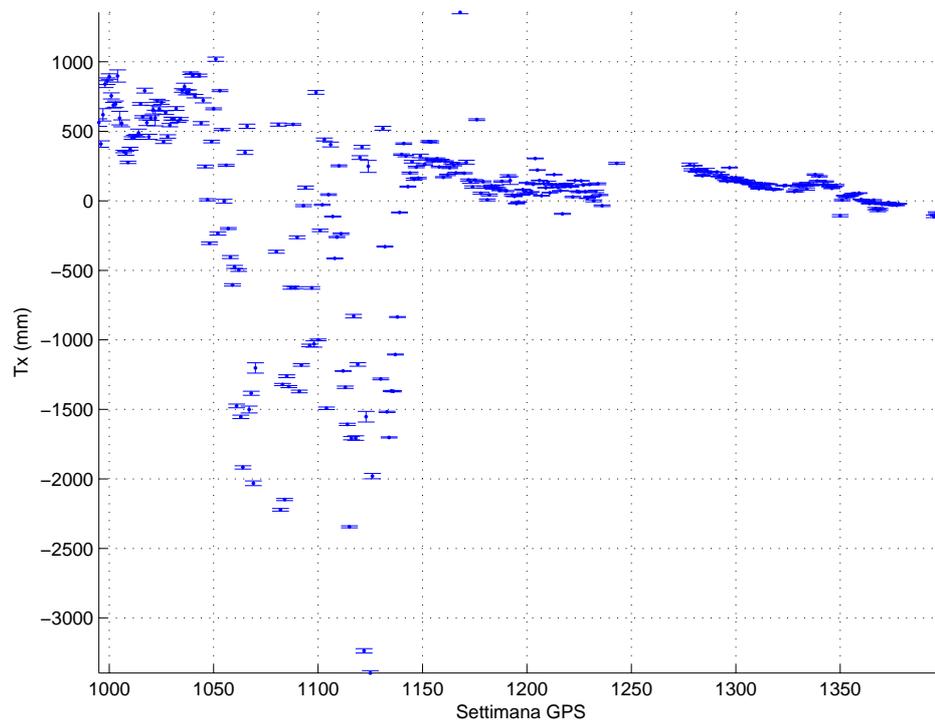
Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
COSE	99011M011	1	56	99:059	02:096	3.1
ELBA	12721M002	1	107	00:352	03:095	2.3
ELBA	12721M002	2	110	03:097	06:308	3.58
GENO	12712M002	1	306	99:031	06:156	7.34
HFLK	11006S003	1	69	99:031	05:302	6.74
HFLK	11006S003	2	35	05:303	06:308	1.01
INGR	99025M025	1	132	02:034	06:161	4.35
LAMP	12706M002	1	284	99:115	06:308	7.53
LEC1	12768M001	1	78	03:201	06:308	3.29
LINZ	11033S001	1	37	01:210	06:308	5.27
MATE	12734M008	1	19	99:031	99:163	0.36
MATE	12734M008	2	233	99:164	06:308	7.39
MDEA	12765M001	1	53	03:306	06:308	3.01
MEDI	12711M003	1	81	99:122	01:069	1.85
MEDI	12711M003	2	199	01:070	06:308	5.65
MERA	99033M033	1	21	00:177	01:132	0.88
MERA	99033M033	2	66	01:308	05:179	3.65
MILO	12758M001	1	130	02:321	06:308	3.96
MOCA	12753M001	1	146	99:227	04:314	5.24
MPRA	12764M001	1	13	03:306	04:311	1.01
MPRA	12764M001	2	23	04:312	05:113	0.45
MPRA	12764M001	3	28	05:135	06:308	1.47
NOT1	12717M004	1	49	02:363	06:308	3.85
NOVA	12759M001	1	207	00:177	06:308	6.36
PADO	12750S001	1	42	01:336	03:011	1.11
PADO	12750S001	2	125	03:012	06:308	3.81
PATK	11029S001	1	59	01:252	03:109	1.61
PATK	11029S001	2	76	03:112	06:308	3.54
PAVI	99045M045	1	59	01:196	03:118	1.79
PAVI	99045M045	2	54	03:208	05:256	2.13
PAVI	99045M045	3	24	05:331	06:302	0.92
PRAT	12760M001	1	263	99:346	06:307	6.89
RTMN	99050M050	1	123	01:245	06:308	5.17
SBGZ	11031S001	1	100	99:031	06:160	7.35
SFEL	99053M053	1	19	02:034	02:187	0.42
SFEL	99053M053	2	100	02:195	05:189	2.98
STPO	11041S001	1	39	01:245	02:172	0.8
STPO	11041S001	2	151	02:174	06:308	4.37
TGRC	99061M061	1	47	00:261	01:265	1.01
TGRC	99061M061	2	146	01:273	06:055	4.4
TITO	99062M062	1	120	02:083	06:161	4.21

Sito	Domes Code	Sol.	N. sol.	Inizio	Fine	Int.
TORI	12724M002	1	306	99:031	06:308	7.76
TRIE	12718M003	1	77	03:306	06:308	3.01
UNPG	12752M001	1	47	00:016	02:138	2.33
UNPG	12752M001	2	141	02:139	06:091	3.87
UPAD	12750M002	1	67	99:031	00:162	1.36
UPAD	12750M002	2	60	00:163	01:328	1.45
VEVE	12741M001	1	35	01:042	01:349	0.84
VEVE	12741M001	2	77	01:350	06:161	4.48
VILH	99069M069	1	248	99:115	06:308	7.53
VLUC	99070M070	1	58	02:013	04:338	2.89
VLUC	99070M070	2	37	05:087	06:307	1.6
VOLT	99071M071	1	16	02:034	02:187	0.42
VOLT	99071M071	2	55	02:188	03:256	1.19
VOLT	99071M071	3	45	03:257	05:189	1.81
WIEN	11035S001	1	40	01:245	02:313	1.19
WIEN	11035S001	2	128	02:328	06:308	3.95
ZOUF	12763M001	1	105	03:075	06:161	3.24

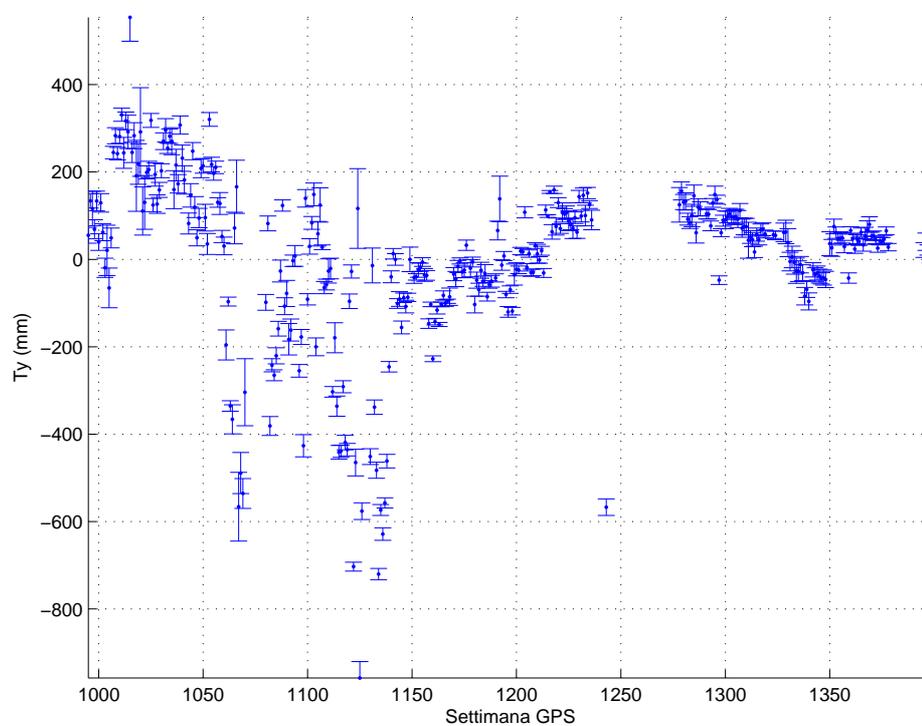
Parametri di Helmert e WRMS

L'analisi delle serie storiche dei parametri di Helmert rivela la scarsa consistenza delle soluzioni settimanali. Osserviamo che i risultati peggiori si ottengono tra le settimane 1040 e le settimane 1050. Osserviamo anche la presenza di un gap nei dati, dovuto a due cause:

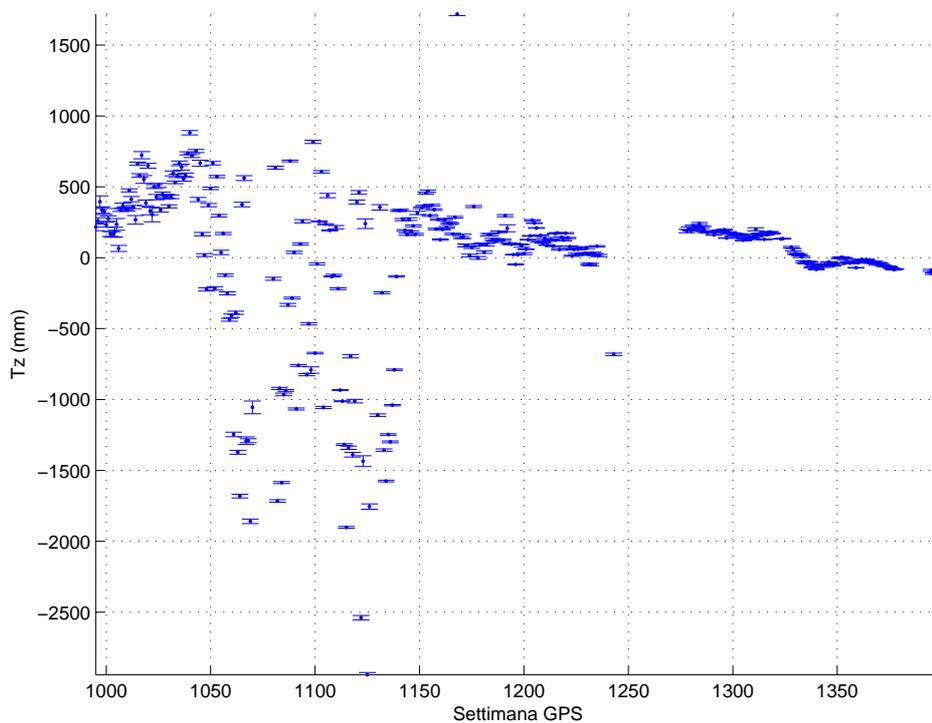
1. Perdita di dati dovuta a rottura del supporto di memorizzazione.
2. Eliminazione di alcuni sinex che mandavano in crash il software di elaborazione.



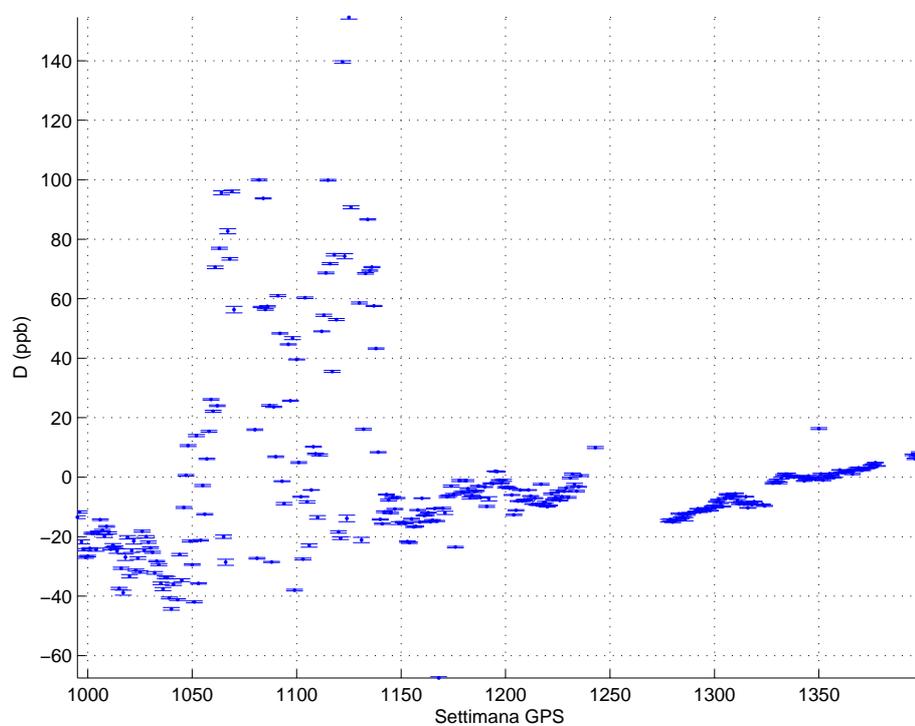
Traslazione lungo la direzione X



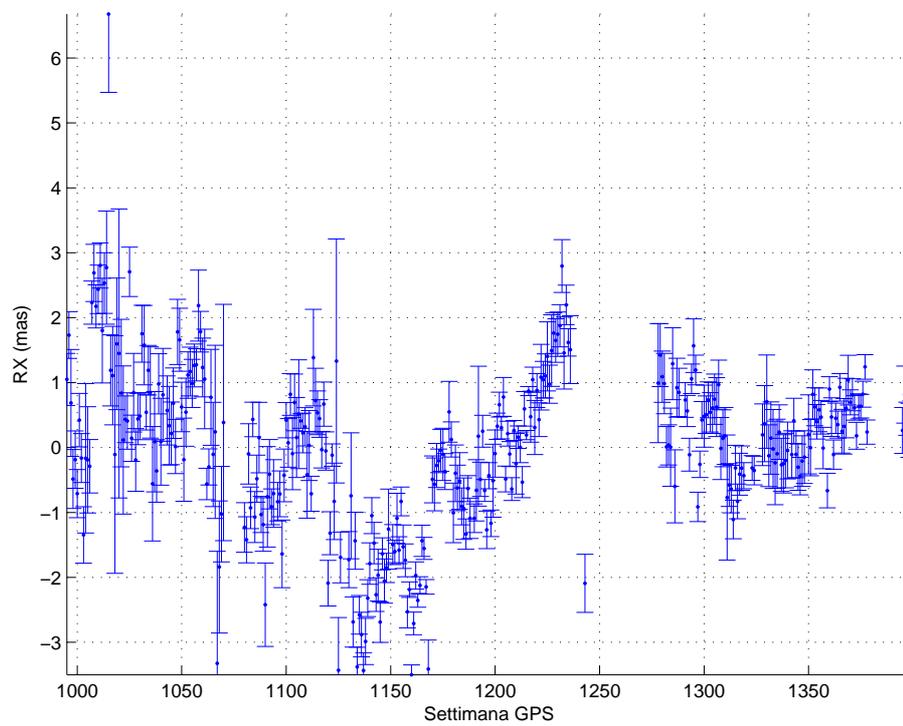
Traslazione lungo la direzione Y



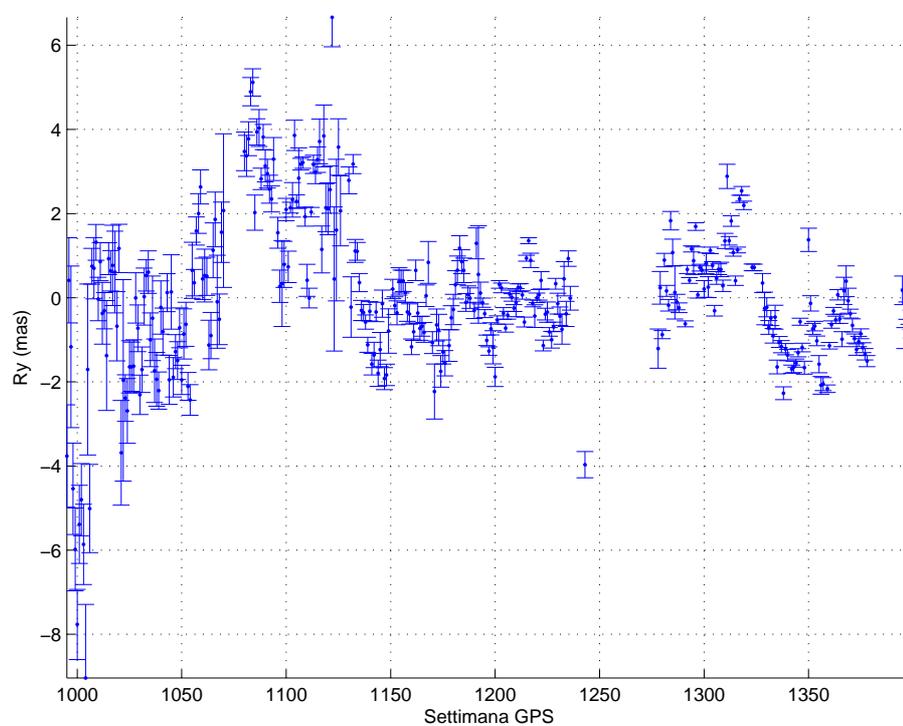
Traslazione lungo la direzione Z



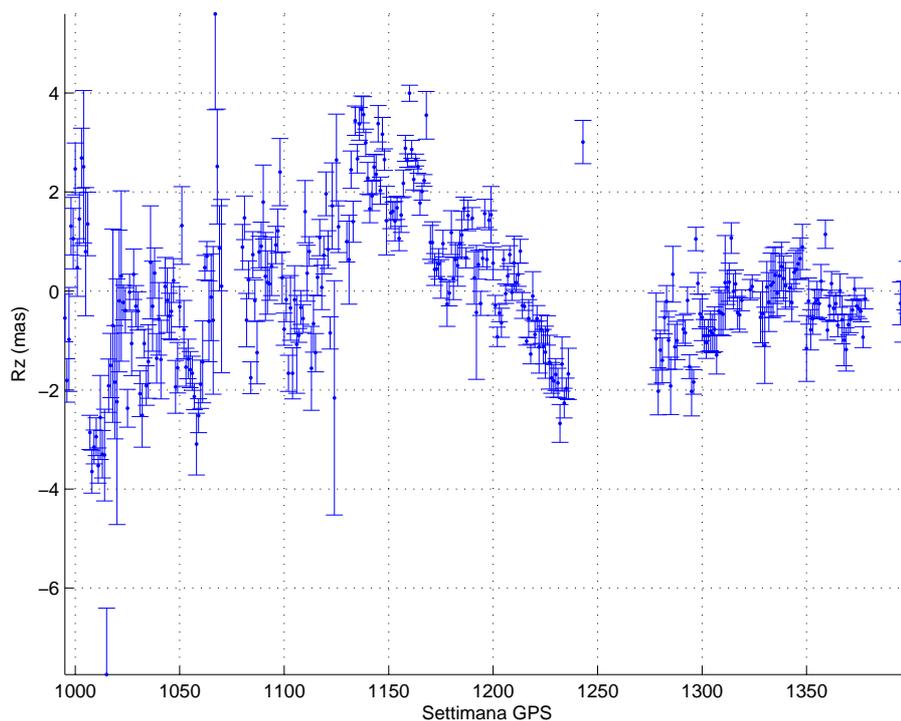
Fattore di scala



Rotazione lungo la direzione X

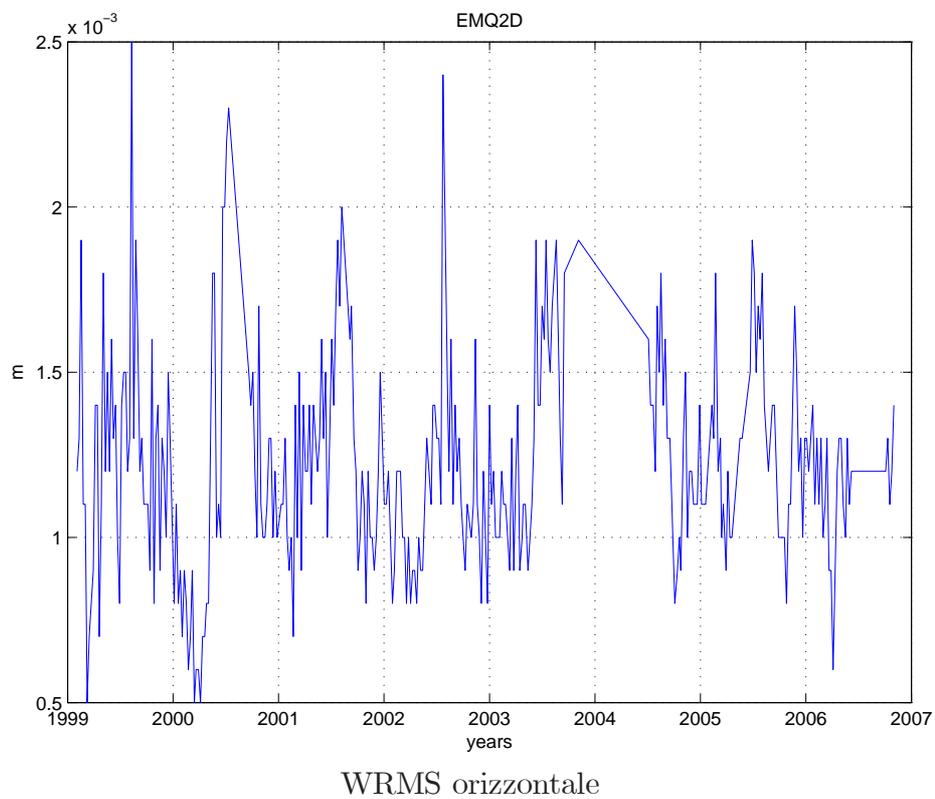
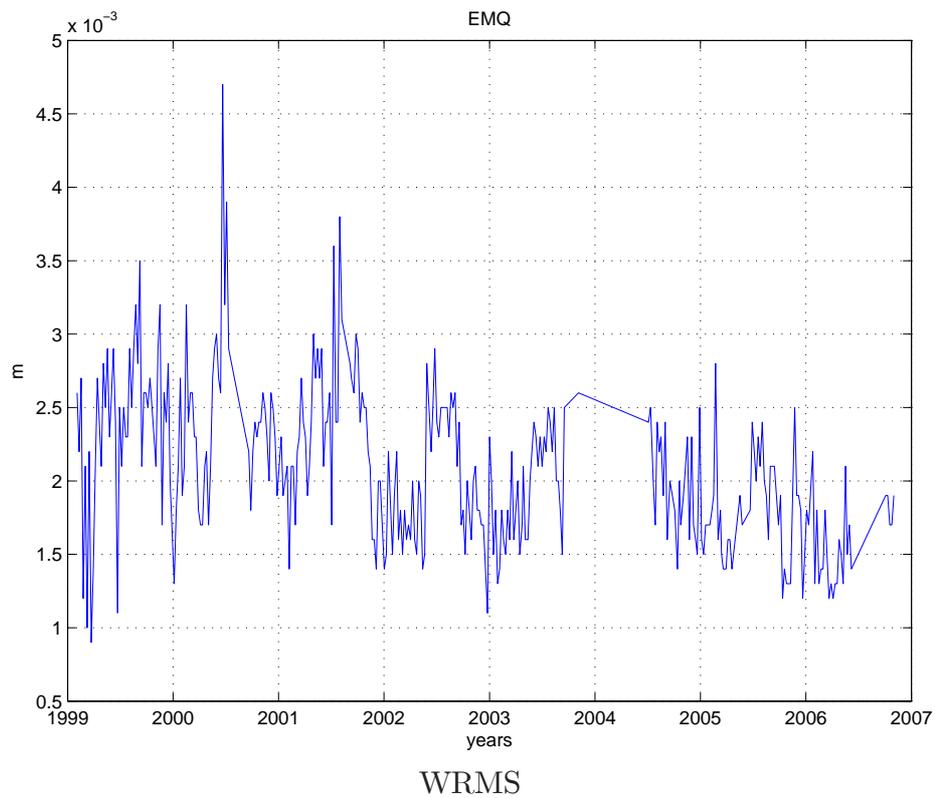


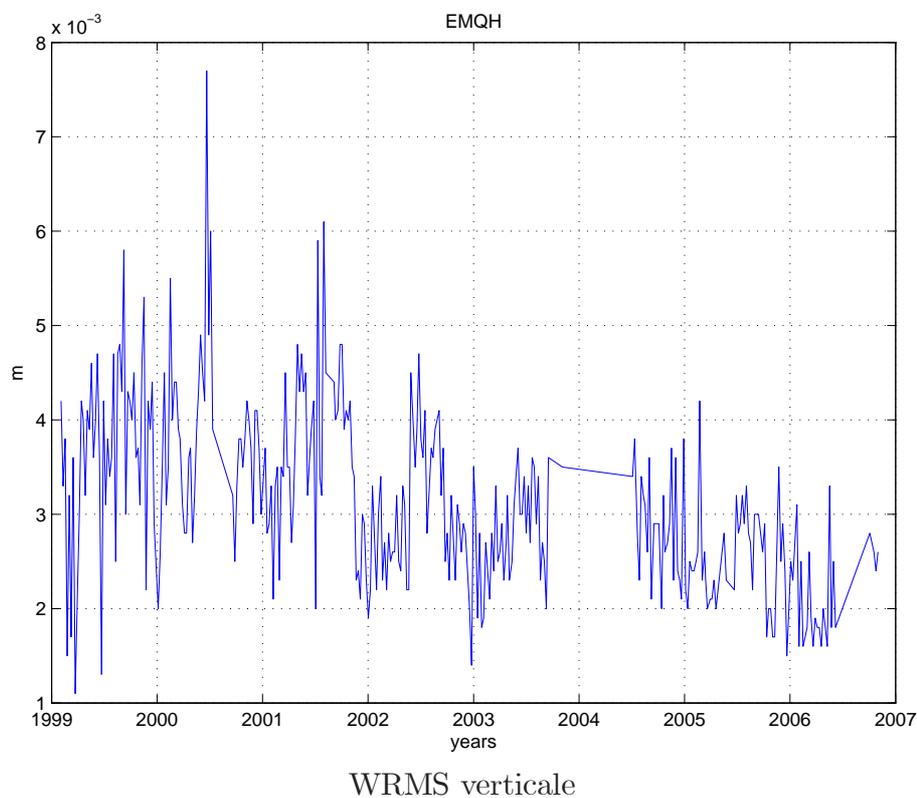
Rotazione lungo la direzione Y



Rotazione lungo la direzione Z

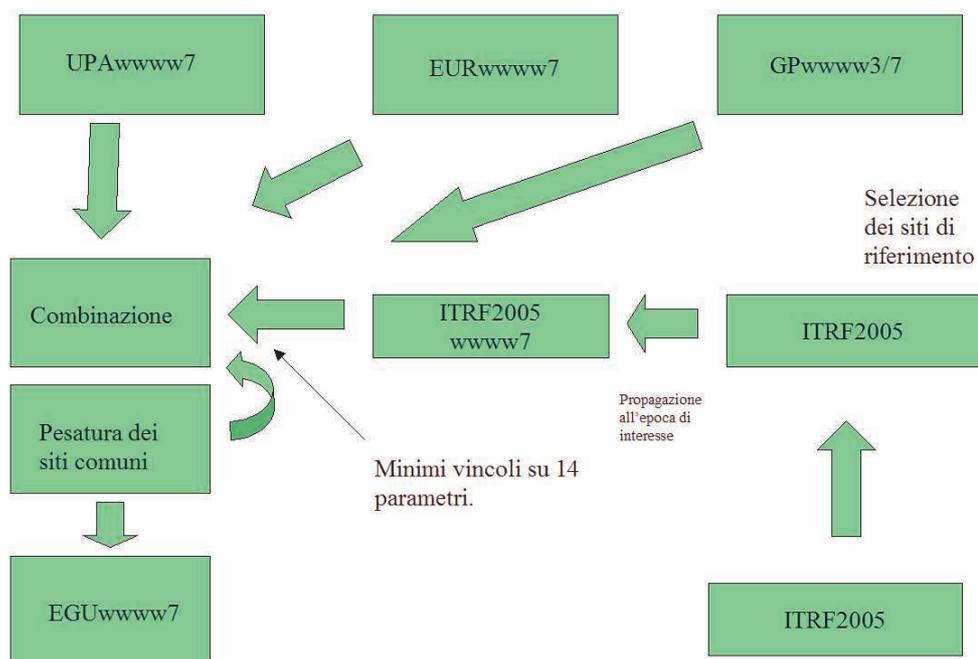
Osserviamo che i WRMS delle soluzioni UPA sono confrontabili con quelli delle soluzioni precedenti. Questo rafforza il sospetto che, nella prima metà dell'intervallo temporale di interesse, pochi siti siano stati utilizzati per definire il sistema di riferimento.





9.3.5 Soluzioni settimanali combinate

Per ogni settimana i sistemi di equazioni normali EUREF, UPA e GP vengono vincolati ai valori delle stazioni IGS presenti nel file ITRF05_TRF.SNX, propagati all'epoca di interesse. I siti che vengono vincolati corrispondono all'intersezione tra l'insieme dei siti IGS e l'insieme unione degli insiemi dei siti EUREF, UPA e GP. Il risultato sono le soluzioni settimanali EGU.



Schema per la combinazione delle soluzioni settimanali EUREF, GP e UPA

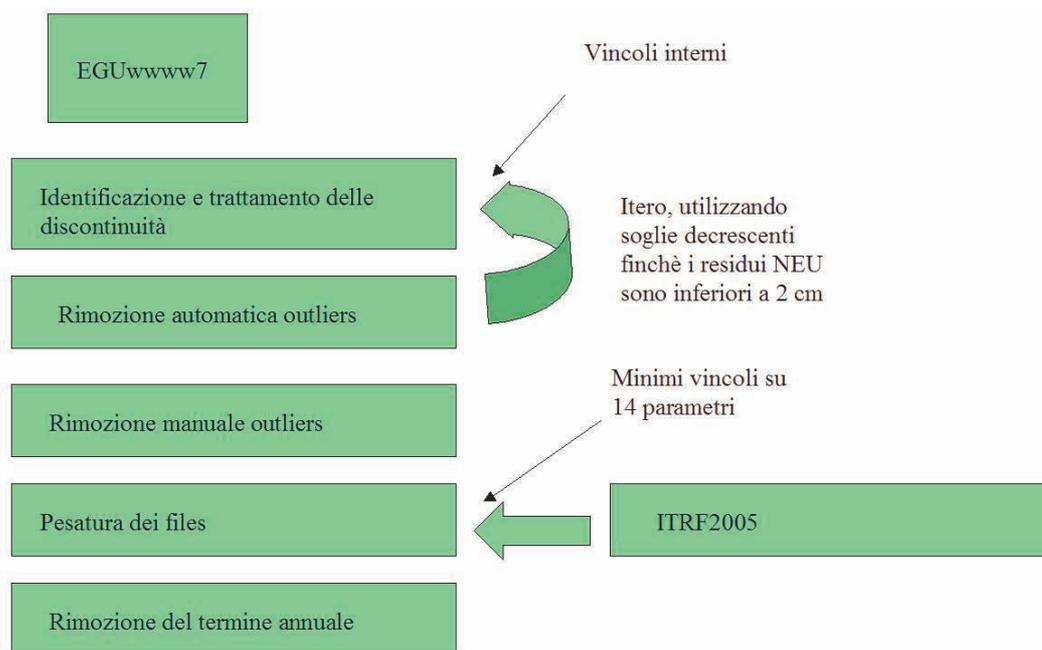
9.4 Soluzione multianno definitiva

9.4.1 Realizzazione del sistema di riferimento

Infine le soluzioni settimanali EGU sono state combinando utilizzando applicando i minimi vincoli (14 parametri) sul seguente insieme di siti:

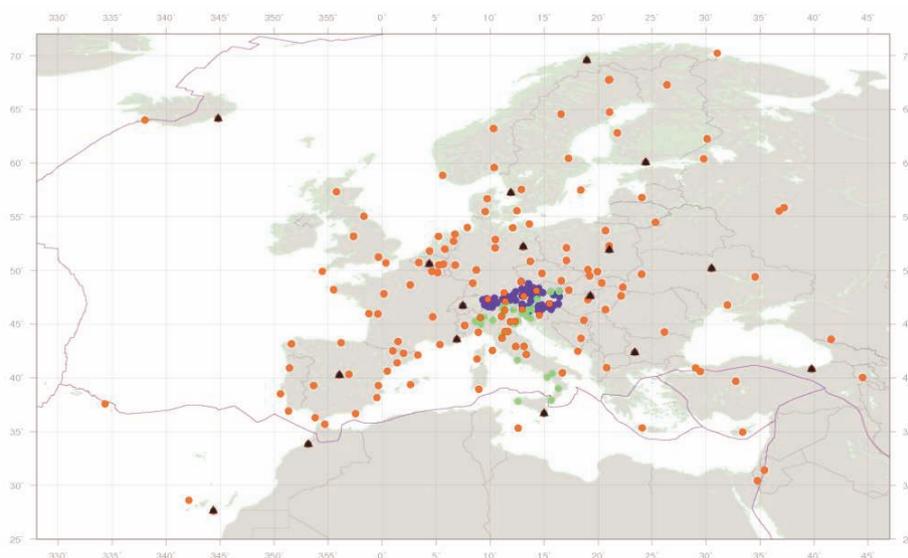
BRUS A 13101M004	JOZE A 12204M001	POTS A 14106M003	TRAB A 20808M001
GLSV A 12356M001	MAS1 A 31303M002	ZIMM A 14001M004	TRO1 A 10302M006
GRAS A 10002M006	METS A 10503S011	RABT A 35001M002	VILL A 13406M001
HOFN A 10204M002	NOT1 A 12717M004		

I siti corrispondono alle stazioni utilizzate per definire il sistema di riferimento nella soluzione EPN (vedi [48]). All'iterazione 0 sono stati introdotte le discontinuità, nelle iterazioni successive sono stati eliminati automaticamente gli outliers. Come per le singole soluzioni preliminari multianno si è partiti dal valore di soglia di 1 metro e ad ogni iterazione tale valore è stato ridotto di 10 cm. Una volta raggiunto il valore di 10 cm si è proceduto con decrementi di 1 cm fino a raggiungere la soglia di 2 cm. Infine si sono rimossi gli outliers manualmente.

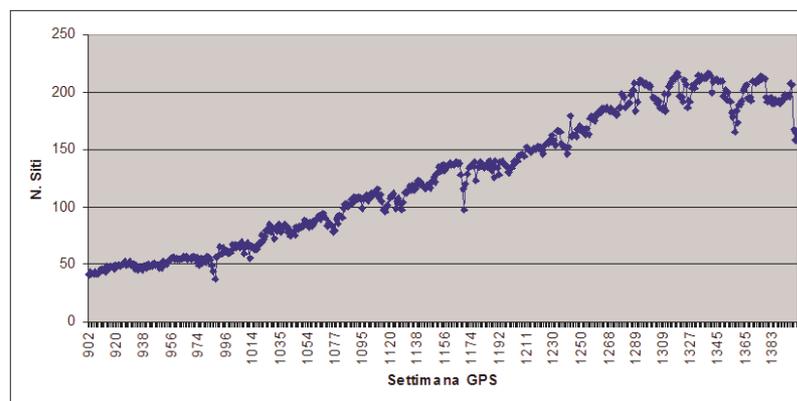


Schema per la combinazione multianno definitiva

La figura seguente descrive la disposizione delle tre reti combinate, in rosso sono state evidenziate le stazioni EUREF, un verde quelle UPA e in blu quelle GP. Il triangolo nero indica le stazioni EUREF utilizzate per definire il sistema di riferimento.



Disposizione dei siti appartenenti alle tre reti considerate, rosso = euref, verde, UPA, blu = GP. I triangoli neri indicano le stazioni che realizzano il sistema di riferimento.



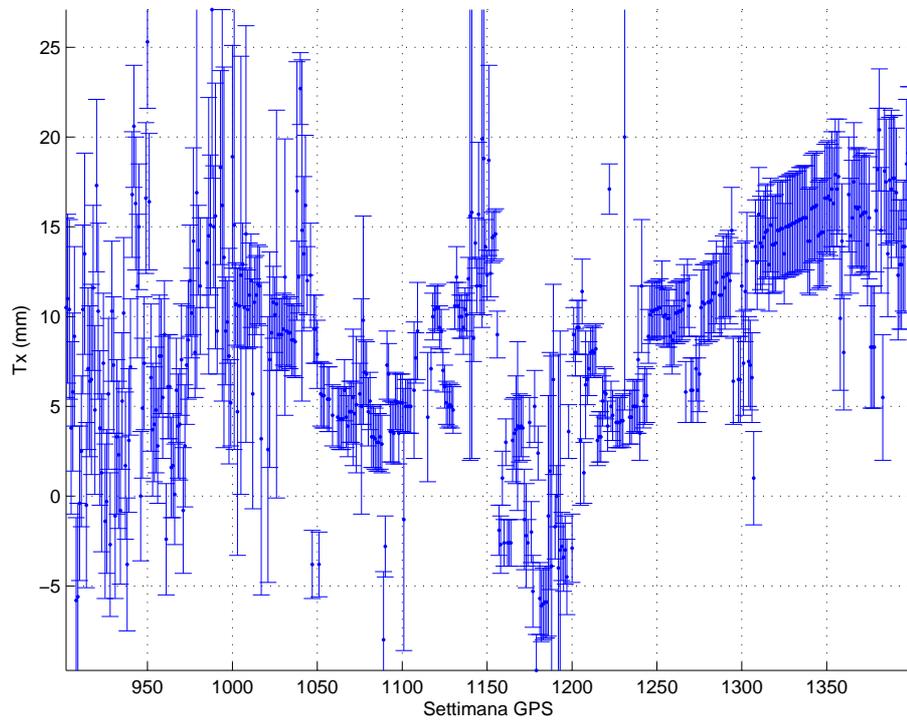
Numero dei siti presenti in ogni soluzione settimanale combinata.

9.4.2 Campo di velocità combinato in ITRF2005.

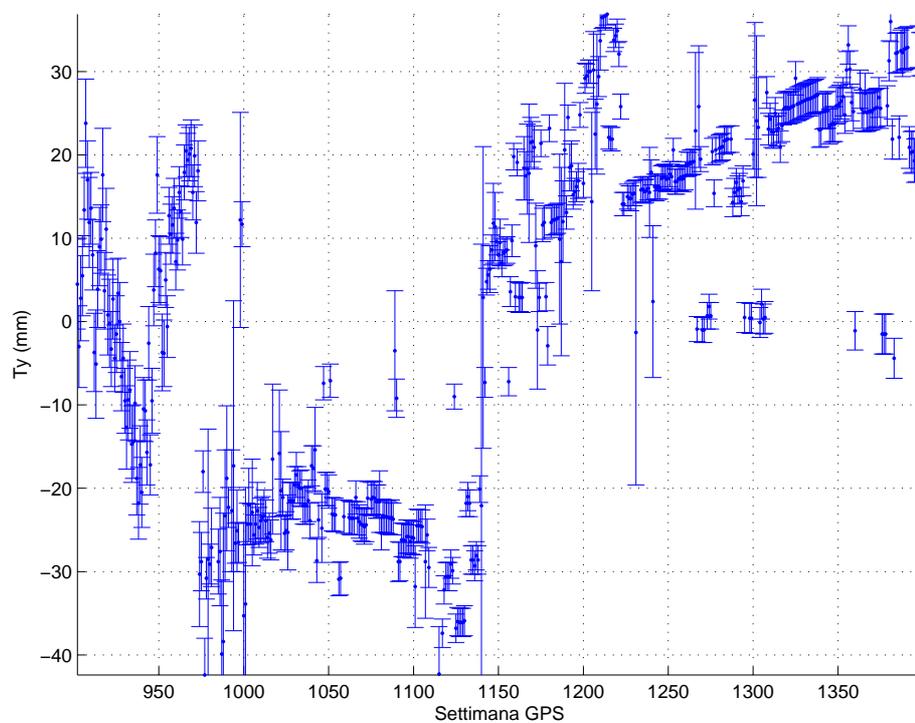
In questo paragrafo presentiamo la soluzione multianno definitiva EGU. Anche in questo caso, per verificarne la consistenza, riportiamo i grafici dei parametri di Helmer e dei WRMS. Intendiamo soprattutto verificare se la combinazione con le eq. normali EUREF ha permesso di allineare efficacemente le soluzioni UPA e GP al sistema di riferimento terrestre definito dalle eq. normali EUREF..

Parametri di Helmert e wrms

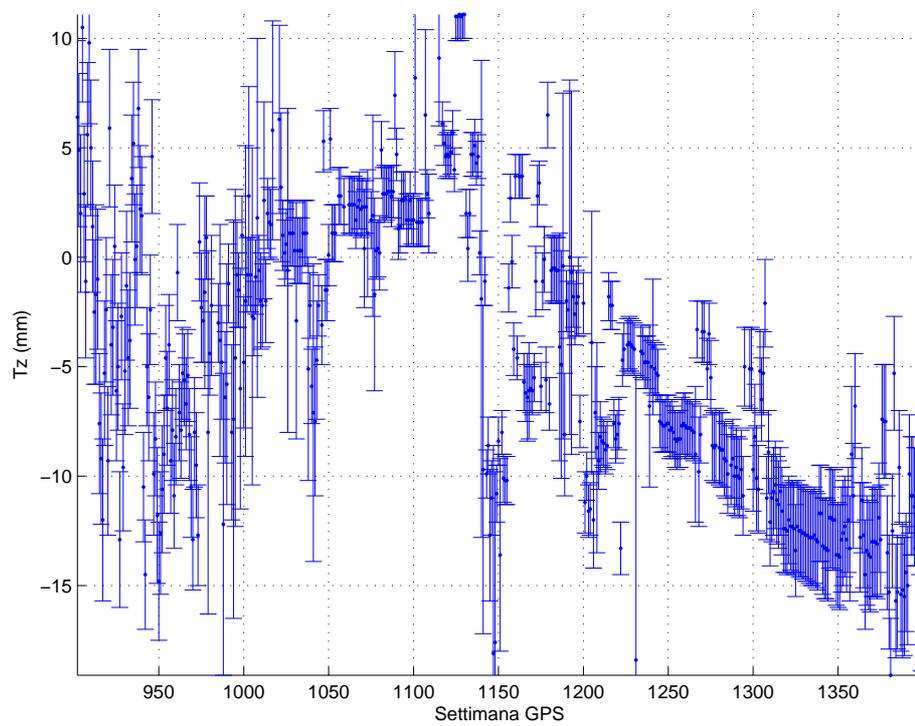
Osserviamo che la combinazione delle eq. normali UPA e EGU con le soluzioni EUREF ha migliorato notevolmente la consistenza tra le soluzioni individuali. Ora i parametri della soluzione EGU risulta paragonabile a quella delle soluzione EUREF. In particolare la banda di variazione dei parametri di traslazione è inferiore a 40 mm, mentre quella della soluzione EUREF è di circa 30 mm.



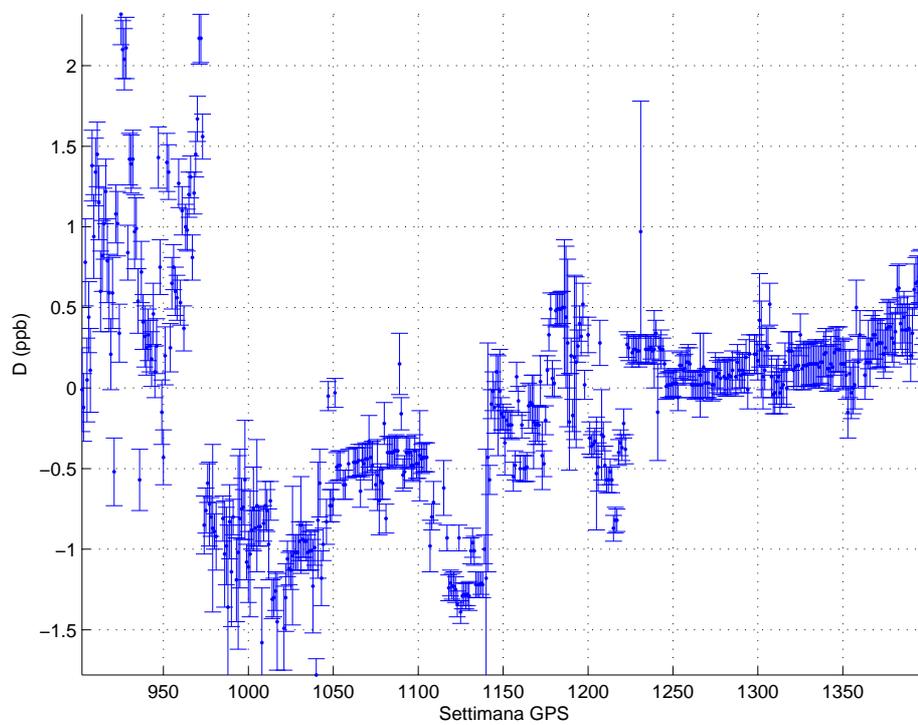
Traslazione lungo la direzione X



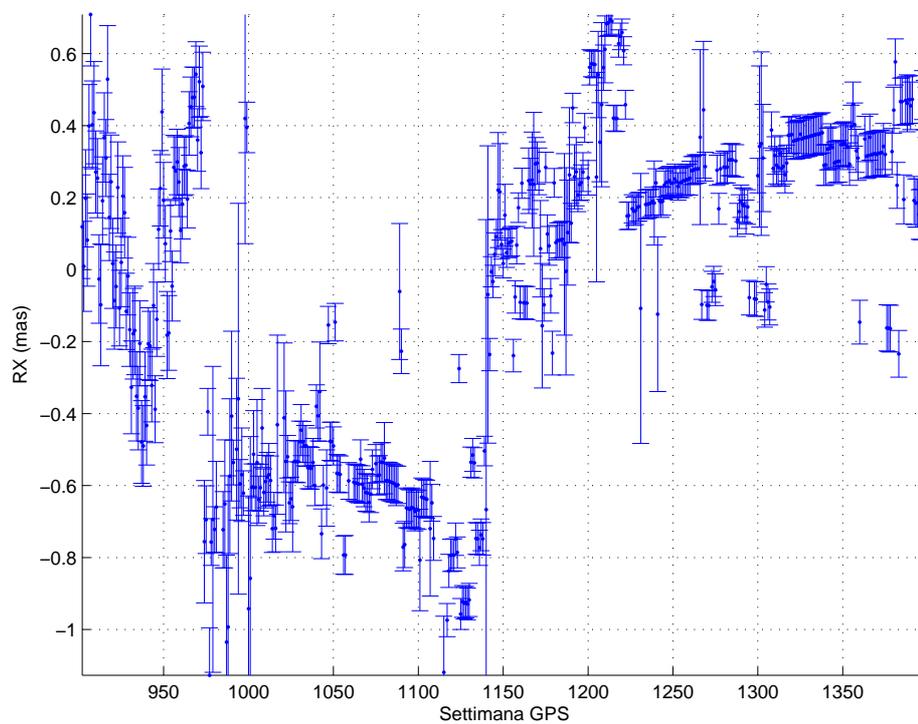
Traslazione lungo la direzione Y



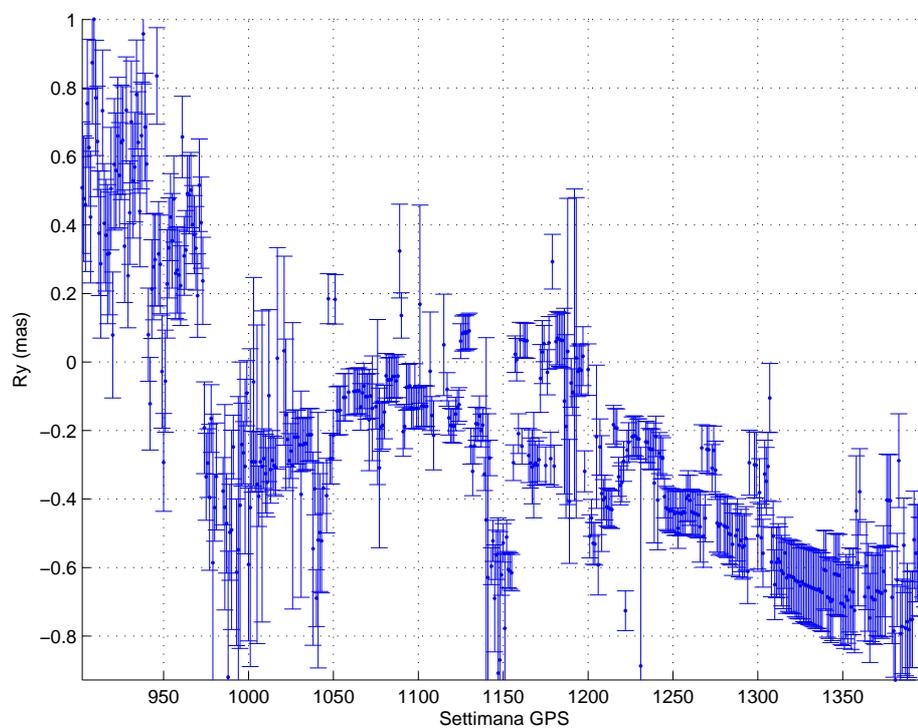
Traslazione lungo la direzione Z



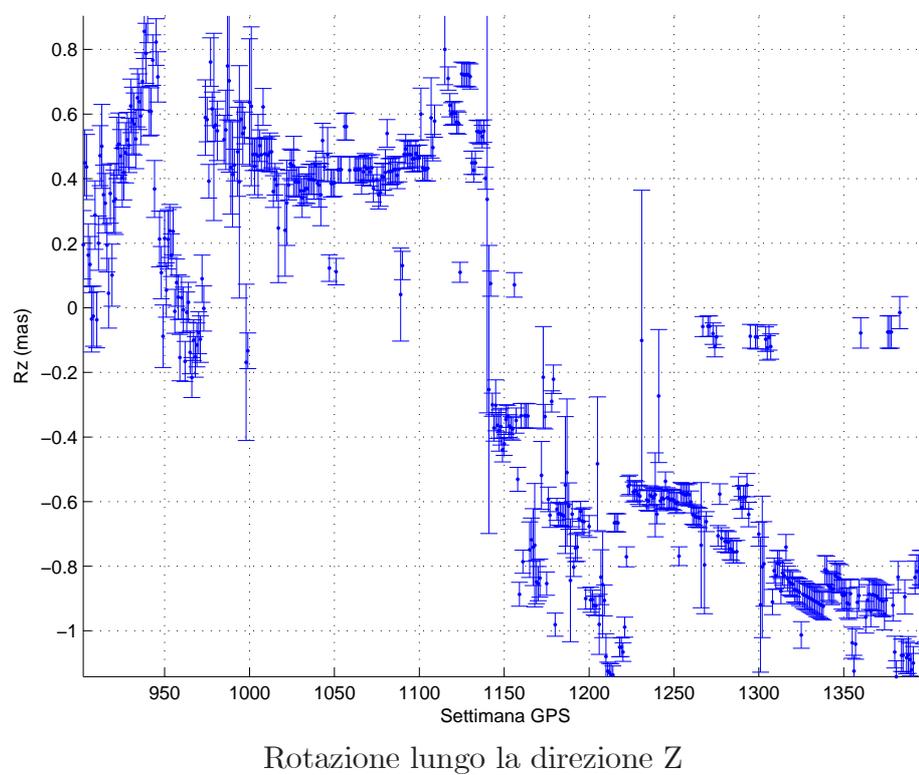
Fattore di scala



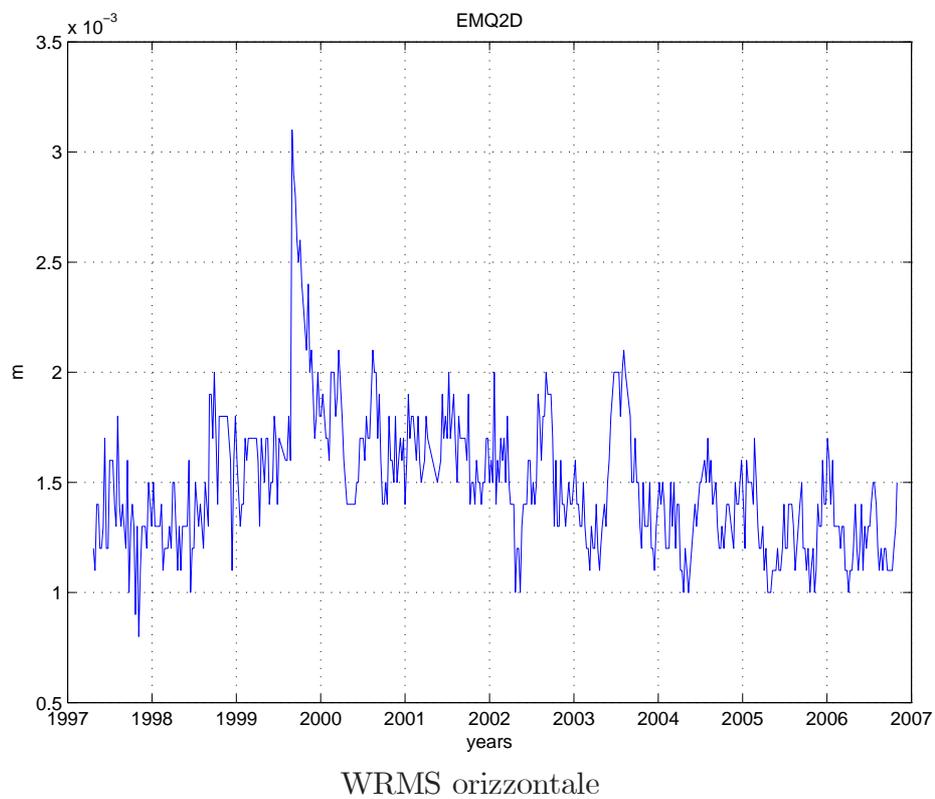
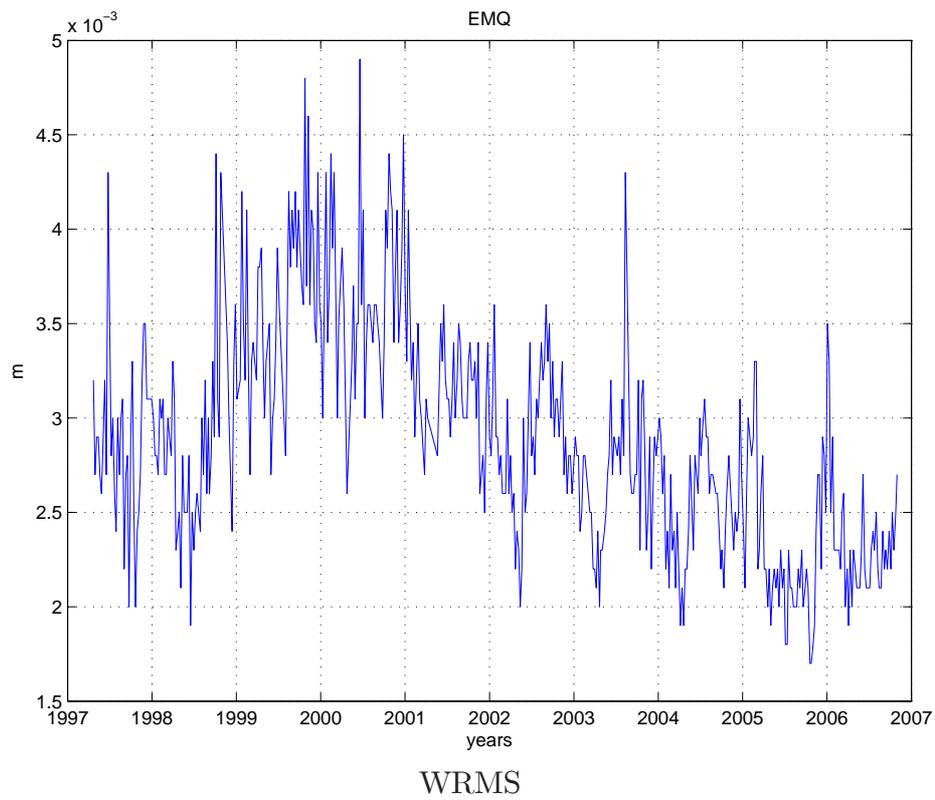
Rotazione lungo la direzione X

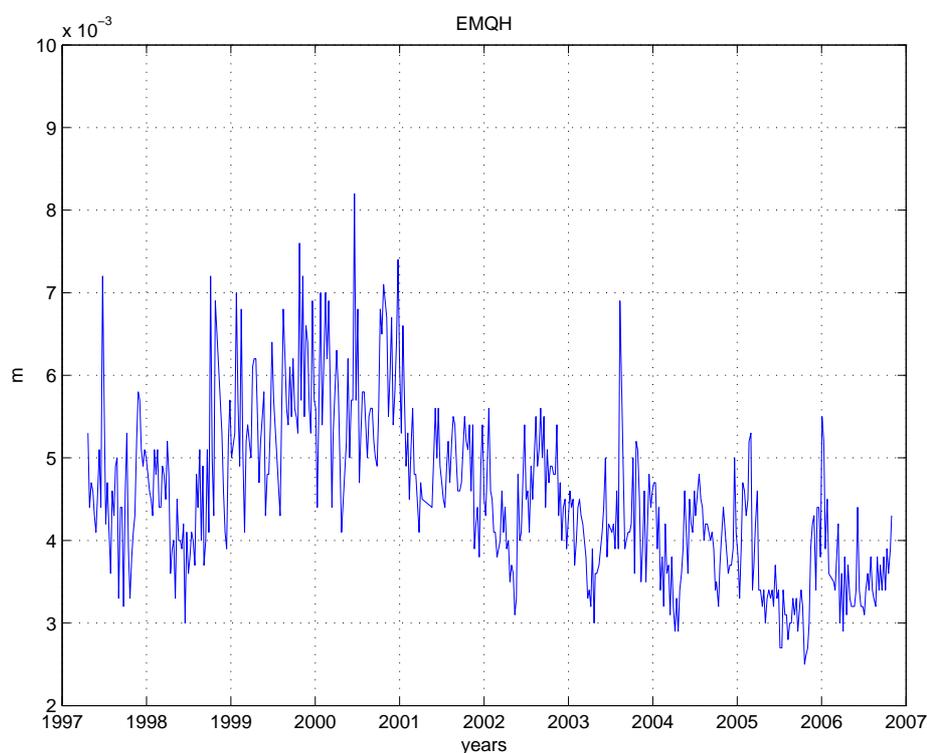


Rotazione lungo la direzione Y



I grafici seguenti dimostrano che i valori dei WRMS sono paragonabili a quelli della soluzione EUREF.





Campo di velocità ITRF2005

Nelle seguenti tabelle riportiamo i valori di velocità orizzontale del campo, espressi in coordinate locali:

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
13.515	46.548	20.6	16.34	0.08	0.1	0	ACOM 12767M001	1
351.601	43.364	21.57	15.95	0.06	0.07	0.02	ACOR 13434M001	1
12.175	46.527	20.51	16.62	0.08	0.1	0.03	AFAL 12766M001	1
8.763	41.927	20.73	16.08	0.06	0.07	-0.02	AJAC 10077M005	1
359.519	38.339	19.75	16.84	0.07	0.08	0.08	ALAC 13433M001	1
359.519	38.339	19.75	16.84	0.07	0.08	0.08	ALAC 13433M001	2
357.541	36.853	18.69	15.77	0.07	0.08	0.13	ALME 13437M001	1
14.871	48.122	20.37	15.6	0.09	0.12	0.01	AMST 88001S001	1
32.758	39.887	0.1	12.64	0.09	0.08	0.08	ANKR 20805M002	1
32.758	39.887	0.1	12.64	0.09	0.08	0.08	ANKR 20805M002	2
32.758	39.887	0.1	12.64	0.09	0.07	0.08	ANKR 20805M002	3
13.350	42.368	21.94	18.13	0.03	0.03	-0.11	AQUI 12757M001	1

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
10.205	46.776	19.99	16	0.05	0.06	-0.01	ARDE 88002M002	1
12.350	48.195	20.11	15.67	0.05	0.06	0.03	ASCH 88003S003	1
11.568	47.761	20.02	15.44	0.05	0.07	0.01	BADT 88004S004	1
1.401	41.600	19.14	16.27	0.07	0.08	0	BELL 13431M001	1
14.794	46.590	19.92	17.09	0.06	0.07	0	BLE1 88005M005	1
14.794	46.590	19.93	17.09	0.06	0.07	0	BLE2 88006S006	1
21.035	52.475	20.31	14.45	0.05	0.07	0.06	BOGI 12207M003	1
21.035	52.476	20.32	14.45	0.05	0.07	0.06	BOGO 12207M002	1
21.035	52.476	20.31	14.45	0.05	0.07	0.06	BOGO 12207M002	2
11.357	44.500	19.99	19.25	0.52	0.65	0.02	BOLG 12771M001	1
17.073	52.277	19.32	14.74	0.05	0.07	0.05	BOR1 12205M002	1
17.073	52.277	19.32	14.74	0.05	0.07	0.05	BOR1 12205M002	2
6.747	53.564	17.18	15.21	0.05	0.06	-0.01	BORK 14268M001	1
13.542	46.333	19.64	15.64	0.12	0.16	-0.01	BOVE 88008S008	1
11.113	44.122	20.96	17.48	0.04	0.05	-0.01	BRAS 99004M004	1
10.233	45.565	20.04	16.08	0.05	0.06	0.01	BRIX 12762M001	1
355.503	48.380	16.6	16.33	0.08	0.1	0	BRST 10004M004	1
355.503	48.380	16.61	16.33	0.08	0.1	0	BRST 10004M004	2
4.359	50.798	16.8	15.62	0.04	0.05	-0.01	BRUS 13101M004	1
4.359	50.798	16.79	15.62	0.04	0.05	-0.01	BRUS 13101M004	2
26.126	44.464	22.73	12.68	0.06	0.06	0.11	BUCU 11401M001	1
12.500	55.739	17.44	14.94	0.09	0.14	0.02	BUDP 10101M003	1
19.057	47.481	22.17	15.16	0.29	0.4	-0.02	BUTE 11209M001	1
11.337	46.499	19.71	16.1	0.03	0.04	0	BZRG 12751M001	1
11.337	46.499	19.71	16.1	0.03	0.03	0	BZRG 12751M001	3
353.658	39.479	18.31	16.77	0.13	0.15	0.06	CACE 13447M001	1
8.973	39.136	21.38	16.29	0.03	0.04	-0.1	CAGL 12725M003	1
8.973	39.136	21.38	16.33	0.03	0.04	-0.11	CAGL 12725M003	2
8.973	39.136	21.38	16.33	0.04	0.04	-0.1	CAGZ 12725M004	1
13.124	43.112	22.86	19.66	0.04	0.05	-0.03	CAME 12754M001	1
13.124	43.112	22.85	19.66	0.04	0.05	-0.03	CAME 12754M001	2
356.202	43.472	17.64	17.23	0.08	0.09	0.04	CANT 13438M001	1
350.581	38.693	18.32	16.83	0.07	0.07	0.08	CASC 13909S001	1
12.583	45.479	20.71	18.04	0.05	0.06	0.01	CAVA 99009M009	1
12.583	45.479	20.71	18.04	0.05	0.06	0.01	CAVA 99009M009	2
354.689	35.896	15.46	17.29	0.33	0.38	0.06	CEUT 13449M001	1
354.689	35.896	15.46	17.29	0.33	0.38	0.06	CEUT 13449M001	2
359.592	46.133	18.52	16.34	0.06	0.08	0.03	CHIZ 10020M001	1
9.096	45.802	20	15.14	0.04	0.05	0	COMO 12761M001	1
9.096	45.802	20	15.14	0.04	0.05	0	COMO 12761M001	2
16.310	39.201	22.41	17.8	0.07	0.08	-0.1	COSE 99011M011	1
3.316	42.319	20.95	16.14	0.16	0.2	0.02	CREU 13432M001	1

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
3.316	42.319	20.95	16.14	0.16	0.2	0.03	CREU 13432M001	2
3.316	42.319	20.95	16.14	0.16	0.2	0.03	CREU 13432M001	3
357.360	53.345	15.66	15.88	0.19	0.28	0.01	DARE 13208S001	1
9.844	46.813	19.65	16	0.08	0.1	-0.03	DAVO 88010M010	1
9.844	46.813	19.65	16	0.08	0.1	-0.03	DAVO 88010M010	2
4.388	51.986	17.02	15.63	0.05	0.06	-0.01	DELF 13502M004	1
4.388	51.986	17.02	15.63	0.05	0.06	-0.01	DELF 13502M004	3
3.400	50.934	17.55	16.21	0.09	0.12	0	DENT 13112M001	1
3.400	50.934	17.55	16.21	0.09	0.12	0	DENT 13112M001	3
3.400	50.934	17.55	16.21	0.09	0.12	0	DENT 13112M001	4
3.400	50.934	17.55	16.21	0.09	0.12	0	DENT 13112M001	5
15.213	46.814	20.62	16.32	0.06	0.08	0	DLBG 88012S012	1
15.213	46.814	20.61	16.33	0.06	0.08	0	DLBG 88012S012	2
4.595	50.095	16.84	15.09	0.05	0.07	-0.01	DOUR 13113M001	1
4.595	50.095	16.85	15.1	0.05	0.07	-0.01	DOUR 13113M001	2
35.392	31.593	23.15	20.91	0.16	0.13	-0.1	DRAG 20710S001	1
13.730	51.030	19.65	15.99	0.09	0.12	0.01	DRES 14108M001	1
13.730	51.030	19.65	16	0.09	0.12	0.01	DRES 14108M001	2
18.110	42.650	22.5	18.45	0.08	0.1	-0.05	DUBR 11901M001	1
18.110	42.650	22.5	18.45	0.08	0.1	-0.05	DUBR 11901M001	2
0.492	40.821	19.63	16.1	0.04	0.04	0.09	EBRE 13410M001	1
5.684	50.758	17.45	16.01	0.05	0.07	0	EIJS 13533M001	1
5.684	50.758	17.45	16.01	0.05	0.07	0	EIJS 13533M001	2
10.211	42.753	20.18	16.55	0.03	0.03	-0.08	ELBA 12721M002	1
0.976	42.694	19.15	16.24	0.06	0.07	0.04	ESCO 13435M001	1
6.764	50.674	17.98	16.31	0.06	0.08	0	EUSK 14258M003	1
6.764	50.674	17.97	16.31	0.06	0.08	0	EUSK 14258M003	2
15.883	46.953	22.99	17.27	0.14	0.18	0.01	FLDB 88014S014	1
9.581	47.231	18.8	16.61	0.06	0.09	0	FLDK 88015S015	1
9.581	47.231	18.8	16.61	0.07	0.09	0	FLDK 88015S015	2
13.564	48.936	20.29	15.06	0.12	0.17	0.01	FNST 88016S016	1
13.564	48.936	20.29	15.06	0.12	0.17	0.01	FNST 88016S016	2
12.978	47.839	19.99	16.17	0.07	0.1	0.01	FRLG 88017S017	1
12.978	47.839	19.98	16.17	0.07	0.1	0.01	FRLG 88017S017	2
14.503	48.509	20.38	15.22	0.12	0.16	0	FRST 88018S018	1
351.411	41.106	18.16	16.59	0.11	0.12	0.04	GAIA 13902M001	1
20.323	49.035	18.81	14.87	0.21	0.29	-0.02	GANP 11515M001	1
20.323	49.035	18.81	14.87	0.21	0.29	-0.02	GANP 11515M001	2
8.921	44.419	20.16	15.88	0.03	0.03	-0.04	GENO 12712M002	1
30.497	50.364	21.39	12.9	0.05	0.05	0.27	GLSV 12356M001	1
13.801	47.921	20.44	15.91	0.05	0.06	0.01	GMND 88019M019	1
13.801	47.921	20.44	15.91	0.05	0.07	0.01	GMND 88019M019	2

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
14.786	49.914	19.81	15.36	0.09	0.12	-0.01	GOPE 11502M002	1
14.786	49.914	19.81	15.36	0.09	0.12	-0.01	GOPE 11502M002	2
14.786	49.914	19.81	15.36	0.09	0.12	-0.01	GOPE 11502M002	3
15.493	47.067	20.68	15.27	0.08	0.1	0	GRAA 88020M020	1
15.493	47.067	21.05	15.74	0.03	0.03	0.09	GRAB 88021M021	1
15.493	47.067	21.05	15.74	0.03	0.03	0.08	GRAB 88021M021	2
6.921	43.755	20.25	16.01	0.04	0.05	-0.01	GRAS 10002M006	1
6.921	43.755	20.25	16.01	0.04	0.05	-0.01	GRAS 10002M006	2
15.493	47.067	21.26	15.71	0.03	0.04	0.07	GRAZ 11001M002	1
15.493	47.067	21.29	15.7	0.03	0.04	0.07	GRAZ 11001M002	2
15.493	47.067	21.29	15.7	0.03	0.04	0.07	GRAZ 11001M002	3
15.493	47.067	21.29	15.7	0.04	0.04	0.06	GRAZ 11001M002	4
11.143	47.509	20.25	16.06	0.08	0.1	0.01	GRMP 88023S023	1
11.143	47.509	20.24	16.06	0.08	0.1	0.01	GRMP 88023S023	2
14.544	46.048	20.93	17.78	0.11	0.14	-0.02	GSR1 14501M001	2
16.319	47.074	21.36	15.63	0.05	0.06	0.02	GUES 11045M001	1
16.319	47.074	21.37	15.63	0.05	0.06	0.02	GUES 11045M001	2
7.893	54.174	16.8	15.86	0.04	0.05	0.01	HELG 14264M001	1
0.336	50.867	16.34	16.22	0.06	0.09	0	HERS 13212M007	1
0.336	50.867	16.34	16.22	0.06	0.09	0	HERS 13212M007	2
0.336	50.867	16.34	16.22	0.06	0.09	0	HERS 13212M007	3
0.334	50.867	16.33	16.22	0.06	0.09	0	HERT 13212M010	1
11.386	47.313	20.29	16.32	0.03	0.03	0.04	HFLK 11006S003	1
11.386	47.313	20.28	16.31	0.03	0.03	0.04	HFLK 11006S003	2
13.771	47.377	20.42	16.59	0.04	0.05	0.02	HKBL 11039S001	1
13.771	47.377	20.42	16.59	0.04	0.05	0.02	HKBL 11039S001	2
10.476	53.051	17.95	15.31	0.08	0.12	0	HOBU 14202M003	1
10.476	53.051	17.95	15.31	0.08	0.12	0	HOBU 14202M003	2
344.802	64.267	12.6	14.58	0.07	0.07	0	HOFN 10204M002	1
344.802	64.267	12.61	14.57	0.07	0.07	0	HOFN 10204M002	2
7.639	45.015	19.66	16.13	0.03	0.03	-0.02	IENG 12724S001	1
12.515	41.828	20.56	17.66	0.04	0.04	-0.1	INGR 99025M025	1
355.781	57.486	13.55	16.34	0.2	0.29	-0.01	INVE 13221S001	1
29.019	41.104	24.97	10.24	0.1	0.1	0	ISTA 20807M001	1
29.019	41.104	24.97	10.24	0.1	0.1	0	ISTA 20807M001	2
30.096	62.391	19.38	11.96	0.04	0.05	-0.01	JOEN 10512M001	1
21.032	52.098	20.52	14.19	0.04	0.05	0.13	JOZ2 12204M002	1
21.032	52.097	20.52	14.19	0.04	0.05	0.14	JOZE 12204M001	1
21.032	52.097	20.52	14.19	0.04	0.05	0.13	JOZE 12204M001	2
8.411	49.011	19.05	15.9	0.09	0.13	0	KARL 14216M001	1
8.411	49.011	19.05	15.9	0.09	0.13	0	KARL 14216M001	2
8.411	49.011	19.05	15.9	0.09	0.13	0	KARL 14216M001	3

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
19.036	50.253	21.62	10.29	0.18	0.25	-0.02	KATO 12219S001	1
21.060	67.878	14.99	14.46	0.05	0.05	0.02	KIR0 10422M001	1
20.968	67.857	14.71	15	0.05	0.06	0.03	KIRU 10403M002	1
13.771	47.377	20.19	16.55	0.1	0.14	-0.06	KKB1 88076M076	1
14.319	46.607	20.55	16.98	0.09	0.11	0	KLAG 88025S025	1
14.319	46.607	20.55	16.98	0.09	0.11	0	KLAG 88025S025	2
14.319	46.607	20.56	16.98	0.09	0.11	0	KLAG 88025S025	3
8.730	50.220	18.15	15.97	0.08	0.12	0	KLOP 14214M002	1
8.730	50.220	18.15	15.97	0.08	0.12	0	KLOP 14214M002	2
8.730	50.220	18.15	15.97	0.08	0.11	0	KLOP 14214M002	3
13.009	46.674	17.6	16.41	0.09	0.12	0.01	KOE1 88077M077	1
13.009	46.674	17.62	16.42	0.09	0.12	0.01	KOE2 88078M078	1
13.009	46.674	17.63	16.42	0.09	0.11	0.01	KOE2 88078M078	2
13.009	46.674	17.64	16.41	0.09	0.11	0.01	KOE3 88079M079	1
10.115	46.974	19.41	19.94	0.13	0.17	0.02	KOP1 88027M027	1
10.115	46.974	19.4	19.94	0.13	0.17	0.02	KOP1 88027M027	2
10.116	46.974	19.84	15.9	0.14	0.19	-0.01	KOP2 88028S028	1
5.810	52.178	17.52	16.21	0.04	0.05	-0.02	KOSG 13504M003	1
5.810	52.178	17.52	16.21	0.04	0.05	-0.02	KOSG 13504M003	2
19.920	50.066	20.54	15.24	0.13	0.18	-0.01	KRAW 12218M001	1
10.627	47.146	18.72	16.82	0.04	0.04	0	KRBG 11043S001	1
10.627	47.146	18.73	16.82	0.04	0.04	0	KRBG 11043S001	2
12.359	47.418	21.23	15.23	0.07	0.1	-0.01	KTZB 11038S001	1
12.359	47.418	21.23	15.23	0.07	0.1	-0.01	KTZB 11038S001	2
351.332	37.099	17.53	17.49	0.13	0.13	0.09	LAGO 13903M001	1
20.670	53.892	19.29	14.39	0.06	0.08	0.03	LAMA 12209M001	1
20.670	53.892	19.3	14.38	0.06	0.08	0.03	LAMA 12209M001	2
12.606	35.500	19.68	19.06	0.04	0.05	-0.27	LAMP 12706M002	1
13.893	46.631	21.96	15.06	0.1	0.13	0	LANK 88030S030	1
13.893	46.631	21.96	15.06	0.1	0.13	0	LANK 88030S030	2
13.893	46.631	21.96	15.06	0.1	0.13	0	LANK 88030S030	3
9.407	45.857	19.74	16.34	0.09	0.12	0.02	LEC1 12768M001	1
10.139	47.224	19.49	16.49	0.06	0.08	0	LECH 88031S031	1
10.139	47.224	19.49	16.49	0.06	0.08	0	LECH 88031S031	2
14.786	46.971	21.96	15.48	0.07	0.08	0.01	LEON 88033S033	1
14.786	46.971	21.97	15.48	0.07	0.09	0.01	LEON 88033S033	2
13.477	46.830	20.25	14.7	0.07	0.09	0.01	LIES 88035S035	1
13.477	46.830	20.24	14.7	0.07	0.09	0.01	LIES 88035S035	2
14.291	48.292	22.17	11.6	1.68	2.24	-0.08	LIN1 88075M075	1
9.708	47.559	19.39	15.74	0.04	0.05	0.01	LIND 88036S036	1
14.283	48.310	20.43	15.03	0.09	0.12	-0.01	LINZ 11033S001	1
14.283	48.310	20.43	15.03	0.09	0.12	-0.01	LINZ 11033S001	2

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
1.973	42.478	19.32	15.87	0.06	0.07	0.04	LLIV 13436M001	1
342.106	28.764	16.95	17.17	0.22	0.21	0.12	LPAL 81701M001	1
358.781	46.159	17.78	16	0.12	0.16	0.05	LROC 10023M001	1
2.625	39.553	17.62	16.87	0.14	0.17	0.03	MALL 13444M001	1
2.625	39.553	17.61	16.87	0.14	0.17	0.03	MALL 13444M001	2
0.155	48.019	17.5	16.67	0.09	0.12	0.01	MANS 10091M001	1
0.155	48.019	17.5	16.67	0.09	0.12	0.01	MANS 10091M001	2
17.259	60.595	16.86	13.87	0.04	0.05	0.01	MAR6 10405M002	1
17.259	60.595	16.86	13.86	0.04	0.05	0.01	MAR6 10405M002	2
15.649	46.562	20.16	15.13	0.12	0.16	0	MARI 88040S040	1
15.649	46.562	20.16	15.13	0.12	0.16	0	MARI 88040S040	2
5.354	43.279	19.4	15.8	0.1	0.13	0	MARS 10073M008	1
5.354	43.279	19.4	15.8	0.1	0.13	0	MARS 10073M008	2
5.354	43.279	19.4	15.8	0.1	0.13	0	MARS 10073M008	3
344.367	27.764	16.98	17.49	0.12	0.09	0.31	MAS1 31303M002	1
16.704	40.649	23.18	19.45	0.04	0.04	-0.18	MATE 12734M008	1
16.704	40.649	23.18	19.45	0.04	0.04	-0.19	MATE 12734M008	2
13.436	45.924	19.82	17.64	0.09	0.12	-0.02	MDEA 12765M001	1
37.224	56.027	21.67	11.67	0.08	0.1	0.08	MDVO 12309M002	1
37.224	56.027	21.67	11.67	0.08	0.1	0.08	MDVO 12309M002	2
11.647	44.520	22.1	17.4	0.03	0.03	-0.03	MEDI 12711M003	1
11.647	44.520	22.12	17.37	0.03	0.03	-0.03	MEDI 12711M003	2
11.157	46.669	20.05	15.2	0.05	0.06	-0.01	MERA 99033M033	1
11.157	46.669	20.06	15.2	0.05	0.06	-0.01	MERA 99033M033	2
24.395	60.217	19.03	12.75	0.03	0.04	0.04	METS 10503S011	1
31.973	46.973	22.66	12.41	0.15	0.2	0	MIKL 12335M001	1
12.584	38.008	20.95	18.77	0.05	0.05	-0.17	MILO 12758M001	1
2.587	48.841	17.52	15.77	0.06	0.08	0.01	MLVL 10092M001	1
11.122	46.072	19.69	16.34	0.04	0.04	0.01	MOCA 12753M001	1
17.274	48.373	20.55	15.35	0.05	0.06	0.05	MOPI 11507M001	1
17.274	48.373	20.55	15.36	0.05	0.06	0.05	MOPI 11507M001	2
358.315	55.213	15.43	16.04	0.12	0.18	-0.01	MORP 13299S001	1
12.988	46.241	20.47	17.27	0.08	0.1	-0.02	MPRA 12764M001	1
11.646	44.520	22.12	17.37	0.03	0.03	-0.03	MSEL 12711M008	1
16.404	47.738	20.77	16.54	0.04	0.05	0.04	MTBG 11030M001	1
16.404	47.738	20.77	16.55	0.04	0.05	0.04	MTBG 11030M001	2
11.832	47.421	22.18	16.53	0.12	0.16	-0.02	MUEN 88041S041	1
11.832	47.421	22.18	16.53	0.12	0.16	-0.02	MUEN 88041S041	2
354.457	50.103	15.58	16.07	0.28	0.4	0.03	NEWL 13273M103	1
33.396	35.141	18.99	16.23	0.11	0.09	-0.04	NICO 14302M001	1
33.396	35.141	18.99	16.23	0.11	0.09	-0.04	NICO 14302M001	2
14.990	36.876	21.06	20.21	0.06	0.06	-0.21	NOT1 12717M004	1

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
14.990	36.876	21.06	20.21	0.06	0.06	-0.2	NOTO 12717M003	1
14.990	36.876	21.06	20.21	0.06	0.06	-0.21	NOTO 12717M003	2
8.614	45.447	19.44	16.21	0.03	0.03	-0.02	NOVA 12759M001	1
359.660	51.421	16.58	16.02	0.13	0.17	0.01	NPLD 13234M003	1
359.660	51.421	16.58	16.02	0.13	0.17	0.01	NPLD 13234M003	2
44.503	40.226	27.77	17.89	0.29	0.35	0.01	NSSP 12312M001	2
11.865	78.930	9.06	14.47	0.08	0.1	0.04	NYA1 10317M003	1
22.136	47.835	21.78	13.79	0.35	0.49	-0.03	NYIR 11208M001	1
22.136	47.835	21.78	13.79	0.35	0.49	-0.03	NYIR 11208M001	2
11.280	48.086	19.63	15.66	0.05	0.06	0	OBE2 14208M003	1
11.280	48.086	19.62	15.66	0.05	0.06	0	OBER 14208M001	1
11.278	48.084	19.61	16.04	0.63	0.85	0	OBET 14208M004	1
11.926	57.395	16.32	14.38	0.03	0.05	0.02	ONSA 10402M004	1
11.926	57.395	16.32	14.37	0.03	0.04	0.02	ONSA 10402M004	2
20.794	41.127	23.97	11.92	0.07	0.07	-0.08	ORID 15601M001	1
20.671	46.555	21.45	15.72	0.12	0.16	-0.02	OROS 11207M001	1
20.671	46.555	21.45	15.72	0.12	0.16	-0.02	OROS 11207M001	2
18.680	45.561	21.85	15.49	0.07	0.09	-0.01	OSJE 11902M001	1
10.368	59.737	14.92	15.01	0.06	0.08	0	OSLO 10307M001	4
11.896	45.411	20.57	16.82	0.03	0.04	0	PADO 12750S001	1
13.443	48.568	19.67	15.19	0.06	0.08	0.01	PASS 88044S044	1
13.443	48.568	19.67	15.19	0.06	0.08	0.01	PASS 88044S044	2
11.460	47.208	19.46	16.78	0.03	0.03	0.03	PATK 11029S001	1
11.460	47.208	19.46	16.82	0.03	0.03	0.03	PATK 11029S001	2
9.136	45.203	20.65	16.2	0.08	0.1	-0.01	PAVI 99045M045	1
9.136	45.203	20.65	16.2	0.08	0.1	0	PAVI 99045M045	2
9.136	45.203	20.64	16.2	0.08	0.1	0	PAVI 99045M045	3
334.337	37.748	13.94	15.81	0.22	0.22	-0.04	PDEL 31906M004	1
334.337	37.748	13.94	15.81	0.22	0.22	-0.04	PDEL 31906M004	2
19.282	47.790	21.6	14.65	0.03	0.03	0.17	PENC 11206M006	1
19.282	47.790	21.58	14.66	0.03	0.04	0.17	PENC 11206M006	2
9.785	47.515	19.81	15.73	0.03	0.03	0.02	PFAN 11005S002	1
9.785	47.515	19.81	15.73	0.03	0.03	0.02	PFAN 11005S002	2
9.785	47.515	19.8	15.72	0.03	0.03	0.03	PFAN 11005S002	3
12.933	48.429	19.95	15.66	0.07	0.09	0	PFRK 88045S045	1
12.933	48.429	19.94	15.66	0.07	0.09	0	PFRK 88045S045	2
34.543	49.603	21.9	12.97	0.1	0.13	0.07	POLV 12336M001	1
13.066	52.379	18.42	15.08	0.03	0.03	0.1	POTS 14106M003	1
11.099	43.886	21.08	17.47	0.03	0.03	-0.05	PRAT 12760M001	1
10.460	52.296	18.25	15.55	0.1	0.15	-0.01	PTBB 14234M001	1
10.460	52.296	18.24	15.55	0.1	0.15	-0.01	PTBB 14234M001	2
10.460	52.296	18.24	15.55	0.1	0.15	-0.01	PTBB 14234M001	3

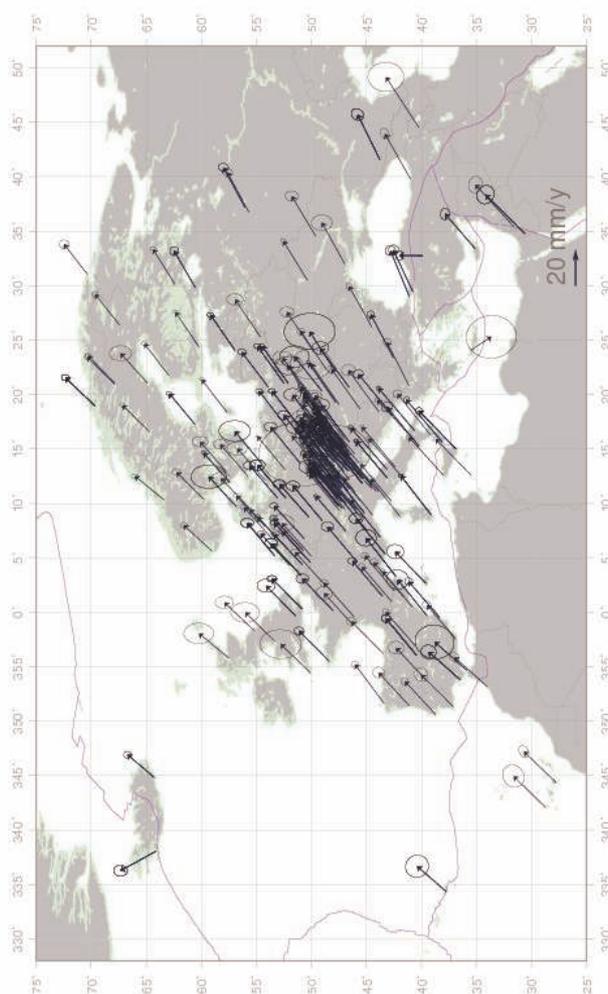
λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
10.460	52.296	18.24	15.55	0.1	0.15	-0.01	PTBB 14234M001	4
313.952	60.715	-17.56	13.32	0.19	0.25	0.05	QAQ1 43007M001	1
353.146	33.998	16.23	17.89	0.09	0.09	0.19	RABT 35001M002	1
34.763	30.598	21.36	21.32	0.18	0.17	-0.11	RAMO 20703S001	1
34.763	30.598	21.36	21.32	0.18	0.17	-0.11	RAMO 20703S001	2
34.763	30.598	21.37	21.32	0.18	0.17	-0.11	RAMO 20703S001	4
5.145	50.002	18.03	15.83	0.17	0.23	0.01	REDU 13102M001	1
338.045	64.139	-10.58	19.05	0.11	0.13	0	REYK 10202M001	1
338.045	64.139	-10.58	19.05	0.11	0.13	0.01	REYK 10202M001	2
338.045	64.139	-10.59	19.05	0.11	0.13	0.01	REYK 10202M001	3
13.486	48.203	21.59	16.04	0.04	0.04	0.04	RIED 88048M048	1
24.059	56.949	19.41	13.29	0.04	0.06	0.07	RIGA 12302M002	1
24.059	56.949	19.41	13.29	0.04	0.06	0.07	RIGA 12302M002	2
24.059	56.949	19.41	13.29	0.05	0.06	0.07	RIGA 12302M002	3
13.995	48.570	19.83	15.53	0.05	0.06	0.01	ROHR 88049M049	1
13.995	48.570	19.83	15.53	0.05	0.07	0.01	ROHR 88049M049	2
12.107	47.868	20.17	15.25	0.05	0.06	0.02	ROSE 88050S050	1
11.042	45.894	21.47	16.09	2.26	2.98	0.02	ROVE 12774M001	1
14.343	47.525	20.22	15.28	0.03	0.03	0.08	RTMN 99050M050	1
9.507	46.983	19.76	15.21	0.04	0.05	0	SARG 88051M051	1
13.643	54.514	17.91	14.67	0.2	0.3	0	SASS 14281M001	1
13.643	54.514	17.91	14.67	0.2	0.3	0	SASS 14281M001	2
13.110	47.803	20.59	15.57	0.03	0.03	0.08	SBGZ 11031S001	1
13.110	47.803	20.59	15.57	0.03	0.03	0.07	SBGZ 11031S001	2
12.291	45.230	19.25	16.94	0.05	0.06	0	SFEL 99053M053	1
12.291	45.230	19.25	16.94	0.05	0.06	0.01	SFEL 99053M053	2
353.794	36.464	15.32	17.22	0.14	0.15	0.07	SFER 13402M004	1
353.794	36.464	15.31	17.21	0.14	0.15	0.07	SFER 13402M004	2
353.794	36.464	15.3	17.21	0.14	0.15	0.07	SFER 13402M004	3
4.677	45.879	19.01	15.87	0.09	0.12	0	SJDV 10090M001	1
4.677	45.879	19.01	15.87	0.09	0.12	0	SJDV 10090M001	2
21.048	64.879	16.31	14.65	0.15	0.22	-0.01	SKE0 10426M001	1
9.559	55.641	16.43	15.33	0.12	0.17	0	SMID 10114M001	1
26.389	67.421	16.79	13.31	0.05	0.06	0.01	SODA 10513M001	1
23.395	42.556	23.66	12.23	0.07	0.07	-0.01	SOFI 11101M002	1
23.395	42.556	23.66	12.24	0.07	0.07	-0.01	SOFI 11101M002	2
12.958	47.054	23.43	17.77	0.07	0.09	0	SONN 88064S064	1
12.958	47.054	23.42	17.77	0.07	0.09	0	SONN 88064S064	2
12.891	57.715	16.58	14.32	0.1	0.15	0.01	SPT0 10425M001	1
18.414	43.868	22.74	16.5	0.11	0.13	-0.03	SRJV 11801S001	1
5.599	59.018	14.34	15.44	0.05	0.06	-0.03	STAS 10330M001	1
9.346	47.442	19.96	16.21	0.04	0.05	0.01	STGA 88065M065	1

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
15.633	48.203	20.7	15.41	0.03	0.03	0.09	STPO 11041S001	1
15.633	48.203	20.68	15.43	0.03	0.03	0.1	STPO 11041S001	2
9.742	56.842	16.16	14.88	0.23	0.34	0	SULD 10113M001	1
9.742	56.842	16.16	14.88	0.23	0.34	0	SULD 10113M001	2
24.014	49.836	21.24	14.24	0.1	0.13	0	SULP 12366M001	1
29.781	60.533	20.25	11.57	0.08	0.08	-0.02	SVTL 12350M001	1
29.781	60.533	20.25	11.57	0.08	0.09	-0.02	SVTL 12350M001	2
5.219	53.363	17.87	14.69	0.09	0.13	-0.01	TERS 13534M001	1
5.219	53.363	17.86	14.69	0.09	0.12	-0.01	TERS 13534M001	3
5.219	53.363	17.86	14.69	0.09	0.12	-0.01	TERS 13534M001	4
15.651	38.108	23.13	19.53	0.05	0.06	-0.2	TGRC 99061M061	1
15.651	38.108	23.14	19.53	0.05	0.05	-0.21	TGRC 99061M061	2
291.212	76.537	-21.28	3.93	0.19	0.17	0.17	THU1 43001M001	1
291.175	76.537	-22.73	3.31	0.22	0.23	0.16	THU3 43001M002	1
15.724	40.601	22.46	20.47	0.05	0.05	-0.14	TITO 99062M062	1
1.481	43.561	19.25	16.25	0.07	0.09	0.01	TLSE 10003M009	1
7.661	45.063	19.66	16.13	0.03	0.03	-0.03	TORI 12724M002	1
1.481	43.561	19.25	16.25	0.07	0.09	0.01	TOUL 10003M004	1
39.776	40.995	24.86	13.92	0.1	0.08	0.24	TRAB 20808M001	1
10.319	63.371	12.99	15.88	0.05	0.06	-0.03	TRDS 10331M001	1
14.464	46.861	20.63	16.9	0.07	0.09	0	TRE1 88067S067	1
14.464	46.861	20.63	16.9	0.07	0.09	0	TRE2 88068S068	1
15.859	47.928	21.74	15.77	0.05	0.07	0.03	TRFB 11047M001	1
13.764	45.710	20.33	17.75	0.08	0.1	0	TRIE 12718M003	1
18.940	69.663	15.59	16.02	0.06	0.08	0.07	TRO1 10302M006	1
18.940	69.663	15.59	16.02	0.06	0.08	0.07	TRO1 10302M006	2
18.940	69.663	15.59	16.02	0.06	0.08	0.07	TRO1 10302M006	3
18.940	69.663	15.58	16.02	0.06	0.08	0.07	TRO1 10302M006	4
29.451	40.787	22.74	10.42	0.1	0.1	0.01	TUBI 20806M001	1
29.451	40.787	22.72	10.43	0.1	0.1	0.01	TUBI 20806M001	2
16.593	49.206	20.32	15.03	0.12	0.17	-0.03	TUBO 11503M001	1
16.593	49.206	20.32	15.03	0.12	0.17	-0.03	TUBO 11503M001	2
24.071	35.533	7.3	-11.18	0.42	0.48	-0.03	TUC2 12617M003	1
12.356	43.119	20.19	16.85	0.04	0.04	-0.05	UNPG 12752M001	1
12.356	43.119	20.18	16.85	0.04	0.04	-0.05	UNPG 12752M001	2
12.356	43.119	20.18	16.85	0.04	0.04	-0.05	UNPG 12752M001	3
11.878	45.407	20.58	16.87	0.03	0.04	0	UPAD 12750M002	1
11.878	45.407	20.58	16.87	0.03	0.04	0	UPAD 12750M002	2
22.298	48.632	21.09	14.01	0.06	0.07	0.06	UZHL 12301M001	1
21.771	62.961	17.36	13.32	0.04	0.05	0	VAAS 10511M001	1
359.662	39.481	19.91	16.02	0.19	0.22	0.04	VALE 13439M001	1
359.662	39.481	19.91	16.02	0.19	0.22	0.04	VALE 13439M001	2

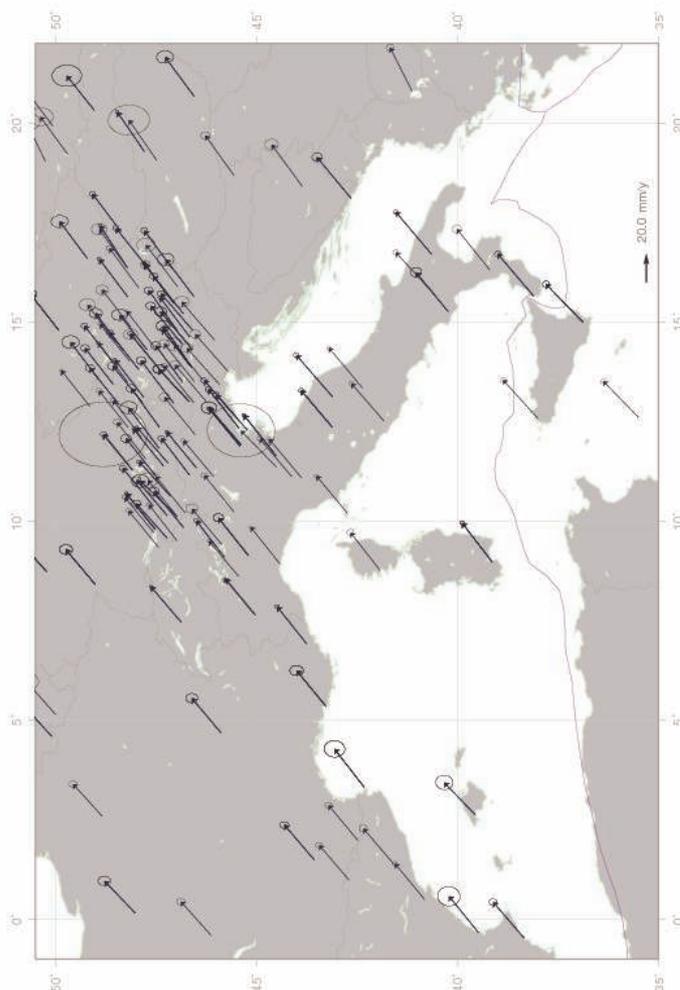
λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
31.031	70.336	16.48	12.66	0.08	0.1	0.05	VARD 10322M002	3
12.332	45.437	21.27	16.53	0.05	0.06	-0.01	VEVE 12741M001	1
12.332	45.437	21.28	16.53	0.05	0.06	-0.01	VEVE 12741M001	2
12.332	45.437	21.28	16.52	0.05	0.06	-0.01	VEVE 12741M001	3
16.560	64.698	14.68	14.85	0.04	0.05	-0.01	VIL0 10424M001	1
13.850	46.607	21.17	16.15	0.03	0.03	0.06	VIL1 88080M080	1
13.850	46.607	21.14	16.2	0.03	0.03	0.06	VILH 99069M069	1
356.048	40.444	20.23	16.57	0.08	0.08	0.04	VILL 13406M001	1
356.048	40.444	20.23	16.57	0.08	0.08	0.04	VILL 13406M001	2
356.048	40.444	20.22	16.57	0.08	0.08	0.04	VILL 13406M001	3
356.048	40.444	20.22	16.57	0.08	0.08	0.04	VILL 13406M001	4
18.367	57.654	18.01	13.7	0.03	0.04	0.06	VIS0 10423M001	1
13.850	46.607	21.14	16.12	0.03	0.03	0.05	VLCH 11036S001	1
13.850	46.607	21.16	16.14	0.03	0.03	0.05	VLCH 11036S001	2
14.626	46.661	21.51	16.1	0.03	0.04	0.05	VLKM 11040S001	1
14.626	46.661	21.5	16.1	0.03	0.04	0.05	VLKM 11040S001	2
25.299	54.653	20.45	13.6	0.11	0.16	-0.01	VLNS 10801M001	1
15.266	40.231	21.45	17.43	0.09	0.11	-0.05	VLUC 99070M070	1
15.266	40.231	21.44	17.43	0.09	0.11	-0.05	VLUC 99070M070	2
11.911	45.385	20.46	17.41	0.12	0.15	0	VOLT 99071M071	1
11.911	45.385	20.46	17.41	0.12	0.15	0	VOLT 99071M071	2
11.911	45.385	20.46	17.41	0.12	0.15	0	VOLT 99071M071	3
5.245	50.690	17.85	15.92	0.06	0.08	0.01	WARE 13114M001	1
5.245	50.690	17.85	15.92	0.06	0.08	0.01	WARE 13114M001	2
5.245	50.690	17.85	15.92	0.06	0.08	0.01	WARE 13114M001	3
12.101	54.170	17.58	15.33	0.13	0.19	0.01	WARN 14277M002	1
14.021	48.158	20.28	16.09	0.03	0.03	0.07	WELS 11044S001	1
16.373	48.219	20.84	15.1	0.11	0.15	0	WIEB 88069M069	1
16.373	48.219	22.89	14.69	0.03	0.04	0.1	WIEN 11035S001	1
16.373	48.219	22.88	14.64	0.03	0.04	0.11	WIEN 11035S001	2
14.302	47.723	19.12	14.84	0.11	0.15	0	WIND 88070S070	1
14.302	47.723	19.13	14.84	0.11	0.15	0	WIND 88070S070	2
17.062	51.113	19.45	14.75	0.05	0.07	0.02	WROC 12217M001	1
17.062	51.113	19.45	14.75	0.05	0.06	0.02	WROC 12217M001	2
17.062	51.113	19.45	14.75	0.05	0.07	0.02	WROC 12217M001	3
10.416	47.602	19.9	15.77	0.05	0.07	0.02	WRTH 88071S071	1
10.416	47.602	19.9	15.77	0.05	0.07	0.02	WRTH 88071S071	2
6.605	52.915	17.05	16.1	0.03	0.04	0.02	WSRT 13506M005	1
12.879	49.144	19.64	15.47	0.03	0.03	0.1	WTZR 14201M010	1
356.911	40.525	18.65	16.26	0.05	0.06	0.09	YEVE 13420M001	1
41.565	43.788	24.74	12.04	0.12	0.12	0.18	ZECK 12351M001	1

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
41.565	43.788	24.74	12.04	0.12	0.12	0.18	ZECK 12351M001	2
41.565	43.788	24.74	12.04	0.12	0.12	0.18	ZECK 12351M001	3
7.465	46.877	19.27	16.32	0.03	0.04	-0.02	ZIMM 14001M004	1
7.465	46.877	19.27	16.32	0.03	0.04	-0.02	ZIMM 14001M004	2
12.974	46.557	20.39	16.31	0.04	0.05	0.02	ZOUF 12763M001	1
36.759	55.699	21.76	11.48	0.07	0.1	0.08	ZWEN 12330M001	1
19.206	49.687	20.67	14.95	0.18	0.24	-0.02	ZYWI 12220S001	1

Visualizzazione del campo di velocità ITRF2005



Campo di velocità ITRF2005



Campo di velocità ITRF2005, regione mediterranea.

Allineamento del campo con ITRF2005

Una misura dell'allineamento del sistema di riferimento combinato è fornito dai residui delle velocità relativi ai siti comuni alla soluzione multianno EGU e alla soluzione ITRF2005. Il numero di siti comuni alle due soluzioni è 29. Osserviamo che 14 di essi sono stati usati nella definizione del sistema di riferimento, e quindi i residui non sono pienamente indicativi del livello di allineamento delle due soluzioni. La seguente tabella riassume i risultati:

Sito	$\Delta V_e mm/yr$	$\Delta V_n mm/yr$	Sito fiduciario
MATE 12734M008	0.09	0.04	NO
NYA1 10317M003	-1.14	0.23	NO
GLSV 12356M001	-0.63	0.21	SI
PDEL 31906M004	1.23	-0.30	NO
QAQ1 43007M001	-0.93	-0.73	NO
NICO 14302M001	-0.20	0.57	NO
REYK 10202M001	0.13	-0.52	NO
WTZR 14201M010	-0.51	-0.20	NO
TRAB 20808M001	-0.38	0.11	SI
SFER 13402M004	1.79	-0.09	NO
GRAS 10002M006	0.25	-0.42	SI
THU3 43001M002	-1.05	-1.56	NO
WSRT 13506M005	-0.33	-0.21	NO
VILL 13406M001	0.53	-0.10	NO
POLV 12336M001	-0.78	0.31	NO
CAGL 12725M003	-0.04	0.20	NO
RABT 35001M002	0.13	-0.20	SI
BRUS 13101M004	-0.09	-0.20	SI
RAMO 20703S001	-0.30	0.96	NO
TRO1 10302M006	1.19	0.53	SI
POTS 14106M003	-0.42	-0.07	SI
METS 10503S011	-0.68	-0.09	SI
NOT1 12717M004	-0.09	0.50	SI
BOR1 12205M002	-0.41	-0.15	NO
ZIMM 14001M004	-0.34	0.20	SI
ONSA 10402M004	-0.51	-0.18	NO
JOZE 12204M001	-0.21	-0.01	SI
MAS1 31303M002	0.64	-0.44	SI
HOFN 10204M002	-0.21	-0.42	SI

I valori medi dei residui delle componenti est e nord per l'insieme dei siti presenti nella precedente tabella sono:

Est (mm/yr)	Nord (mm/yr)
-0.11	-0.07

Possiamo perciò affermare che, dal punto di vista delle velocità, il sistema di riferimento combinato è consistente con ITRF a livello di 0.1 mm/yr .

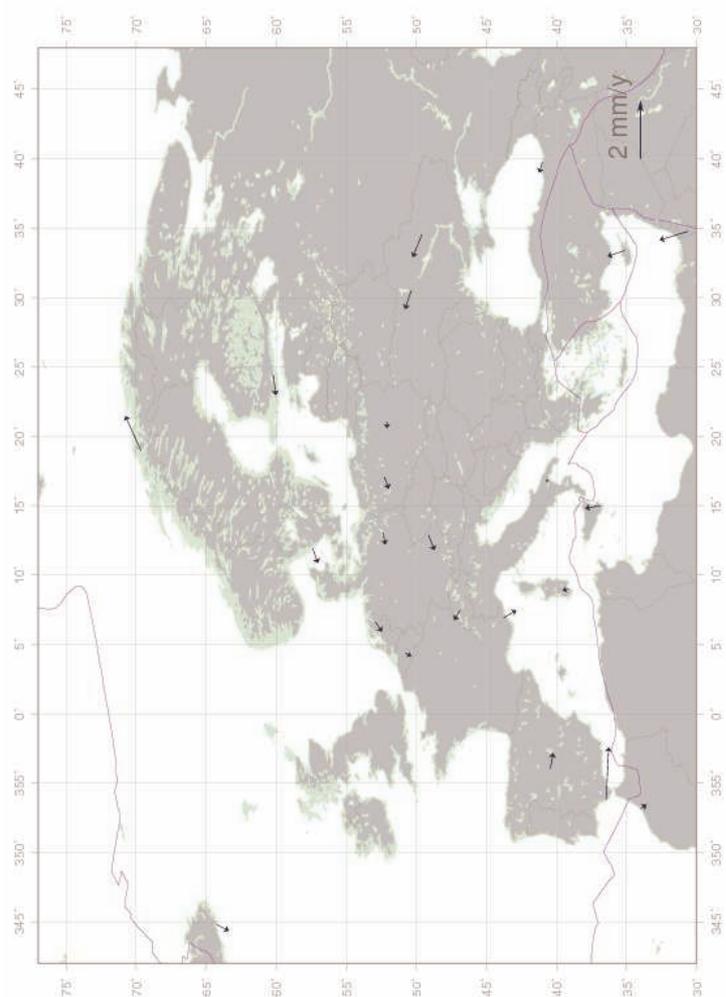


Figura 9.3: Velocità residue per i siti comuni alle soluzioni EGU e ITRF2005

9.4.3 Effetto del termine annuale.

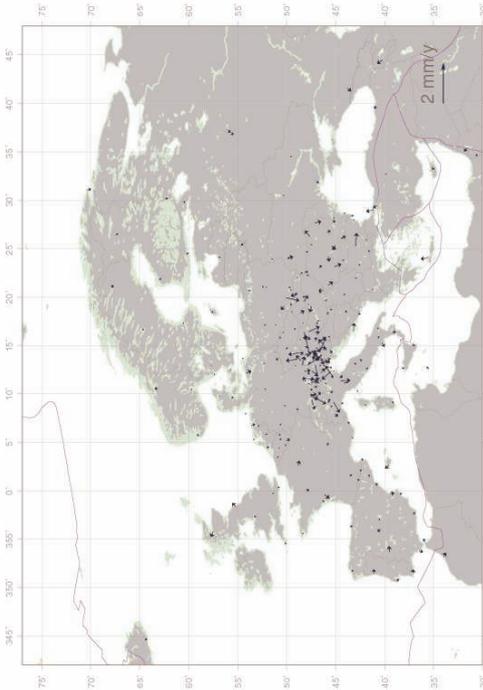
Le serie storiche dei residui di alcuni siti possono presentare un termine annuale, la cui origine è sconosciuta, che viene talvolta imputato ad errori presenti nelle orbite IGS oppure ad effetti atmosferici annuali. CATREF permette di correggere l'effetto di questo termine annuale sulla stima della velocità dei siti. L'equazione che modella questo effetto è una senoide. Per ciascuna componente topocentrica, quindi, la correzione da apportare ha la forma:

$$de = A_e \cos(2\pi f(t - t_0) + \phi_e) \quad (9.20)$$

$$dn = A_n \cos(2\pi f(t - t_0) + \phi_n) \quad (9.21)$$

$$dh = A_h \cos(2\pi f(t - t_0) + \phi_h) \quad (9.22)$$

dove $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{365.25}$ e i parametri $A_{e,n,h}$ e $\phi_{e,n,h}$ vengono stimate tramite un fit dei residui. L'effetto del termine annuale dipende dall'intervallo temporale su cui si estende la serie storica: per intervalli di tempo superiori a 2.5 anni ([47]), l'errore dovuto al termine annuale è trascurabile. Possiamo stimarlo empiricamente calcolando le velocità residue di una soluzione ottenuta applicando le correzioni date dalle eq. (9.20) con una soluzione ottenuta senza applicare tali correzioni. Il campo di velocità residuo è visualizzato dalla figura seguente.



Confronto tra due soluzioni che differiscono per la correzione del termine annuale. L'intervallo temporale minimo considerato è sufficiente perchè l'effetto sinusoidale sia reso trascurabile

La media delle velocità residue è di 0.01 mm/yr per la componente est e di -0.06

mm/yr per la componente nord. Riportiamo i valori stimati dell'ampiezza e della fase del termine annuale:

Domes code	A_e mm	ϕ_e grad	A_n mm	ϕ_n grad	A_h mm	ϕ_h grad
12767M001	0.63	127.09	0.47	235.10	0.91	322.75
13434M001	0.61	33.96	1.16	127.68	1.86	220.34
12766M001	2.32	234.47	0.36	189.73	0.86	270.52
10077M005	0.24	83.26	0.61	307.03	1.54	289.65
13433M001	0.24	36.71	0.63	49.09	1.36	261.44
13437M001	0.22	8.72	0.58	20.27	1.42	295.61
88001S001	0.30	178.10	0.88	195.13	1.79	356.38
20805M002	0.51	117.77	1.81	269.05	0.75	360.00
12757M001	0.30	247.33	0.44	264.38	0.64	99.67
88002M002	0.14	105.17	0.46	181.77	3.46	13.74
88003S003	0.55	175.34	0.24	111.03	1.09	10.80
88004S004	0.36	344.44	1.36	177.58	1.78	342.30
13431M001	0.52	56.38	1.08	128.15	3.06	235.66
88005M005	1.28	155.28	1.16	201.80	2.90	63.85
88006S006	0.97	160.37	0.79	210.03	2.65	156.66
12207M003	0.38	337.84	0.23	167.01	1.32	266.82
12207M002	0.08	138.01	0.19	3.05	1.87	23.33
12771M001	2.66	329.22	0.78	121.48	3.75	219.02
12205M002	0.45	95.93	0.22	102.05	0.63	61.47
14268M001	0.51	263.70	1.45	172.03	1.15	307.55
88008S008	1.04	11.06	1.62	311.04	1.28	185.05
99004M004	0.21	77.77	0.32	138.32	1.15	154.30
12762M001	0.93	20.32	1.84	174.66	0.83	329.94
10004M004	0.47	332.75	0.37	170.47	1.24	240.92
13101M004	0.65	357.35	0.41	97.66	1.65	353.43
11401M001	0.11	97.41	0.59	168.94	1.29	91.63
10101M003	0.20	353.58	0.33	62.73	0.96	318.38
11209M001	2.12	159.00	0.37	270.21	2.18	133.68
12751M001	0.43	31.03	1.21	346.99	2.21	189.44
13447M001	1.17	8.60	0.37	133.42	1.52	174.77
12725M003	0.83	136.50	0.75	147.21	1.14	286.68
12725M004	1.13	133.20	0.96	184.35	1.88	319.39
12754M001	0.19	53.04	0.39	239.60	1.02	31.60
13438M001	0.30	17.15	1.04	144.43	1.15	241.52
13909S001	0.37	47.55	0.76	125.90	0.90	209.00
99009M009	0.69	128.76	0.04	242.67	2.71	279.62
13449M001	0.91	82.29	1.34	120.36	0.59	20.02
10020M001	2.16	161.75	2.21	159.78	1.84	317.95
12761M001	2.06	139.16	0.66	189.68	1.13	161.35

Domes code	A_e mm	ϕ_e grad	A_n mm	ϕ_n grad	A_h mm	ϕ_h grad
99011M011	0.43	236.50	1.17	331.55	4.86	239.04
13432M001	0.28	170.74	0.81	196.98	1.42	267.89
13208S001	0.58	231.50	0.60	81.11	2.58	301.11
88010M010	0.20	84.25	0.41	194.47	1.48	38.70
13502M004	0.08	296.42	1.45	149.38	1.33	226.84
13112M001	0.93	330.96	0.50	103.74	0.83	291.58
88012S012	0.56	75.07	1.38	206.93	1.98	22.85
13113M001	0.07	282.27	0.58	93.53	1.13	30.21
20710S001	0.66	223.65	1.84	316.43	1.83	267.15
14108M001	2.09	163.59	0.71	132.22	1.89	77.36
11901M001	0.96	295.87	0.98	136.53	0.52	107.16
13410M001	2.28	149.91	1.03	169.75	1.98	295.34
13533M001	0.07	94.86	0.96	154.95	1.39	32.46
12721M002	0.11	116.82	0.31	309.01	0.41	104.51
13435M001	1.44	304.08	0.58	202.19	2.81	147.13
14258M003	0.59	246.69	0.41	170.96	1.50	70.60
88014S014	0.33	155.43	2.51	179.60	0.93	263.09
88015S015	0.67	350.37	1.77	173.72	0.95	21.48
88016S016	0.46	74.79	0.30	189.45	0.83	173.43
88017S017	1.42	360.00	2.66	168.42	0.40	40.98
88018S018	0.47	84.48	0.81	182.03	0.76	306.82
13902M001	0.79	321.62	0.29	129.05	2.07	194.18
11515M001	0.40	156.69	0.75	37.82	1.54	9.32
12712M002	0.56	346.12	0.72	331.19	0.74	190.25
12356M001	1.15	140.19	1.31	195.00	2.29	107.39
88019M019	0.44	44.58	1.92	184.99	1.35	7.81
11502M002	0.49	56.46	0.34	205.14	0.75	333.43
88020M020	0.51	157.74	1.27	200.09	0.63	158.63
88021M021	0.18	209.92	0.33	212.36	1.55	117.18
10002M006	0.10	313.57	0.40	283.13	0.94	302.30
11001M002	0.28	171.89	0.19	237.14	0.97	88.31
88023S023	1.60	357.44	0.92	176.06	1.77	71.37
14501M001	0.38	89.20	0.65	223.16	0.43	190.85
11045M001	1.24	151.38	3.08	189.61	3.34	354.35
14264M001	0.64	271.58	0.52	347.51	1.37	246.75
13212M007	0.94	184.64	0.44	133.18	1.15	313.65
13212M010	0.84	307.26	0.81	139.65	0.28	54.82
11006S003	1.30	297.11	3.88	292.46	3.05	28.05
11039S001	0.55	70.71	0.90	233.40	3.27	351.71
14202M003	0.70	208.66	0.50	34.83	1.18	17.56
10204M002	0.96	101.24	1.20	318.59	3.51	7.71
12724S001	1.01	4.19	0.23	355.87	0.48	70.28

Domes code	A_e mm	ϕ_e grad	A_n mm	ϕ_n grad	A_h mm	ϕ_h grad
99025M025	3.06	336.82	0.96	353.74	0.78	331.77
13221S001	1.33	181.71	0.80	8.74	2.73	281.90
20807M001	0.14	97.51	2.09	297.78	2.19	106.29
10512M001	0.40	336.51	0.56	91.56	1.86	59.93
12204M002	0.11	39.47	0.68	193.41	1.21	215.42
12204M001	0.58	347.99	0.57	178.72	1.54	5.89
14216M001	1.34	167.59	1.45	163.91	1.20	48.02
12219S001	0.57	149.70	0.70	299.04	1.08	89.41
10422M001	0.84	341.70	0.65	92.93	1.46	179.31
10403M002	1.14	322.34	0.58	50.27	1.65	3.33
88076M076	0.37	109.66	0.82	219.23	2.21	308.97
88025S025	0.56	74.59	0.85	240.27	2.30	42.91
14214M002	0.36	239.55	0.29	126.64	1.73	14.42
88077M077	2.19	23.05	0.88	0.00	3.98	0.08
88078M078	2.78	355.31	0.96	226.18	0.86	293.44
88079M079	2.66	353.05	1.12	239.62	0.82	90.33
88027M027	0.45	312.89	0.90	329.15	1.91	356.37
88028S028	0.21	209.25	0.57	167.83	4.58	23.97
13504M003	0.74	321.08	0.50	79.75	0.92	68.40
12218M001	0.75	176.48	2.63	174.37	0.55	142.76
11043S001	0.27	15.92	0.17	286.76	1.77	342.50
11038S001	0.74	95.36	0.88	219.42	2.05	337.75
13903M001	0.63	8.54	0.39	121.91	0.93	265.52
12209M001	0.30	173.84	0.04	44.81	0.79	157.75
12706M002	0.11	206.33	0.31	228.17	1.90	309.74
88030S030	0.58	150.32	0.99	316.90	1.84	27.36
12768M001	0.28	47.37	0.35	196.00	2.58	195.28
88031S031	0.28	323.69	1.04	177.31	2.04	23.63
88033S033	0.63	131.47	1.00	208.13	1.73	6.05
88035S035	0.62	37.08	0.45	283.48	1.81	330.97
88075M075	0.48	313.87	2.79	203.26	6.67	4.76
88036S036	0.68	360.00	0.96	165.54	1.43	360.00
11033S001	0.71	130.18	0.18	335.49	0.73	162.20
13436M001	0.44	86.39	0.23	284.35	1.84	332.53
81701M001	1.27	122.99	1.98	127.79	1.80	123.95
10023M001	0.38	245.35	0.51	6.60	1.47	313.59
13444M001	0.83	181.01	0.63	27.69	2.38	323.97
10091M001	1.07	162.79	1.16	102.32	0.87	262.18
10405M002	0.11	298.04	0.41	30.09	0.67	113.35
88040S040	0.88	31.99	0.73	237.49	1.31	126.15
10073M008	0.21	192.97	0.17	8.37	1.14	187.77
31303M002	0.59	50.74	1.70	124.42	1.17	346.75

Domes code	A_e mm	ϕ_e grad	A_n mm	ϕ_n grad	A_h mm	ϕ_h grad
12734M008	0.55	5.49	0.45	327.87	1.01	243.62
12765M001	0.20	104.84	0.14	173.37	0.44	183.18
12309M002	0.10	184.24	0.68	346.91	3.35	150.59
12711M003	0.96	270.95	0.91	82.55	1.37	180.79
99033M033	0.69	91.26	0.84	25.47	4.33	354.40
10503S011	0.38	229.90	0.10	179.63	1.19	117.10
12335M001	0.42	185.48	0.41	260.50	0.65	225.75
12758M001	0.77	187.74	0.56	240.57	1.55	293.62
10092M001	0.91	5.10	0.64	127.49	0.84	20.96
11507M001	0.39	175.97	0.29	238.14	3.08	40.25
13299S001	0.63	269.31	1.07	24.19	1.83	307.15
12764M001	0.17	89.95	0.72	271.14	2.16	234.42
12711M008	0.08	353.98	0.88	125.55	1.65	122.19
11030M001	0.84	1.36	2.46	178.53	0.37	110.41
88041S041	2.00	153.84	0.84	197.51	1.23	154.02
13273M103	0.45	151.39	0.26	59.90	2.07	330.81
14302M001	0.65	182.24	2.72	309.01	2.33	256.02
12717M004	0.88	205.05	1.56	313.34	2.40	305.68
12717M003	0.34	217.52	1.89	307.75	2.22	284.06
12759M001	0.54	37.58	1.56	347.37	0.32	38.40
13234M003	0.49	173.32	0.20	7.80	1.32	317.39
12312M001	0.85	106.85	0.78	319.43	0.38	229.16
10317M003	1.27	308.86	1.35	59.05	1.57	216.29
11208M001	0.76	189.76	1.36	340.87	1.44	352.54
14208M003	0.91	163.34	0.59	149.43	1.37	68.18
14208M001	0.33	193.40	0.63	176.28	0.83	139.82
14208M004	0.20	88.81	0.45	348.17	4.56	6.02
10402M004	0.59	284.65	0.32	329.94	1.63	328.87
15601M001	0.48	95.13	0.58	321.74	3.08	25.79
11207M001	0.68	156.51	0.31	305.70	0.79	53.76
11902M001	0.38	163.19	1.07	206.96	1.21	20.34
10307M001	0.60	315.54	0.87	8.81	0.29	133.33
12750S001	1.67	138.56	2.93	344.84	1.27	356.18
88044S044	0.71	28.27	0.52	195.61	0.92	149.68
11029S001	0.20	36.87	0.60	177.67	7.51	343.60
99045M045	1.67	360.00	0.75	210.17	2.44	231.49
31906M004	1.65	154.00	1.58	149.09	4.70	201.00
11206M006	0.23	312.55	0.51	232.24	0.87	94.11
11005S002	0.63	357.27	0.57	154.45	0.39	71.57
88045S045	1.04	5.65	1.00	167.12	0.64	299.87
12336M001	0.14	178.77	0.58	226.38	0.31	31.45
14106M003	0.17	247.85	0.21	112.90	1.41	77.50

Domes code	A_e mm	ϕ_e grad	A_n mm	ϕ_n grad	A_h mm	ϕ_h grad
12760M001	0.53	339.51	0.32	130.50	1.04	40.69
14234M001	0.39	350.40	1.04	155.43	2.48	352.63
43007M001	3.60	180.37	0.92	218.32	1.01	126.24
35001M002	0.62	350.93	1.76	136.31	1.03	160.29
20703S001	1.57	287.60	3.37	310.90	4.73	229.77
13102M001	0.56	265.73	0.94	111.83	2.11	355.47
10202M001	1.05	237.82	1.28	344.27	3.56	324.71
88048M048	1.68	350.00	0.20	223.70	0.41	326.60
12302M002	0.50	308.26	0.37	107.71	1.51	164.80
88049M049	0.33	97.52	1.18	191.77	0.08	262.30
88050S050	0.14	165.79	1.79	187.77	0.53	46.72
12774M001	0.53	140.46	0.34	184.62	1.39	331.05
99050M050	0.38	360.00	1.22	211.64	0.43	210.21
88051M051	0.47	150.53	2.07	177.73	2.45	8.17
14281M001	0.76	332.90	0.72	151.48	1.19	117.93
11031S001	0.49	30.95	0.77	173.06	2.06	359.93
99053M053	0.81	150.11	0.42	348.15	1.78	282.58
13402M004	0.92	28.13	1.13	144.50	1.41	161.21
10090M001	0.27	315.62	0.78	142.09	1.27	191.97
10426M001	0.43	344.93	0.56	43.59	1.70	175.60
10114M001	0.61	254.11	0.41	107.97	0.84	306.73
10513M001	0.85	333.43	0.76	66.80	1.53	181.11
11101M002	0.62	169.77	1.11	242.24	0.65	121.86
88064S064	5.00	97.04	3.74	87.94	3.15	51.36
10425M001	0.41	290.69	0.32	37.46	1.02	315.14
11801S001	0.94	327.79	1.29	305.77	1.38	128.59
10330M001	0.82	298.34	0.57	337.56	0.77	275.44
88065M065	1.06	160.51	0.70	168.29	0.88	357.66
11041S001	0.86	316.88	0.51	230.15	0.85	46.34
10113M001	0.54	283.29	0.29	110.73	1.42	300.40
12366M001	0.27	132.41	1.16	185.97	1.16	93.78
12350M001	0.51	236.78	0.25	168.13	1.14	93.51
13534M001	0.94	265.83	0.52	68.37	0.89	230.41
99061M061	0.25	345.69	1.00	59.07	1.62	295.36
43001M001	1.02	185.78	2.24	295.12	2.81	229.46
43001M002	2.75	187.56	0.85	310.95	4.39	186.76
99062M062	0.50	156.45	0.73	281.24	1.78	245.56
10003M009	0.33	92.78	1.80	161.58	1.07	333.23
12724M002	1.55	359.56	0.90	173.37	1.45	159.41
10003M004	0.08	124.64	0.60	147.46	0.70	128.42
20808M001	0.77	166.75	1.37	248.49	2.86	51.20
88067S067	0.53	127.66	0.72	257.29	0.33	188.92
88068S068	0.28	89.64	0.41	266.00	1.84	164.13

Domes code	A_e mm	ϕ_e grad	A_n mm	ϕ_n grad	A_h mm	ϕ_h grad
12753M001	0.37	149.97	0.21	76.42	2.22	187.35
11047M001	0.45	121.21	1.16	189.16	3.38	199.64
12718M003	0.94	86.37	0.60	332.76	1.45	293.12
10302M006	1.24	311.93	1.19	66.76	0.98	129.65
10331M001	1.27	299.86	0.89	33.02	0.89	4.60
20806M001	0.92	231.95	1.06	341.40	1.74	31.99
11503M001	0.21	211.19	0.71	287.29	2.00	90.23
12617M003	1.29	187.75	1.09	296.00	0.72	17.49
12752M001	1.02	11.55	0.28	111.07	1.18	350.95
12750M002	1.48	143.22	0.61	23.05	2.33	218.11
12301M001	0.09	84.75	0.44	317.76	0.70	35.24
10511M001	0.35	316.76	0.59	64.82	0.97	253.47
10322M002	1.96	10.53	1.70	85.14	5.15	182.86
13439M001	1.25	129.92	0.83	110.66	1.87	298.85
12741M001	2.12	130.52	2.32	347.15	4.56	212.75
10424M001	0.43	340.98	0.65	29.15	0.67	341.70
88080M080	0.84	100.40	0.94	223.82	4.78	265.03
99069M069	1.01	82.46	1.37	154.05	0.74	164.06
13406M001	0.55	332.98	1.13	138.43	1.66	240.06
10423M001	0.23	341.72	0.24	57.16	0.89	242.72
11036S001	1.00	82.85	1.40	165.62	2.13	42.49
11040S001	1.42	334.46	0.92	187.04	1.78	16.00
10801M001	0.42	320.79	0.28	171.45	2.13	124.33
99070M070	0.44	74.78	0.04	347.84	0.43	271.39
99071M071	0.68	126.60	0.14	123.35	3.22	311.74
13114M001	0.18	216.10	1.01	131.68	0.86	129.31
14277M002	0.72	331.29	1.01	145.13	0.85	79.20
11044S001	1.44	9.57	3.24	180.23	1.12	160.49
88069M069	1.68	132.21	1.40	241.30	8.46	135.25
11035S001	1.97	156.70	0.97	228.65	2.60	143.03
88070S070	0.93	61.03	0.52	213.24	3.30	304.58
12217M001	0.57	348.06	0.20	219.19	0.86	141.43
88071S071	0.41	331.95	1.04	172.42	1.52	357.69
13506M005	0.32	262.05	0.29	64.63	2.26	312.13
14201M010	0.65	357.82	0.64	171.04	0.69	227.59
13420M001	0.22	137.55	0.39	128.86	1.13	343.62
12351M001	1.22	127.68	1.25	301.05	1.45	50.02
14001M004	0.38	353.89	0.78	163.46	1.45	8.21
12763M001	1.12	115.06	0.69	272.17	0.76	301.21
12330M001	0.85	178.73	0.08	163.58	3.25	68.40
12220S001	0.10	191.33	0.68	242.36	1.46	36.75

9.4.4 Trasformazione ITRF2005 - ETRF

La trasformazione delle velocità da ITRF2005 a ETRS consente di evidenziare quella parte del moto dei siti che non dipende dal movimento rigido della placca europea. La formula di trasformazione è basata sulla composizione di una traslazione e di una rotazione:

$$\begin{pmatrix} \dot{X}^{etrs} \\ \dot{Y}^{etrs} \\ \dot{Z}^{etrs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}^{itrs} \\ \dot{Y}^{itrs} \\ \dot{Z}^{itrs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{T}_x \\ \dot{T}_y \\ \dot{T}_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_3 & \dot{R}_2 \\ \dot{R}_3 & 0 & -\dot{R}_1 \\ -\dot{R}_2 & \dot{R}_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X^{itrs} \\ Y^{itrs} \\ Z^{itrs} \end{pmatrix} \quad (9.23)$$

dove per le derivate dei parametri di traslazione e rotazione sono stati usati i seguenti valori:

\dot{T}_x cm/yr	\dot{T}_y cm/yr	\dot{T}_z cm/yr
-0.02	-0.05	-0.032
\dot{R}_1 mas/yr	\dot{R}_2 mas/yr	\dot{R}_3 mas/yr
0.054	0.518	-0.781

I valori sono stati presi da ([37]).

9.4.5 Campo di velocità ETRF

Riportiamo i valori del campo di velocità combinato EGU, espressi nel sistema di riferimento ETRF. Il campo di velocità spresso in ITRF è caratterizzato dal fatto che il modo rigido della placca è stato sottratto. Vederemo nei capitoli successivi che tale campo potrà essere utilizzato per lo studio delle deformazioni crostali.

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
13.515	46.548	0.08	1.18	0.08	0.1	0	ACOM 12767M001	1
351.601	43.364	4.46	-0.12	0.06	0.07	0.02	ACOR 13434M001	1
12.175	46.527	0.24	1.34	0.08	0.1	0.03	AFAL 12766M001	1
8.763	41.927	0.02	0.52	0.06	0.07	-0.02	AJAC 10077M005	1
359.519	38.339	-0.16	0.83	0.07	0.08	0.08	ALAC 13433M001	1
359.519	38.339	-0.16	0.83	0.07	0.08	0.08	ALAC 13433M001	2
357.541	36.853	-1.24	-0.29	0.07	0.08	0.13	ALME 13437M001	1
14.871	48.122	-0.02	0.57	0.09	0.12	0.01	AMST 88001S001	1
32.758	39.887	-24.88	0.09	0.09	0.08	0.08	ANKR 20805M002	1
32.758	39.887	-24.88	0.09	0.09	0.08	0.08	ANKR 20805M002	2
32.758	39.887	-24.88	0.09	0.09	0.07	0.08	ANKR 20805M002	3
13.35	42.368	0.5	2.95	0.03	0.03	-0.11	AQUI 12757M001	1
10.205	46.776	0.17	0.56	0.05	0.06	-0.01	ARDE 88002M002	1
12.35	48.195	0.23	0.41	0.05	0.06	0.03	ASCH 88003S003	1
11.568	47.761	0.19	0.11	0.05	0.07	0.01	BADT 88004S004	1
1.401	41.6	-0.31	0.32	0.07	0.08	0	BELL 13431M001	1
14.794	46.59	-0.83	2.06	0.06	0.07	0	BLE1 88005M005	1
14.794	46.59	-0.82	2.05	0.06	0.07	0	BLE2 88006S006	1
21.035	52.475	-0.2	0.13	0.05	0.07	0.06	BOGI 12207M003	1
21.035	52.476	-0.19	0.13	0.05	0.07	0.06	BOGO 12207M002	1
21.035	52.476	-0.2	0.13	0.05	0.07	0.06	BOGO 12207M002	2
11.357	44.5	-0.6	3.9	0.52	0.65	0.02	BOLG 12771M001	1
17.073	52.277	-0.45	-0.05	0.05	0.07	0.05	BOR1 12205M002	1
17.073	52.277	-0.44	-0.05	0.05	0.07	0.05	BOR1 12205M002	2
6.747	53.564	-0.03	-0.46	0.05	0.06	-0.01	BORK 14268M001	1
13.542	46.333	-0.93	0.49	0.12	0.16	-0.01	BOVE 88008S008	1
11.113	44.122	0.32	2.11	0.04	0.05	-0.01	BRAS 99004M004	1
10.233	45.565	-0.08	0.64	0.05	0.06	0.01	BRIX 12762M001	1
355.503	48.38	0.23	0.26	0.08	0.1	0	BRST 10004M004	1
355.503	48.38	0.23	0.26	0.08	0.1	0	BRST 10004M004	2
4.359	50.798	-0.72	-0.19	0.04	0.05	-0.01	BRUS 13101M004	1
4.359	50.798	-0.72	-0.19	0.04	0.05	-0.01	BRUS 13101M004	2
26.126	44.464	-0.5	-0.94	0.06	0.06	0.11	BUCU 11401M001	1
12.5	55.739	-0.38	-0.3	0.09	0.14	0.02	BUDP 10101M003	1
19.057	47.481	0.82	0.6	0.29	0.4	-0.02	BUTE 11209M001	1
11.337	46.499	-0.4	0.75	0.03	0.04	0	BZRG 12751M001	1
11.337	46.499	-0.4	0.75	0.03	0.03	0	BZRG 12751M001	3
353.658	39.479	-0.29	0.69	0.13	0.15	0.06	CACE 13447M001	1
8.973	39.136	0.02	0.75	0.03	0.04	-0.1	CAGL 12725M003	1
8.973	39.136	0.01	0.78	0.03	0.04	-0.11	CAGL 12725M003	2
8.973	39.136	0.01	0.79	0.04	0.04	-0.1	CAGZ 12725M004	1
13.124	43.112	1.62	4.46	0.04	0.05	-0.03	CAME 12754M001	1

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
13.124	43.112	1.62	4.46	0.04	0.05	-0.03	CAME 12754M001	2
356.202	43.472	-0.32	1.17	0.08	0.09	0.04	CANT 13438M001	1
350.581	38.693	0.05	0.78	0.07	0.07	0.08	CASC 13909S001	1
12.583	45.479	0.12	2.8	0.05	0.06	0.01	CAVA 99009M009	1
12.583	45.479	0.12	2.8	0.05	0.06	0.01	CAVA 99009M009	2
354.689	35.896	-4.23	1.21	0.33	0.38	0.06	CEUT 13449M001	1
354.689	35.896	-4.23	1.21	0.33	0.38	0.06	CEUT 13449M001	2
359.592	46.133	0.64	0.34	0.06	0.08	0.03	CHIZ 10020M001	1
9.096	45.802	0.15	-0.39	0.04	0.05	0	COMO 12761M001	1
9.096	45.802	0.16	-0.39	0.04	0.05	0	COMO 12761M001	2
16.31	39.201	-0.17	2.91	0.07	0.08	-0.1	COSE 99011M011	1
3.316	42.319	1.33	0.27	0.16	0.2	0.02	CREU 13432M001	1
3.316	42.319	1.33	0.27	0.16	0.2	0.03	CREU 13432M001	2
3.316	42.319	1.33	0.27	0.16	0.2	0.03	CREU 13432M001	3
357.36	53.345	0.47	-0.17	0.19	0.28	0.01	DARE 13208S001	1
9.844	46.813	-0.09	0.52	0.08	0.1	-0.03	DAVO 88010M010	1
9.844	46.813	-0.09	0.52	0.08	0.1	-0.03	DAVO 88010M010	2
4.388	51.986	-0.15	-0.18	0.05	0.06	-0.01	DELFI 13502M004	1
4.388	51.986	-0.15	-0.18	0.05	0.06	-0.01	DELFI 13502M004	3
3.4	50.934	0.28	0.35	0.09	0.12	0	DENT 13112M001	1
3.4	50.934	0.28	0.35	0.09	0.12	0	DENT 13112M001	3
3.4	50.934	0.28	0.35	0.09	0.12	0	DENT 13112M001	4
3.4	50.934	0.28	0.35	0.09	0.12	0	DENT 13112M001	5
15.213	46.814	-0.16	1.33	0.06	0.08	0	DLBG 88012S012	1
15.213	46.814	-0.17	1.34	0.06	0.08	0	DLBG 88012S012	2
4.595	50.095	-0.94	-0.71	0.05	0.07	-0.01	DOUR 13113M001	1
4.595	50.095	-0.92	-0.71	0.05	0.07	-0.01	DOUR 13113M001	2
35.392	31.593	-2.98	8.83	0.16	0.13	-0.1	DRAG 20710S001	1
13.73	51.03	0.23	0.86	0.09	0.12	0.01	DRES 14108M001	1
13.73	51.03	0.24	0.86	0.09	0.12	0.01	DRES 14108M001	2
18.11	42.65	0.29	3.76	0.08	0.1	-0.05	DUBR 11901M001	1
18.11	42.65	0.29	3.76	0.08	0.1	-0.05	DUBR 11901M001	2
0.492	40.821	0.16	0.12	0.04	0.04	0.09	EBRE 13410M001	1
5.684	50.758	-0.36	0.26	0.05	0.07	0	EIJS 13533M001	1
5.684	50.758	-0.36	0.26	0.05	0.07	0	EIJS 13533M001	2
10.211	42.753	-0.61	1.11	0.03	0.03	-0.08	ELBA 12721M002	1
0.976	42.694	0.06	0.27	0.06	0.07	0.04	ESCO 13435M001	1
6.764	50.674	-0.09	0.64	0.06	0.08	0	EUSK 14258M003	1
6.764	50.674	-0.1	0.63	0.06	0.08	0	EUSK 14258M003	2
15.883	46.953	2.12	2.35	0.14	0.18	0.01	FLDB 88014S014	1
9.581	47.231	-0.78	1.12	0.06	0.09	0	FLDK 88015S015	1
9.581	47.231	-0.78	1.12	0.07	0.09	0	FLDK 88015S015	2

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
13.564	48.936	0.35	-0.09	0.12	0.17	0.01	FNST 88016S016	1
13.564	48.936	0.35	-0.09	0.12	0.17	0.01	FNST 88016S016	2
12.978	47.839	-0.11	0.96	0.07	0.1	0.01	FRLG 88017S017	1
12.978	47.839	-0.11	0.97	0.07	0.1	0.01	FRLG 88017S017	2
14.503	48.509	0.16	0.16	0.12	0.16	0	FRST 88018S018	1
351.411	41.106	0.42	0.53	0.11	0.12	0.04	GAIA 13902M001	1
20.323	49.035	-2.41	0.45	0.21	0.29	-0.02	GANP 11515M001	1
20.323	49.035	-2.41	0.45	0.21	0.29	-0.02	GANP 11515M001	2
8.921	44.419	0	0.34	0.03	0.03	-0.04	GENO 12712M002	1
30.497	50.364	-1.38	-0.03	0.05	0.05	0.27	GLSV 12356M001	1
13.801	47.921	0.2	0.78	0.05	0.06	0.01	GMND 88019M019	1
13.801	47.921	0.2	0.78	0.05	0.07	0.01	GMND 88019M019	2
14.786	49.914	-0.12	0.33	0.09	0.12	-0.01	GOPE 11502M002	1
14.786	49.914	-0.12	0.33	0.09	0.12	-0.01	GOPE 11502M002	2
14.786	49.914	-0.12	0.33	0.09	0.12	-0.01	GOPE 11502M002	3
15.493	47.067	-0.09	0.3	0.08	0.1	0	GRAA 88020M020	1
15.493	47.067	0.28	0.78	0.03	0.03	0.09	GRAB 88021M021	1
15.493	47.067	0.28	0.77	0.03	0.03	0.08	GRAB 88021M021	2
6.921	43.755	0.31	0.33	0.04	0.05	-0.01	GRAS 10002M006	1
6.921	43.755	0.31	0.33	0.04	0.05	-0.01	GRAS 10002M006	2
15.493	47.067	0.49	0.74	0.03	0.04	0.07	GRAZ 11001M002	1
15.493	47.067	0.52	0.74	0.03	0.04	0.07	GRAZ 11001M002	2
15.493	47.067	0.52	0.74	0.03	0.04	0.07	GRAZ 11001M002	3
15.493	47.067	0.52	0.73	0.04	0.04	0.06	GRAZ 11001M002	4
11.143	47.509	0.42	0.69	0.08	0.1	0.01	GRMP 88023S023	1
11.143	47.509	0.42	0.69	0.08	0.1	0.01	GRMP 88023S023	2
14.544	46.048	0.1	2.72	0.11	0.14	-0.02	GSR1 14501M001	2
16.319	47.074	0.44	0.75	0.05	0.06	0.02	GUES 11045M001	1
16.319	47.074	0.45	0.76	0.05	0.06	0.02	GUES 11045M001	2
7.893	54.174	-0.48	0.26	0.04	0.05	0.01	HELG 14264M001	1
0.336	50.867	-0.3	0.24	0.06	0.09	0	HERS 13212M007	1
0.336	50.867	-0.3	0.24	0.06	0.09	0	HERS 13212M007	2
0.336	50.867	-0.3	0.24	0.06	0.09	0	HERS 13212M007	3
0.334	50.867	-0.3	0.24	0.06	0.09	0	HERT 13212M010	1
11.386	47.313	0.37	0.97	0.03	0.03	0.04	HFLK 11006S003	1
11.386	47.313	0.36	0.96	0.03	0.03	0.04	HFLK 11006S003	2
13.771	47.377	0.06	1.46	0.04	0.05	0.02	HKBL 11039S001	1
13.771	47.377	0.05	1.46	0.04	0.05	0.02	HKBL 11039S001	2
10.476	53.051	-0.22	-0.11	0.08	0.12	0	HOBU 14202M003	1
10.476	53.051	-0.22	-0.11	0.08	0.12	0	HOBU 14202M003	2
344.802	64.267	4.41	-1.28	0.07	0.07	0	HOFN 10204M002	1
344.802	64.267	4.41	-1.28	0.07	0.07	0	HOFN 10204M002	2

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
7.639	45.015	-0.11	0.5	0.03	0.03	-0.02	IENG 12724S001	1
12.515	41.828	-0.85	2.4	0.04	0.04	-0.1	INGR 99025M025	1
355.781	57.486	0.13	0.28	0.2	0.29	-0.01	INVE 13221S001	1
29.019	41.104	0.71	-2.94	0.1	0.1	0	ISTA 20807M001	1
29.019	41.104	0.71	-2.93	0.1	0.1	0	ISTA 20807M001	2
30.096	62.391	-0.21	-1.03	0.04	0.05	-0.01	JOEN 10512M001	1
21.032	52.098	-0.09	-0.13	0.04	0.05	0.13	JOZ2 12204M002	1
21.032	52.097	-0.09	-0.13	0.04	0.05	0.14	JOZE 12204M001	1
21.032	52.097	-0.09	-0.13	0.04	0.05	0.13	JOZE 12204M001	2
8.411	49.011	0.18	0.32	0.09	0.13	0	KARL 14216M001	1
8.411	49.011	0.18	0.32	0.09	0.13	0	KARL 14216M001	2
8.411	49.011	0.18	0.32	0.09	0.13	0	KARL 14216M001	3
19.036	50.253	0.94	-4.28	0.18	0.25	-0.02	KATO 12219S001	1
21.06	67.878	-0.88	0.15	0.05	0.05	0.02	KIRO 10422M001	1
20.968	67.857	-1.15	0.68	0.05	0.06	0.03	KIRU 10403M002	1
13.771	47.377	-0.18	1.41	0.1	0.14	-0.06	KKB1 88076M076	1
14.319	46.607	-0.1	1.9	0.09	0.11	0	KLAG 88025S025	1
14.319	46.607	-0.1	1.9	0.09	0.11	0	KLAG 88025S025	2
14.319	46.607	-0.1	1.9	0.09	0.11	0	KLAG 88025S025	3
8.73	50.22	-0.45	0.42	0.08	0.12	0	KLOP 14214M002	1
8.73	50.22	-0.45	0.42	0.08	0.12	0	KLOP 14214M002	2
8.73	50.22	-0.45	0.42	0.08	0.11	0	KLOP 14214M002	3
13.009	46.674	-2.79	1.21	0.09	0.12	0.01	KOE1 88077M077	1
13.009	46.674	-2.77	1.21	0.09	0.12	0.01	KOE2 88078M078	1
13.009	46.674	-2.76	1.21	0.09	0.11	0.01	KOE2 88078M078	2
13.009	46.674	-2.75	1.21	0.09	0.11	0.01	KOE3 88079M079	1
10.115	46.974	-0.35	4.49	0.13	0.17	0.02	KOP1 88027M027	1
10.115	46.974	-0.35	4.49	0.13	0.17	0.02	KOP1 88027M027	2
10.116	46.974	0.08	0.45	0.14	0.19	-0.01	KOP2 88028S028	1
5.81	52.178	0.1	0.47	0.04	0.05	-0.02	KOSG 13504M003	1
5.81	52.178	0.1	0.47	0.04	0.05	-0.02	KOSG 13504M003	2
19.92	50.066	-0.35	0.78	0.13	0.18	-0.01	KRAW 12218M001	1
10.627	47.146	-1.09	1.41	0.04	0.04	0	KRBG 11043S001	1
10.627	47.146	-1.08	1.41	0.04	0.04	0	KRBG 11043S001	2
12.359	47.418	1.15	-0.03	0.07	0.1	-0.01	KTZB 11038S001	1
12.359	47.418	1.14	-0.03	0.07	0.1	-0.01	KTZB 11038S001	2
351.332	37.099	-1.3	1.43	0.13	0.13	0.09	LAGO 13903M001	1
20.67	53.892	-0.78	0.02	0.06	0.08	0.03	LAMA 12209M001	1
20.67	53.892	-0.77	0.02	0.06	0.08	0.03	LAMA 12209M001	2
12.606	35.5	-2.96	3.81	0.04	0.05	-0.27	LAMP 12706M002	1
13.893	46.631	1.39	-0.06	0.1	0.13	0	LANK 88030S030	1
13.893	46.631	1.39	-0.06	0.1	0.13	0	LANK 88030S030	2

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
13.893	46.631	1.39	-0.06	0.1	0.13	0	LANK 88030S030	3
9.407	45.857	-0.15	0.84	0.09	0.12	0.02	LEC1 12768M001	1
10.139	47.224	-0.21	1.04	0.06	0.08	0	LECH 88031S031	1
10.139	47.224	-0.21	1.04	0.06	0.08	0	LECH 88031S031	2
14.786	46.971	1.3	0.45	0.07	0.08	0.01	LEON 88033S033	1
14.786	46.971	1.31	0.45	0.07	0.09	0.01	LEON 88033S033	2
13.477	46.83	-0.2	-0.46	0.07	0.09	0.01	LIES 88035S035	1
13.477	46.83	-0.2	-0.46	0.07	0.09	0.01	LIES 88035S035	2
14.291	48.292	1.93	-3.48	1.68	2.24	-0.08	LIN1 88075M075	1
9.708	47.559	-0.13	0.26	0.04	0.05	0.01	LIND 88036S036	1
14.283	48.31	0.19	-0.05	0.09	0.12	-0.01	LINZ 11033S001	1
14.283	48.31	0.19	-0.05	0.09	0.12	-0.01	LINZ 11033S001	2
1.973	42.478	-0.01	-0.06	0.06	0.07	0.04	LLIV 13436M001	1
342.106	28.764	-2.65	1.42	0.22	0.21	0.12	LPAL 81701M001	1
358.781	46.159	0.07	-0.03	0.12	0.16	0.05	LROC 10023M001	1
2.625	39.553	-2.55	0.96	0.14	0.17	0.03	MALL 13444M001	1
2.625	39.553	-2.55	0.96	0.14	0.17	0.03	MALL 13444M001	2
0.155	48.019	0.05	0.69	0.09	0.12	0.01	MANS 10091M001	1
0.155	48.019	0.05	0.69	0.09	0.12	0.01	MANS 10091M001	2
17.259	60.595	-0.53	-0.9	0.04	0.05	0.01	MAR6 10405M002	1
17.259	60.595	-0.53	-0.9	0.04	0.05	0.01	MAR6 10405M002	2
15.649	46.562	-0.76	0.18	0.12	0.16	0	MARI 88040S040	1
15.649	46.562	-0.76	0.18	0.12	0.16	0	MARI 88040S040	2
5.354	43.279	-0.36	0.03	0.1	0.13	0	MARS 10073M008	1
5.354	43.279	-0.36	0.03	0.1	0.13	0	MARS 10073M008	2
5.354	43.279	-0.36	0.03	0.1	0.13	0	MARS 10073M008	3
344.367	27.764	-3.15	1.63	0.12	0.09	0.31	MAS1 31303M002	1
16.704	40.649	0.81	4.61	0.04	0.04	-0.18	MATE 12734M008	1
16.704	40.649	0.81	4.61	0.04	0.04	-0.19	MATE 12734M008	2
13.436	45.924	-0.83	2.47	0.09	0.12	-0.02	MDEA 12765M001	1
37.224	56.027	-0.96	-0.05	0.08	0.1	0.08	MDVO 12309M002	1
37.224	56.027	-0.96	-0.05	0.08	0.1	0.08	MDVO 12309M002	2
11.647	44.52	1.46	2.07	0.03	0.03	-0.03	MEDI 12711M003	1
11.647	44.52	1.47	2.04	0.03	0.03	-0.03	MEDI 12711M003	2
11.157	46.669	0.02	-0.17	0.05	0.06	-0.01	MERA 99033M033	1
11.157	46.669	0.02	-0.17	0.05	0.06	-0.01	MERA 99033M033	2
24.395	60.217	-0.03	-1.12	0.03	0.04	0.04	METS 10503S011	1
31.973	46.973	-1.05	-0.27	0.15	0.2	0	MIKL 12335M001	1
12.584	38.008	-1.23	3.52	0.05	0.05	-0.17	MILO 12758M001	1
2.587	48.841	-0.2	-0.12	0.06	0.08	0.01	MLVL 10092M001	1
11.122	46.072	-0.49	0.97	0.04	0.04	0.01	MOCA 12753M001	1
17.274	48.373	-0.25	0.58	0.05	0.06	0.05	MOPI 11507M001	1

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
17.274	48.373	-0.25	0.58	0.05	0.06	0.05	MOPI 11507M001	2
358.315	55.213	0.64	0.02	0.12	0.18	-0.01	MORP 13299S001	1
12.988	46.241	-0.02	2.07	0.08	0.1	-0.02	MPRA 12764M001	1
11.646	44.52	1.47	2.04	0.03	0.03	-0.03	MSEL 12711M008	1
16.404	47.738	-0.01	1.67	0.04	0.05	0.04	MTBG 11030M001	1
16.404	47.738	-0.01	1.68	0.04	0.05	0.04	MTBG 11030M001	2
11.832	47.421	2.2	1.22	0.12	0.16	-0.02	MUEN 88041S041	1
11.832	47.421	2.2	1.22	0.12	0.16	-0.02	MUEN 88041S041	2
354.457	50.103	-0.03	0	0.28	0.4	0.03	NEWL 13273M103	1
33.396	35.141	-6.63	3.79	0.11	0.09	-0.04	NICO 14302M001	1
33.396	35.141	-6.63	3.79	0.11	0.09	-0.04	NICO 14302M001	2
14.99	36.876	-1.72	5.19	0.06	0.06	-0.21	NOT1 12717M004	1
14.99	36.876	-1.72	5.19	0.06	0.06	-0.2	NOTO 12717M003	1
14.99	36.876	-1.72	5.19	0.06	0.06	-0.21	NOTO 12717M003	2
8.614	45.447	-0.4	0.65	0.03	0.03	-0.02	NOVA 12759M001	1
359.66	51.421	0.26	0.02	0.13	0.17	0.01	NPLD 13234M003	1
359.66	51.421	0.26	0.02	0.13	0.17	0.01	NPLD 13234M003	2
44.503	40.226	1.32	7.65	0.29	0.35	0.01	NSSP 12312M001	2
11.865	78.93	-0.41	-0.81	0.08	0.1	0.04	NYA1 10317M003	1
22.136	47.835	-0.06	-0.39	0.35	0.49	-0.03	NYIR 11208M001	1
22.136	47.835	-0.06	-0.39	0.35	0.49	-0.03	NYIR 11208M001	2
11.28	48.086	-0.07	0.31	0.05	0.06	0	OBE2 14208M003	1
11.28	48.086	-0.07	0.31	0.05	0.06	0	OBER 14208M001	1
11.278	48.084	-0.09	0.69	0.63	0.85	0	OBET 14208M004	1
11.926	57.395	-0.87	-0.91	0.03	0.05	0.02	ONSA 10402M004	1
11.926	57.395	-0.87	-0.92	0.03	0.04	0.02	ONSA 10402M004	2
20.794	41.127	1.01	-2.44	0.07	0.07	-0.08	ORID 15601M001	1
20.671	46.555	-0.4	1.35	0.12	0.16	-0.02	OROS 11207M001	1
20.671	46.555	-0.4	1.35	0.12	0.16	-0.02	OROS 11207M001	2
18.68	45.561	0.14	0.88	0.07	0.09	-0.01	OSJE 11902M001	1
10.368	59.737	-1.17	-0.41	0.06	0.08	0	OSLO 10307M001	4
11.896	45.411	0.09	1.52	0.03	0.04	0	PADO 12750S001	1
13.443	48.568	-0.33	0.03	0.06	0.08	0.01	PASS 88044S044	1
13.443	48.568	-0.33	0.03	0.06	0.08	0.01	PASS 88044S044	2
11.46	47.208	-0.5	1.44	0.03	0.03	0.03	PATK 11029S001	1
11.46	47.208	-0.5	1.48	0.03	0.03	0.03	PATK 11029S001	2
9.136	45.203	0.65	0.67	0.08	0.1	-0.01	PAVI 99045M045	1
9.136	45.203	0.64	0.68	0.08	0.1	0	PAVI 99045M045	2
9.136	45.203	0.64	0.68	0.08	0.1	0	PAVI 99045M045	3
334.337	37.748	-1.87	0.67	0.22	0.22	-0.04	PDEL 31906M004	1
334.337	37.748	-1.87	0.67	0.22	0.22	-0.04	PDEL 31906M004	2

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
19.282	47.79	0.29	0.11	0.03	0.03	0.17	PENC 11206M006	1
19.282	47.79	0.26	0.12	0.03	0.04	0.17	PENC 11206M006	2
9.785	47.515	0.26	0.26	0.03	0.03	0.02	PFAN 11005S002	1
9.785	47.515	0.26	0.25	0.03	0.03	0.02	PFAN 11005S002	2
9.785	47.515	0.25	0.25	0.03	0.03	0.03	PFAN 11005S002	3
12.933	48.429	0.01	0.45	0.07	0.09	0	PFRK 88045S045	1
12.933	48.429	0.01	0.45	0.07	0.09	0	PFRK 88045S045	2
34.543	49.603	-1.71	0.75	0.1	0.13	0.07	POLV 12336M001	1
13.066	52.379	-0.49	-0.12	0.03	0.03	0.1	POTS 14106M003	1
11.099	43.886	0.39	2.1	0.03	0.03	-0.05	PRAT 12760M001	1
10.46	52.296	-0.14	0.14	0.1	0.15	-0.01	PTBB 14234M001	1
10.46	52.296	-0.14	0.14	0.1	0.15	-0.01	PTBB 14234M001	2
10.46	52.296	-0.14	0.14	0.1	0.15	-0.01	PTBB 14234M001	3
10.46	52.296	-0.14	0.14	0.1	0.15	-0.01	PTBB 14234M001	4
313.952	60.715	-20.39	1.03	0.19	0.25	0.05	QAQ1 43007M001	1
353.146	33.998	-3.67	1.8	0.09	0.09	0.19	RABT 35001M002	1
34.763	30.598	-4.76	9.13	0.18	0.17	-0.11	RAMO 20703S001	1
34.763	30.598	-4.76	9.13	0.18	0.17	-0.11	RAMO 20703S001	2
34.763	30.598	-4.76	9.13	0.18	0.17	-0.11	RAMO 20703S001	4
5.145	50.001	0.11	0.06	0.17	0.23	0.01	REDU 13102M001	1
338.045	64.139	-17.16	3.61	0.11	0.13	0	REYK 10202M001	1
338.045	64.139	-17.17	3.61	0.11	0.13	0.01	REYK 10202M001	2
338.045	64.139	-17.17	3.61	0.11	0.13	0.01	REYK 10202M001	3
13.486	48.203	1.48	0.88	0.04	0.04	0.04	RIED 88048M048	1
24.059	56.949	-0.51	-0.62	0.04	0.06	0.07	RIGA 12302M002	1
24.059	56.949	-0.51	-0.62	0.04	0.06	0.07	RIGA 12302M002	2
24.059	56.949	-0.51	-0.62	0.05	0.06	0.07	RIGA 12302M002	3
13.995	48.57	-0.28	0.42	0.05	0.06	0.01	ROHR 88049M049	1
13.995	48.57	-0.28	0.42	0.05	0.07	0.01	ROHR 88049M049	2
12.107	47.868	0.26	-0.03	0.05	0.06	0.02	ROSE 88050S050	1
11.042	45.894	1.27	0.72	2.26	2.98	0.02	ROVE 12774M001	1
14.343	47.525	-0.22	0.2	0.03	0.03	0.08	RTMN 99050M050	1
9.507	46.983	0.13	-0.29	0.04	0.05	0	SARG 88051M051	1
13.643	54.514	-0.52	-0.47	0.2	0.3	0	SASS 14281M001	1
13.643	54.514	-0.52	-0.47	0.2	0.3	0	SASS 14281M001	2
13.11	47.803	0.46	0.38	0.03	0.03	0.08	SBGZ 11031S001	1
13.11	47.803	0.46	0.37	0.03	0.03	0.07	SBGZ 11031S001	2
12.291	45.23	-1.35	1.67	0.05	0.06	0	SFEL 99053M053	1
12.291	45.23	-1.35	1.67	0.05	0.06	0.01	SFEL 99053M053	2
353.794	36.464	-4.09	1.13	0.14	0.15	0.07	SFER 13402M004	1
353.794	36.464	-4.09	1.13	0.14	0.15	0.07	SFER 13402M004	2
353.794	36.464	-4.1	1.13	0.14	0.15	0.07	SFER 13402M004	3

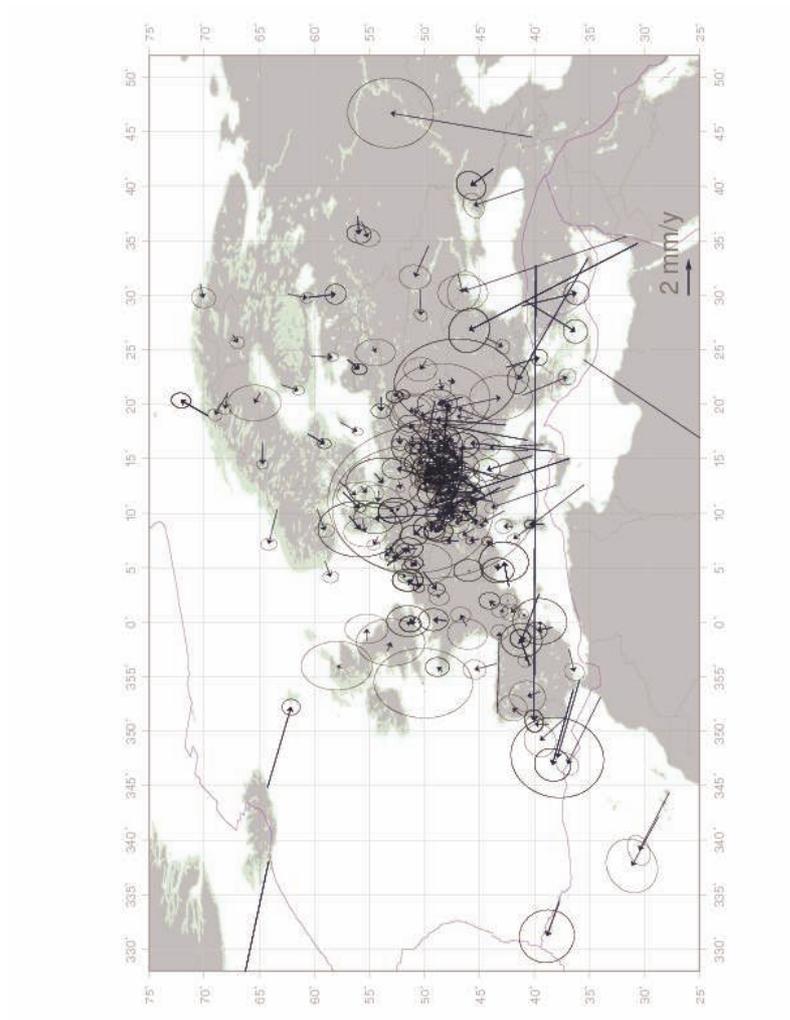
λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
4.677	45.879	0.04	0.07	0.09	0.12	0	SJDV 10090M001	1
4.677	45.879	0.05	0.07	0.09	0.12	0	SJDV 10090M001	2
21.048	64.879	-0.56	0.34	0.15	0.22	-0.01	SKE0 10426M001	1
9.559	55.641	-0.77	-0.15	0.12	0.17	0	SMID 10114M001	1
26.389	67.421	-0.43	-0.26	0.05	0.06	0.01	SODA 10513M001	1
23.395	42.556	0.53	-1.79	0.07	0.07	-0.01	SOFI 11101M002	1
23.395	42.556	0.53	-1.78	0.07	0.07	-0.01	SOFI 11101M002	2
12.958	47.054	3.13	2.56	0.07	0.09	0	SONN 88064S064	1
12.958	47.054	3.13	2.55	0.07	0.09	0	SONN 88064S064	2
12.891	57.715	-0.73	-0.89	0.1	0.15	0.01	SPT0 10425M001	1
18.414	43.868	0.72	1.85	0.11	0.13	-0.03	SRJV 11801S001	1
5.599	59.018	-0.87	-0.3	0.05	0.06	-0.03	STAS 10330M001	1
9.346	47.442	0.48	0.7	0.04	0.05	0.01	STGA 88065M065	1
15.633	48.203	0.18	0.46	0.03	0.03	0.09	STPO 11041S001	1
15.633	48.203	0.16	0.48	0.03	0.03	0.1	STPO 11041S001	2
9.742	56.842	-0.71	-0.59	0.23	0.34	0	SULD 10113M001	1
9.742	56.842	-0.71	-0.59	0.23	0.34	0	SULD 10113M001	2
24.014	49.836	-0.49	0.32	0.1	0.13	0	SULP 12366M001	1
29.781	60.533	0.19	-1.47	0.08	0.08	-0.02	SVTL 12350M001	1
29.781	60.533	0.18	-1.47	0.08	0.09	-0.02	SVTL 12350M001	2
5.219	53.363	0.93	-1.08	0.09	0.13	-0.01	TERS 13534M001	1
5.219	53.363	0.93	-1.08	0.09	0.12	-0.01	TERS 13534M001	3
5.219	53.363	0.93	-1.08	0.09	0.12	-0.01	TERS 13534M001	4
15.651	38.108	0.47	4.58	0.05	0.06	-0.2	TGRC 99061M061	1
15.651	38.108	0.47	4.58	0.05	0.05	-0.21	TGRC 99061M061	2
291.212	76.537	-13.04	-3.4	0.19	0.17	0.17	THU1 43001M001	1
291.175	76.537	-14.48	-4.01	0.22	0.23	0.16	THU3 43001M002	1
15.724	40.601	0.25	5.52	0.05	0.05	-0.14	TITO 99062M062	1
1.481	43.561	0.29	0.31	0.07	0.09	0.01	TLSE 10003M009	1
7.661	45.063	-0.1	0.5	0.03	0.03	-0.03	TORI 12724M002	1
1.481	43.561	0.29	0.31	0.07	0.09	0.01	TOUL 10003M004	1
39.776	40.995	-0.92	2.7	0.1	0.08	0.24	TRAB 20808M001	1
10.319	63.371	-1.88	0.46	0.05	0.06	-0.03	TRDS 10331M001	1
14.464	46.861	0	1.84	0.07	0.09	0	TRE1 88067S067	1
14.464	46.861	0.01	1.83	0.07	0.09	0	TRE2 88068S068	1
15.859	47.928	1.1	0.85	0.05	0.07	0.03	TRFB 11047M001	1
13.764	45.71	-0.44	2.62	0.08	0.1	0	TRIE 12718M003	1
18.94	69.663	0.84	1.46	0.06	0.08	0.07	TRO1 10302M006	1
18.94	69.663	0.84	1.46	0.06	0.08	0.07	TRO1 10302M006	2
18.94	69.663	0.84	1.46	0.06	0.08	0.07	TRO1 10302M006	3
18.94	69.663	0.83	1.46	0.06	0.08	0.07	TRO1 10302M006	4

λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
29.451	40.787	-1.64	-2.69	0.1	0.1	0.01	TUBI 20806M001	1
29.451	40.787	-1.66	-2.68	0.1	0.1	0.01	TUBI 20806M001	2
16.593	49.206	-0.14	0.19	0.12	0.17	-0.03	TUBO 11503M001	1
16.593	49.206	-0.14	0.19	0.12	0.17	-0.03	TUBO 11503M001	2
24.071	35.533	-17.03	-25.1	0.42	0.48	-0.03	TUC2 12617M003	1
12.356	43.119	-0.9	1.59	0.04	0.04	-0.05	UNPG 12752M001	1
12.356	43.119	-0.91	1.59	0.04	0.04	-0.05	UNPG 12752M001	2
12.356	43.119	-0.91	1.59	0.04	0.04	-0.05	UNPG 12752M001	3
11.878	45.407	0.1	1.57	0.03	0.04	0	UPAD 12750M002	1
11.878	45.407	0.1	1.57	0.03	0.04	0	UPAD 12750M002	2
22.298	48.632	-0.59	-0.15	0.06	0.07	0.06	UZHL 12301M001	1
21.771	62.961	-0.3	-0.9	0.04	0.05	0	VAAS 10511M001	1
359.662	39.481	0.25	0.01	0.19	0.22	0.04	VALE 13439M001	1
359.662	39.481	0.25	0.01	0.19	0.22	0.04	VALE 13439M001	2
31.031	70.336	-0.76	-0.16	0.08	0.1	0.05	VARD 10322M002	3
12.332	45.437	0.71	1.27	0.05	0.06	-0.01	VE NE 12741M001	1
12.332	45.437	0.72	1.26	0.05	0.06	-0.01	VE NE 12741M001	2
12.332	45.437	0.72	1.26	0.05	0.06	-0.01	VE NE 12741M001	3
16.56	64.698	-1.23	0.01	0.04	0.05	-0.01	VIL0 10424M001	1
13.85	46.607	0.61	1.03	0.03	0.03	0.06	VIL1 88080M080	1
13.85	46.607	0.57	1.08	0.03	0.03	0.06	VILH 99069M069	1
356.048	40.444	1.46	0.5	0.08	0.08	0.04	VILL 13406M001	1
356.048	40.444	1.46	0.5	0.08	0.08	0.04	VILL 13406M001	2
356.048	40.444	1.45	0.5	0.08	0.08	0.04	VILL 13406M001	3
356.048	40.444	1.45	0.5	0.08	0.08	0.04	VILL 13406M001	4
18.367	57.654	-0.52	-0.94	0.03	0.04	0.06	VISO 10423M001	1
13.85	46.607	0.58	1	0.03	0.03	0.05	VLCH 11036S001	1
13.85	46.607	0.59	1.01	0.03	0.03	0.05	VLCH 11036S001	2
14.626	46.661	0.8	1.05	0.03	0.04	0.05	VLKM 11040S001	1
14.626	46.661	0.8	1.05	0.03	0.04	0.05	VLKM 11040S001	2
25.299	54.653	-0.33	-0.13	0.11	0.16	-0.01	VLNS 10801M001	1
15.266	40.231	-0.76	2.44	0.09	0.11	-0.05	VLUC 99070M070	1
15.266	40.231	-0.77	2.44	0.09	0.11	-0.05	VLUC 99070M070	2
11.911	45.385	-0.03	2.11	0.12	0.15	0	VOLT 99071M071	1
11.911	45.385	-0.03	2.11	0.12	0.15	0	VOLT 99071M071	2
11.911	45.385	-0.03	2.11	0.12	0.15	0	VOLT 99071M071	3
5.245	50.69	0.11	0.16	0.06	0.08	0.01	WARE 13114M001	1
5.245	50.69	0.11	0.16	0.06	0.08	0.01	WARE 13114M001	2
5.245	50.69	0.11	0.16	0.06	0.08	0.01	WARE 13114M001	3
12.101	54.17	-0.62	0.05	0.13	0.19	0.01	WARN 14277M002	1
14.021	48.158	0.06	0.99	0.03	0.03	0.07	WELS 11044S001	1
16.373	48.219	0.18	0.23	0.11	0.15	0	WIEB 88069M069	1

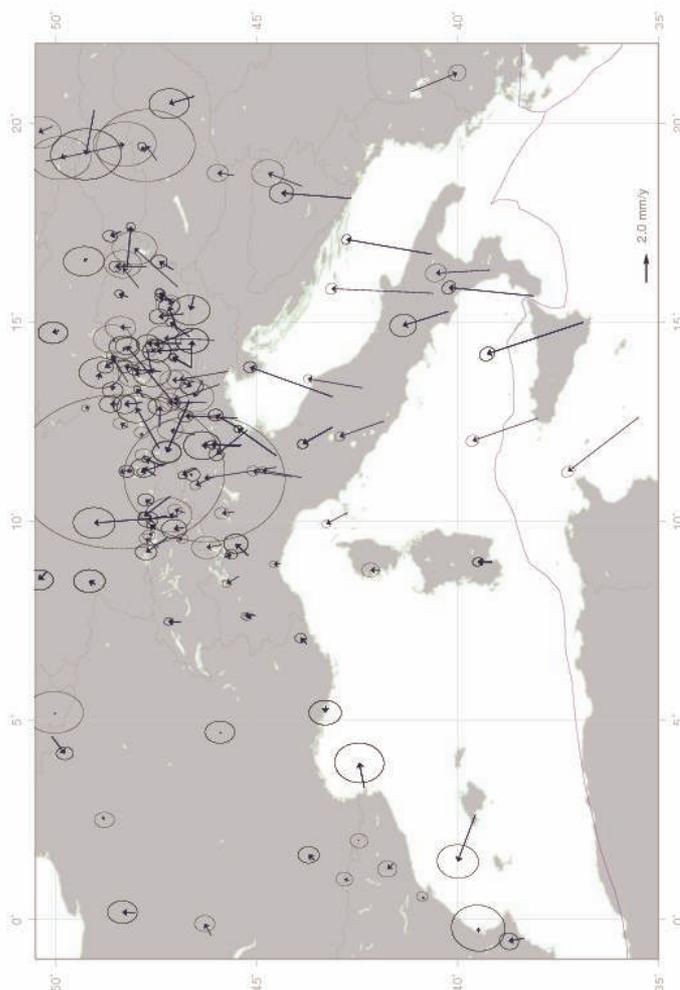
λ	Φ	V_e	V_n	σ_e	σ_n	σ_{en}	Sito	N. sol.
16.373	48.219	2.23	-0.18	0.03	0.04	0.1	WIEN 11035S001	1
16.373	48.219	2.22	-0.23	0.03	0.04	0.11	WIEN 11035S001	2
14.302	47.723	-1.26	-0.25	0.11	0.15	0	WIND 88070S070	1
14.302	47.723	-1.26	-0.25	0.11	0.15	0	WIND 88070S070	2
17.062	51.113	-0.62	-0.04	0.05	0.07	0.02	WROC 12217M001	1
17.062	51.113	-0.62	-0.04	0.05	0.06	0.02	WROC 12217M001	2
17.062	51.113	-0.62	-0.04	0.05	0.07	0.02	WROC 12217M001	3
10.416	47.602	0.25	0.34	0.05	0.07	0.02	WRTH 88071S071	1
10.416	47.602	0.25	0.34	0.05	0.07	0.02	WRTH 88071S071	2
6.605	52.915	-0.32	0.41	0.03	0.04	0.02	WSRT 13506M005	1
12.879	49.144	-0.1	0.26	0.03	0.03	0.1	WTZR 14201M010	1
356.911	40.525	-0.25	0.19	0.05	0.06	0.09	YEBE 13420M001	1
41.565	43.788	-0.9	1.18	0.12	0.12	0.18	ZECK 12351M001	1
41.565	43.788	-0.9	1.18	0.12	0.12	0.18	ZECK 12351M001	2
41.565	43.788	-0.9	1.18	0.12	0.12	0.18	ZECK 12351M001	3
7.465	46.877	0.02	0.68	0.03	0.04	-0.02	ZIMM 14001M004	1
7.465	46.877	0.02	0.68	0.03	0.04	-0.02	ZIMM 14001M004	2
12.974	46.557	-0.03	1.09	0.04	0.05	0.02	ZOUF 12763M001	1
36.759	55.699	-0.87	-0.32	0.07	0.1	0.08	ZWEN 12330M001	1
19.206	49.687	-0.18	0.4	0.18	0.24	-0.02	ZYWI 12220S001	1

Visualizzazione del campo di velocità

Diamo infine una visualizzazione del campo di velocità EGU, espresso nel sistema di riferimento ETRF.



Campo di velocità ETRF



Campo di velocità ETRF, regione mediterranea.

9.5 Conclusioni

E' stato determinato un campo di velocità valido per la regione europea combinando soluzioni settimanali provenienti da tre reti GPS (EUREF, UPA, GP, per un totale di 237 siti). Dai sistemi di equazioni normali sono stati rimossi i vincoli pre esistenti e sono stati imposti i minimi vincoli, rispetto alla soluzione ITRF mappata all'epoca di interesse. Per ciascun network è stata eseguita una combinazione multi-anno preliminare, imponendo vincoli interni, allo scopo di determinare le discontinuità e rimuovere gli outliers presenti nelle serie storiche di ogni sito. In questa fase dell'elaborazione si è notata la scarsa consistenza, in termini di sistema di riferimento, delle soluzioni settimanali UPA e GP. Tale problema non degrada la qualità intrinseca

delle soluzioni settimanali in questione, come dimostrato dai valori del WRMS, che sono risultati paragonabili a quelli relativi alla soluzione EUREF. La combinazione dei sistemi di equazioni normali delle tre reti, effettuata settimana per settimana, da cui sono state ottenute le soluzioni settimanali EGU, ha consentito di migliorare la consistenza, raggiungendo un livello paragonabile alla soluzione EUREF. In termini di velocità abbiamo verificato che il campo così ottenuto è allineato a quello ITRF2005 a livello di 0.11 mm/yr per la componente est e di 0.07 mm/yr per la componente nord. Abbiamo infine verificato che l'intervallo minimo di tempo considerato è sufficiente a mediare gli effetti del termine annuale presente nelle serie storiche di molti siti. L'effetto del termine annuale è di 0.01 mm/yr per la componente est, e di 0.06 mm/yr per la componente nord.

Capitolo 10

Campo di velocità CEGRN

10.1 Introduzione.

Nel capitolo 9 abbiamo descritto la strategia di riprocessamento della campagna CEGRN, e abbiamo determinato un campo di velocità per mezzo della combinazione delle equazioni normali di campagna. Tale combinazione era tuttavia finalizzata allo studio della consistenza delle soluzioni di campagna e alla determinazione della qualità dei siti considerati. Le equazioni normali di ogni singola campagna prodotte dai gruppi di ricerca che hanno partecipato al progetto sono state poi combinate tra di loro, ed infine è stata effettuata una combinazione multianno con ADDNEQ2.

In questo capitolo descriviamo la realizzazione di una soluzione multianno combinata delle equazioni normali EGU e CEGRN.

10.2 Descrizione della strategia di combinazione

I sinex delle campagne CEGRN utilizzati sono i seguenti

	Nome	Epoca	N. siti.
1	AN94+Grd_A.SNX	94:124	47
2	AN95+Grd_A.SNX	95:151	36
3	AN96+Grd_A.SNX	96:164	40
4	AN97+Grd_A.SNX	97:158	41
5	AN99+Grd_A.SNX	99:167	56
6	AN01+Grd_A.SNX	1:171	54
7	AN03+Grd_A.SNX	3:169	67
8	AN05+Grd_A.SNX	5:173	85
9	AN07+Grd_A.SNX	7:171	82

I sistemi di eq. normali corrispondenti a questi sinex sono vincolati mediante i minimi vincoli. Per imporre nuovi vincoli è sufficiente utilizzare l'equazione (9.4). Come nel capitolo precedente abbiamo prima prodotto una soluzione multianno preliminare

applicando vincoli interni, allo scopo di rimuovere eventuali outliers, e poi abbiamo combinato le eq. normali di campagna con le eq. normali EGU, allo scopo di ottenere un sistema di riferimento combinato che fosse allineato a quello definito dalla soluzione multianno EGU.

10.2.1 Consistenza della soluzione CEGRN

Utilizziamo i parametri di Helmert di ciascuna soluzione di campagna rispetto alla soluzione combinata per studiare la consistenza interna delle soluzioni, in termini di sistema di riferimento. Ricordiamo che nell'elaborazione sono state utilizzate orbite riprocessate in un sistema di riferimento comune. Ci aspettiamo, quindi, un elevato livello di consistenza tra le soluzioni: Dal momento che le soluzioni considerate sono solo 9, possiamo rappresentare i risultati in una tabella:

Id. sol	$T_1[mm]$	$T_2[mm]$	$T_3[mm]$	$D[10^{-9}]$	$R_1[mas]$	$R_2[mas]$	$R_3[mas]$
1	-4.7	33.8	5.0	-1.06	0.861	0.228	-0.650
2	-23.6	9.3	4.8	1.44	0.214	0.694	-0.305
3	11.5	-8.6	-14.0	0.82	-0.152	-0.572	0.206
4	5.5	-45.6	3.2	0.29	-1.199	-0.084	0.898
5	17.5	-10.3	-1.0	-1.29	-0.281	-0.467	0.270
6	5.8	11.2	1.8	-1.08	0.267	-0.112	-0.193
7	2.7	11.5	-5.8	0.15	0.372	-0.174	-0.156
8	-10.4	-17.5	9.3	0.32	-0.508	0.443	0.275
9	-4.3	16.2	-3.4	0.39	0.426	0.042	-0.344

come si vede la consistenza delle soluzioni individuali è superiore a quello delle soluzioni EGU, fatta eccezione per la soluzione 4, che presenta il valore massimo per i parametri di traslazione (4.5 cm lungo la direzione y). I parametri di rotazione sono dell'ordine di 1 mas. Riportiamo anche i valori di WRMS 3d e WRMS verticale:

Id. sol	$WRMS_{3d}[m]$	$WRMS_{vert}[m]$
1	0.00500	0.00760
2	0.00480	0.00740
3	0.00750	0.01250
4	0.00630	0.01030
5	0.00520	0.00820
6	0.00380	0.00550
7	0.00450	0.00690
8	0.00300	0.00420
9	0.00390	0.00580

Le soluzioni di campagna CEGRN dimostrano di possedere una elevata consistenza.

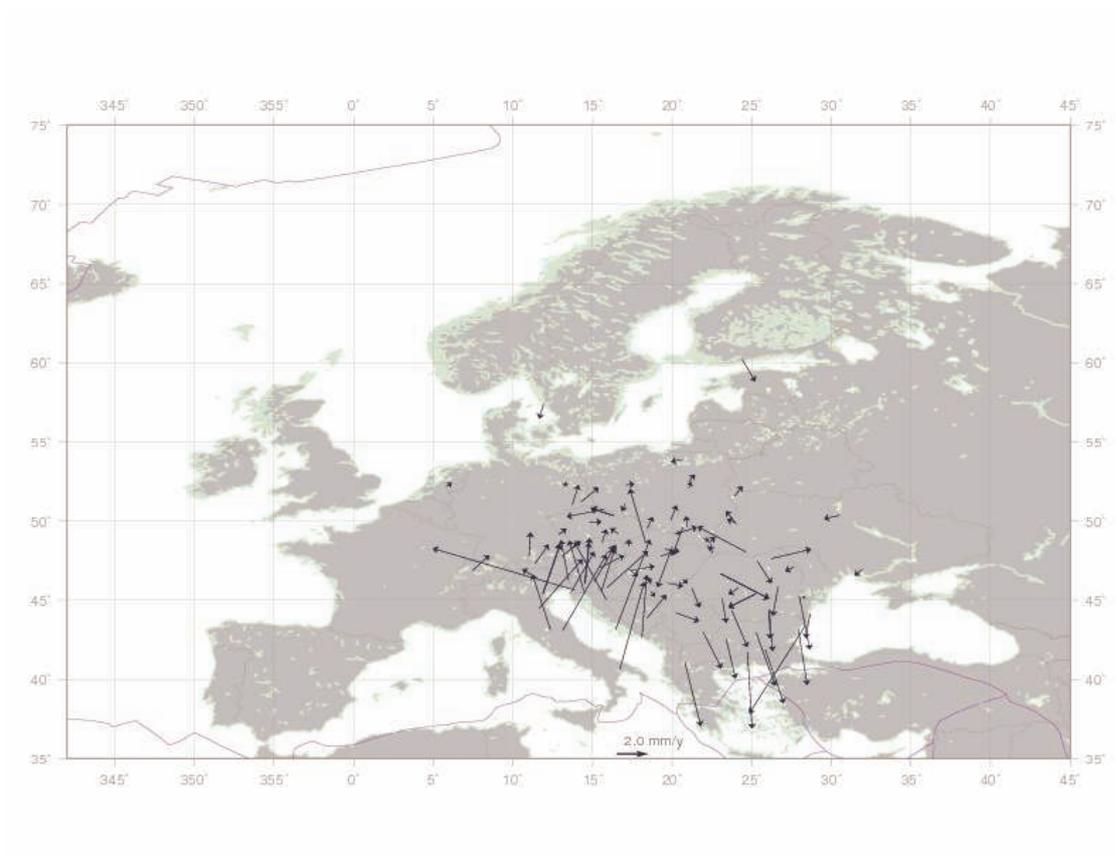


Figura 10.1: Campo di velocità ETRF desunto dalla combinazione preliminare CEGRN

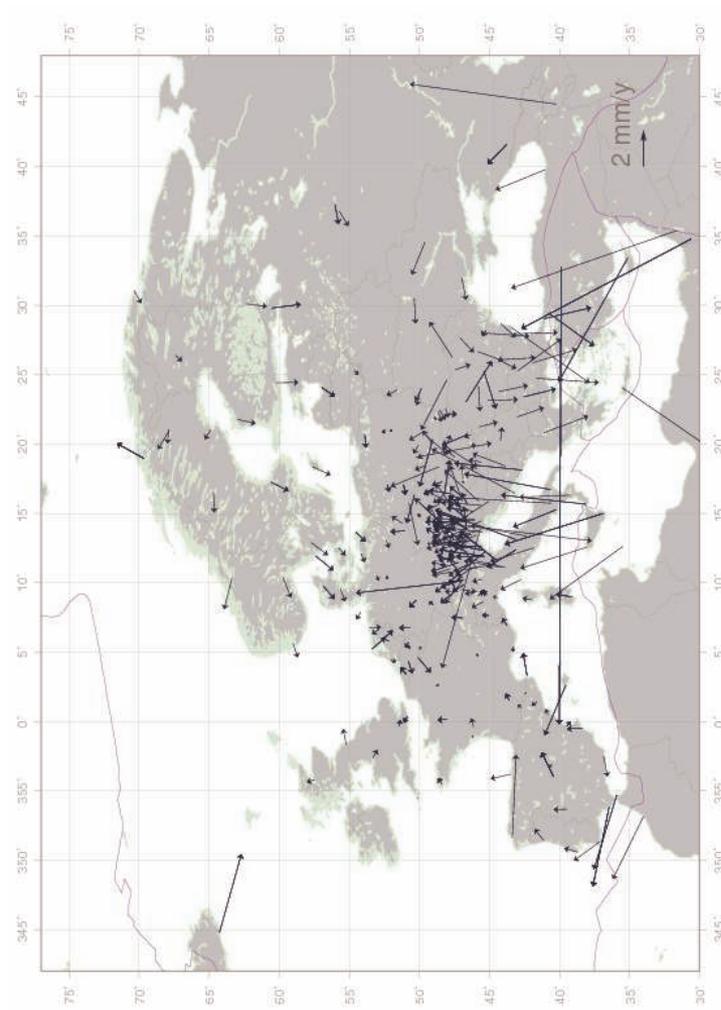


Figura 10.2: Campo di velocità ETRF definitivo, ottenuto dalla combinazione multianno EUREF, GP, UPA e CEGRN.

10.3 Campo di velocità combinato

Osserviamo che le soluzioni 1, 2 e 3 sono antecedenti alla prima soluzione settimanale EUREF, e pertanto non possono essere allineate attraverso lo stacking con la corrispondente soluzione settimanale EUREF. Le soluzioni di campagna CEGRN, tuttavia, possiedono già intrinsecamente un buon allineamento con il sistema ITRF05. Siamo quindi portati ad utilizzare nella combinazione multianno anche quelle soluzioni CEGRN che non hanno un corrispettivo nelle soluzioni settimanali EUREF. Il risultato, nel sistema ETRF, è rappresentato dalla figura (10.2). Per motivi di spazio non riportiamo in tabella tutti i valori del campo tabulati. Il numero di siti presenti in questa soluzione è 296.

Capitolo 11

Interpolazione del campo di velocità.

11.1 Introduzione.

La combinazione multianno descritta nei capitoli precedenti consente di determinare i valori del campo di velocità su un insieme limitato di punti. In questo capitolo descriviamo un algoritmo che permette di utilizzare l'informazione statistica derivante dalle misure del campo per ottenere una rappresentazione analitica: Tale rappresentazione consente di predire i valori che il campo su tutta la regione di interesse. Inoltre, avendo a disposizione una approssimazione analitica del campo, è possibile ottenere, per derivazione, le componenti del tensore del tasso di deformazione. La descrizione dell'algoritmo di minima varianza è presa da [5].

11.2 Algoritmo di interpolazione

11.2.1 Descrizione dell'algoritmo

Consideriamo due insiemi di quantità casuali. Il primo è un insieme di valori misurati, rappresentati dal vettore di dimensione q :

$$l = [l_1, l_2 \dots l_q]^T \quad (11.1)$$

il secondo insieme viene definito segnale, ed è rappresentato dal vettore di dimensione m :

$$s = [s_1, s_2 \dots s_m]^T. \quad (11.2)$$

Assumiamo che entrambi i vettori abbiano valori di aspettazione nulli:

$$E[l] = 0, \quad E[s] = 0 \quad (11.3)$$

in tal caso le quantità l e s vengono dette centrate. Con i vettori l ed s possiamo costruire le seguenti matrici di covarianza:

$$C_{ll} = \text{cov}(l, l) \quad \text{autocovarianza di } l \quad (11.4)$$

$$C_{sl} = \text{cov}(s, l) \quad \text{crosscovarianza di } s \text{ e } l \quad (11.5)$$

$$C_{ss} = \text{cov}(s, s) \quad \text{autocovarianza di } s \quad (11.6)$$

Gli elementi delle matrici di covarianza sono i valori medi dei seguenti prodotti:

$$E[l_i l_j] \quad i, j = 1, 2, \dots, q \quad (11.7)$$

$$E[s_k l_i] \quad k = 1, 2, \dots, m \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (11.8)$$

$$E[s_k s_h] \quad k, h = 1, 2, \dots, m \quad (11.9)$$

Ed in notazione matriciale si ha:

$$C_{ll} = E[l l^T] \quad (11.10)$$

$$C_{sl} = E[s l^T] \quad (11.11)$$

$$C_{ss} = E[s s^T]. \quad (11.12)$$

Osserviamo che le definizioni precedenti sono valide solo se le quantità l e s sono centrate. Supponiamo che le matrici (11.10), (11.11) e (11.12), e tutte le altre matrici che incontreremo nel resto della trattazione, abbiano rango pieno. Assumiamo che il vettore delle misure l sia conosciuto, mentre il vettore dei segnali s sia sconosciuto, E' lecito chiedersi quale sia la miglior approssimazione del vettore s sulla base, date le misure l . Cerchiamo una stima che non sia data da una relazione funzionale tra l ed s , ma che sia basata sull'informazione contenuta nelle matrici di covarianza. Cerchiamo una funzione lineare tale che:

$$\hat{s} = H l \quad (11.13)$$

dove H è una matrice $m \times q$ da determinare. In tal caso ciascuna componente del vettore s è approssimata da una combinazione lineare dei dati l . Se s è il valore vero del segnale, allora l'errore è dato da

$$\varepsilon = \hat{s} - s \quad (11.14)$$

Possiamo calcolare la matrice di covarianza del vettore (11.14) come:

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = \text{cov}(\varepsilon, \varepsilon) = E[\varepsilon \varepsilon^T] = E[(\hat{s} - s)(\hat{s} - s)^T] \quad (11.15)$$

I termini diagonali della matrice $C_{\varepsilon\varepsilon}$ sono le varianze σ_k^2 della stima \hat{s}_k

$$\sigma_k^2 = E[\varepsilon_k^2] = E[(\hat{s}_k - s_k)^2] \quad (11.16)$$

Calcolando la media della stima del segnale si dimostra che essa è priva di bias:

$$E[\hat{s}] = HE[l] = 0. \quad (11.17)$$

Cerchiamo ora una stima lineare del segnale s , priva di bias e tale che, e tale che le varianze σ_k^2 (eq. 11.16) siano minime. La matrice di covarianza dell'errore, per una arbitraria matrice H , è data dal valore di aspettazione della matrice:

$$\varepsilon\varepsilon^T = (Hl - s)(Hl - s)^T = HlH^T - sl^T H^T - Hls^T + ss^T. \quad (11.18)$$

Calcolando il valore di aspettative degli elementi di matrice abbiamo:

$$E[\varepsilon\varepsilon^T] = HE[lH^T] - E[sl^T]H^T - HE[ls^T] + E[ss^T] \quad (11.19)$$

e utilizzando le definizioni (11.10), (11.11) e (11.12), otteniamo :

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = HC_uH^T - C_{sl}H^T - HC_{ls} + C_{ss} \quad (11.20)$$

avendo posto:

$$C_{ls} = C_{sl}^T = E[ls^T] \quad (11.21)$$

La matrice di covarianza (11.20) si può scrivere anche come

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = C_{ss} - C_{sl}C_u^{-1}C_{ls} + (H - C_{sl}C_u^{-1})C_u(H - C_{sl}C_u^{-1})^T \quad (11.22)$$

eseguendo le moltiplicazioni matriciali e ricordando che la matrice C_u^{-1} esiste perchè si è supposto che C_u abbia rango pieno. In tal caso:

$$C_u^{-1}C_u = I. \quad (11.23)$$

Osserviamo che la matrice di covarianza dell'errore è uguale alla somma delle seguenti matrici:

$$A = C_{ss} - C_{sl}C_u^{-1}C_{ls} \quad (11.24)$$

$$B = (H - C_{sl}C_u^{-1})C_u(H - C_{sl}C_u^{-1})^T \quad (11.25)$$

Ora si vede che la matrice A non dipende da H , e quindi è uguale in tutte le stime lineari del segnale; La matrice B è nulla se H viene scelta in modo tale che

$$H = C_{sl}C_u^{-1}. \quad (11.26)$$

Inoltre se B non è nulla, allora tutti gli elementi della sua diagonale sono maggiori di 0, infatti sia γ la k -esima riga della matrice $H - C_{sl}C_u^{-1}$ (è un vettore riga di m componenti); il k -esimo elemento della diagonale della matrice si scrive:

$$\gamma C_u \gamma^T \quad (11.27)$$

Dal momento che C_{ll} è una matrice di covarianza di rango pieno, essa è anche definita positiva, e quindi

$$\gamma C_{ll} \gamma^T \geq 0 \quad (11.28)$$

$$\gamma C_{ll} \gamma^T = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \gamma = 0 \quad (11.29)$$

Questo significa che la stima di minima varianza è data dall'equazione

$$B = 0 \quad (11.30)$$

equivalente a

$$H = C_{sl} C_{ll}^{-1} \quad (11.31)$$

e che la stima di minima varianza è data da

$$\hat{s} = C_{sl} C_{ll}^{-1} l \quad (11.32)$$

e la stima dell'errore è dato da:

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = C_{ss} - C_{sl} C_{ll}^{-1} C_{ls}. \quad (11.33)$$

11.2.2 Collocazione con errori casuali

Supponiamo che il vettore di osservazioni l sia affetto da errori di misura, secondo una distribuzione normale. Allora possiamo rappresentare le componenti del vettore l con la seguente notazione:

$$l_i = t_i + n_i. \quad (11.34)$$

Tale notazione indica che l'osservazione l_i è stata decomposta nel segnale t_i e nel rumore n_i . Per t e n possiamo definire le matrici di covarianza:

$$C_{tt} = E[tt^T] \quad (11.35)$$

$$C_{nn} = E[nn^T] \quad (11.36)$$

$$C_{nt} = E[tn^T]. \quad (11.37)$$

Calcoliamo ora le matrici C_{ll} e C_{sl} . Si ha che:

$$C_{ll} = E[l l^T] = E[(t + n)(t^T + n^T)] \quad (11.38)$$

$$= E[tt^T] + E[tn^T] + E[nt^T] + E[nn^T] \quad (11.39)$$

$$= C_{tt} + C_{tn} + C_{nt} + C_{nn} \quad (11.40)$$

imponiamo ora che il rumore n e il segnale t siano scorrelati,:

$$C_{nt} = 0 \quad (11.41)$$

in tal caso si ha:

$$C_{ll} = C_{tt} + C_{nn} \quad (11.42)$$

e la matrice di covarianza cercata è data dalla somma delle matrici di covarianza del segnale l e del rumore n . La matrice C_{sl} è data da:

$$C_{sl} = E[s(t^T + n^T)] \quad (11.43)$$

$$= E[st^T] + E[sn^T] \quad (11.44)$$

$$= C_{st} + C_{sn} = C_{st}. \quad (11.45)$$

Ne segue che nel caso di osservazioni affette da errori normalmente distribuiti, le eq. (11.32) e (11.33) sono ancora valide, con le matrici C_{ll} e C_{sl} definite dalle eq. (11.42) e (11.43).

11.2.3 Applicazione dell'algoritmo al campo di velocità

Applichiamo l'algoritmo di interpolazione al caso di un campo di velocità bidimensionale. Il vettore delle osservazioni è definito nel seguente modo:

$$l = [V_1^n, V_2^n, \dots, V_q^n, V_1^e, V_2^e, \dots, V_q^e]^T = \begin{pmatrix} V_i^n \\ V_i^e \end{pmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (11.46)$$

dove V_i^n e V_i^e si riferiscono alla componente nord e alla componente est del vettore velocità, relativo all' i -esimo sito. Analogamente possiamo definire il vettore dei segnali:

$$s = [v_1^n, v_2^n, \dots, v_m^n, v_1^e, v_2^e, \dots, v_m^e]^T = \begin{pmatrix} v_k^n \\ v_k^e \end{pmatrix} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (11.47)$$

ipotizziamo, inoltre, che le grandezze l ed s siano centrate. Perchè questo fatto sia verificato è sufficiente sottrarre al vettore delle osservazioni l il suo valore medio. La matrice di covarianza del campo di velocità assume allora la seguente forma:

$$C_{ll} = \begin{pmatrix} C_{ij}^{nn} & C_{ij}^{ne} \\ C_{ij}^{en} & C_{ij}^{ee} \end{pmatrix} \quad i, j = 1, 2, \dots, q \quad (11.48)$$

ed, in modo simile, la matrice di cross-covarianza C_{sl} si scrive come:

$$C_{sl} = \begin{pmatrix} C_{ki}^{nn} & C_{ki}^{ne} \\ C_{ki}^{en} & C_{ki}^{ee} \end{pmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (11.49)$$

dove le sottomatrici sono definite da:

$$C_{ij}^{nn} = \begin{pmatrix} C_{11}^{nn} & C_{12}^{nn} & \dots & C_{1q}^{nn} \\ C_{21}^{nn} & & & \\ \dots & & & \\ C_{q1}^{nn} & \dots & \dots & C_{qq}^{nn} \end{pmatrix} \quad (11.50)$$

$$C_{ij}^{ee} = \begin{pmatrix} C_{11}^{ee} & C_{12}^{ee} & \dots & C_{1q}^{ee} \\ C_{21}^{ee} & & & \\ \dots & & & \\ C_{q1}^{ee} & \dots & \dots & C_{qq}^{ee} \end{pmatrix} \quad (11.51)$$

$$C_{ki}^{mn} = \begin{pmatrix} C_{11}^{nn} & C_{12}^{nn} & \dots & C_{1q}^{nn} \\ C_{21}^{mn} & & & \\ \dots & & & \\ C_{m1}^{mn} & \dots & \dots & C_{mq}^{nn} \end{pmatrix} \quad (11.52)$$

$$C_{ki}^{ee} = \begin{pmatrix} C_{11}^{ee} & C_{12}^{ee} & \dots & C_{1q}^{ee} \\ C_{21}^{ee} & & & \\ \dots & & & \\ C_{m1}^{ee} & \dots & \dots & C_{mq}^{ee} \end{pmatrix}. \quad (11.53)$$

Per semplificare il problema, imponiamo che le componenti nord ed est della velocità di ciascun sito siano scorrelate. Questo fatto implica che:

$$C_{ij}^{me} = C_{ij}^{en} = 0 \quad (11.54)$$

$$C_{ki}^{me} = C_{ki}^{en} = 0 \quad (11.55)$$

l'eq. (11.32) diviene allora:

$$\begin{pmatrix} \hat{v}_k^n \\ \hat{v}_k^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{ki}^{mn} & 0 \\ 0 & C_{ki}^{ee} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{ll}^{mn} & 0 \\ 0 & C_{ll}^{ee} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_i^n \\ V_i^e \end{pmatrix}. \quad (11.56)$$

11.2.4 Matrice di covarianza del noise per un campo di velocità orizzontale.

Abbiamo visto che, in presenza di errori di misura, la stima di minima varianza è data dall'equazione:

$$\hat{s} = C_{st} (C_{tt} + C_{nn})^{-1} l. \quad (11.57)$$

Dal momento che abbiamo supposto l'assenza di correlazione tra le componenti nord ed est della velocità, la matrice di covarianza del noise sarà diagonale ed avrà la seguente forma:

$$C_{noise} = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^{n2} & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^{n2} & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & \sigma_{q-1,q-1}^{e2} & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & \sigma_{q,q}^{e2} \end{pmatrix}. \quad (11.58)$$

11.2.5 Scalatura della matrice di covarianza del noise

Le varianze che costituiscono gli elementi della matrice (11.58) corrispondono agli elementi diagonali della matrice di covarianza ottenuta dallo stacking delle equazioni normali settimanali. Secondo i lavori [26], [24], [12] e [19], è noto che nelle serie

storiche dei residui delle coordinate è presente, oltre al white noise, anche il random e/o flicker noise (con contributi variabili in funzione del sito). L'effetto del random e del flicker noise è quello di sottostimare le incertezze relative alla velocità. La stima della velocità dei siti ottenuta tramite il fit, basato su algoritmi di massima verosimiglianza, delle serie storiche dei residui con un modello del tipo:

$$x(t) = vt + \sum_{i=1}^3 A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (11.59)$$

(dove v è la velocità del sito) rivela che l'incertezza ottenuta utilizzando un algoritmo MLE è superiore all'incertezza determinata con i minimi quadrati di un fattore che va da 4 a 10. Conveniamo perciò di scalare la matrice (11.58) di un fattore 10.

11.2.6 Funzione di covarianza

Abbiamo visto che l'informazione contenuta nelle matrici di covarianza relative al campo di velocità, permette di ottenere una rappresentazione analitica del campo stesso. Osserviamo che fino a questo punto non è determinata la forma analitica degli elementi che compongono tali matrici; La forma analitica deve essere scelta formulando alcune ipotesi sulle caratteristiche del campo di velocità.

11.2.7 Caratteristiche del campo di velocità

Supponiamo che il campo di velocità goda delle seguenti proprietà:

1. Le componenti nord ed est del campo siano scorrelate.
2. Il campo sia omogeneo ed isotropo.

Sotto queste ipotesi possiamo individuare alcune caratteristiche che la matrice di covarianza C_u deve possedere. L'ipotesi 1) è già stata utilizzata nell'eq. (11.56) e porta a considerare una matrice diagonale a blocchi. L'ipotesi 2) consente di affermare che gli elementi di matrice devono essere delle funzioni che dipendono unicamente dalla distanza tra i siti fra cui si desidera calcolare la covarianza. In formula:

$$C_{ij} = f(d_{ij}). \quad (11.60)$$

Inoltre se pensiamo che è plausibile pensare che la correlazione tra le velocità di due siti diminuisca all'aumentare della distanza tra i siti, l'elemento di matrice deve avere la forma:

$$C_{ij} = f\left(\frac{1}{d_{ij}}\right). \quad (11.61)$$

Non tutte le funzioni che dipendono dalla distanza d_{ij} secondo la relazione (11.61) sono adatte a costituire gli elementi di una matrice di covarianza. Infatti ogni matrice

di covarianza deve risultare definita positiva. Fortunatamente l'insieme di funzioni elementari che permettono di costruire una matrice definita positiva è ristretto; la più comune tra esse è la gaussiana, in tal caso:

$$C_{ij} = \sigma^2 e^{-\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right)^2} \quad (11.62)$$

tale funzione dipende da due parametri: σ^2 rappresenta la varianza del campo, mentre d_0 è la lunghezza di correlazione. Sviluppando al primo ordine la gaussiana rispetto al parametro d_0 si ottiene la funzione di Cauchy. Anche tale funzione, se usata per rappresentare gli elementi della matrice di covarianza, permette di costruire una matrice definita positiva:

$$C_{ij} = \frac{\sigma^2}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right)^2}. \quad (11.63)$$

Osserviamo infine che, nel caso il campo non sia omogeneo ed isotropo, la funzione di covarianza non dipende più dalla distanza tra il punto i e il punto j . Si potrebbe allora pensare di utilizzare una funzione del tipo:

$$d_{ij}^A = f_{ij} d_{ij} \quad (11.64)$$

dove f_{ij} è una funzione scalare che dipende dal gradiente del campo di velocità calcolato lungo la direzione $i \rightarrow j$ e d_{ij} è la distanza sulla sfera (vedi [35]).

11.2.8 Varianza e covarianza empiriche

Le funzioni di covarianza individuate dipendono da due parametri che devono essere stimati attraverso un fit dei dati. Osserviamo che uno stimatore per la varianza σ^{n2} e σ^{e2} è dato dalle seguenti varianze empiriche:

$$\sigma_{emp}^{n2} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i^{n2}}{N} \quad \sigma_{emp}^{e2} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i^{e2}}{N} \quad (11.65)$$

dove N è il numero dei siti e si è tenuto conto del fatto che i vettori V^n e V^e devono essere grandezze centrate. Uno stimatore per la covarianza è dato dalla covarianza empirica:

$$C^{nn}(d) = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^{N_d} V_i^n V_j^n}{N_d} \quad C^{ee}(d) = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^{N_d} V_i^e V_j^e}{N_d} \quad (11.66)$$

dove N_d rappresenta il numero di coppie di siti (i, j) tali che $d_{ij} = d$. Se dividiamo le covarianze empiriche per le rispettive varianze empiriche, otteniamo le correlazioni empiriche:

$$Corr(d)_{nn} = \frac{C^{nn}(d)}{\sigma_{emp}^{n2}} \quad Corr(d)_{ee} = \frac{C^{ee}(d)}{\sigma_{emp}^{e2}}. \quad (11.67)$$

11.2.9 Determinazione della funzione di covarianza

Scegliamo come funzione di covarianza la funzione di Cauchy (11.63). Nel nostro caso dovremo fittare alle covarianze empiriche (11.66) le seguenti funzioni:

$$C_{ij}^{mn} = \frac{w^{nn}}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_{n0}}\right)^2} \quad C_{ij}^{ee} = \frac{w^{ee}}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_{e0}}\right)^2} \quad (11.68)$$

dove d_{ij} corrisponde alla distanza sferica tra due siti. Ricordiamo che la distanza angolare tra due punti sulla sfera si esprime come:

$$\cos(a_{ij}) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_i\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_j\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_i\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_j\right) \cos(\lambda_i - \lambda_j) \quad (11.69)$$

dove ϕ_i, ϕ_j rappresentano le latitudini dei due siti, λ_i e λ_j rappresentano le longitudini e a_{ij} la separazione angolare. La distanza sferica si può calcolare come:

$$d_{ij} = a_{ij} \times r \quad (11.70)$$

dove $r = 6378$ Km è il raggio medio terrestre. Possiamo diminuire il numero di parametri da stimare utilizzando le eq. (11.65) per determinare w^{nn} e w^{ee} , e le correlazioni empiriche (11.67) per determinare le lunghezze di correlazione per mezzo di un fit delle funzioni:

$$\frac{1}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_{n0}}\right)^2} \quad \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_{e0}}\right)^2}. \quad (11.71)$$

Osserviamo che gli stimatori (11.66) e (11.67) non sono robusti. Per poter essere utilizzati è necessario suddividere l'insieme costituito dalle coppie dei siti in sottoinsiemi in funzione della distanza, specificando una tolleranza. Se d è la distanza e Δ_d è la tolleranza, allora le eq. (11.66) e (11.67) devono essere applicate a tutte le coppie di siti le cui mutue distanze d_{ij} siano tali che:

$$d - \Delta_d \leq d_{ij} \leq d + \Delta_d \quad (11.72)$$

la presenza di outliers all'interno dell'insieme di coppie corrispondente alla distanza d ha l'effetto di diminuire il valore assunto dagli stimatori, rendendo difficoltoso il fit delle funzioni (11.71). Il grafico dello stimatore (11.66), detto covariogramma, permette di apprezzare immediatamente le difficoltà che insorgono quando si affronta questo tipo di problemi. Il covariogramma risulta dipendere molto dalla tolleranza Δ_d . Per effettuare un buon fit della funzione di covarianza si vorrebbe aver a disposizione molti punti, ma questo comporta la diminuzione del valore Δ_d , che diminuisce il numero di coppie comprese nell'intervallo $[\Delta_d - d, d + \Delta_d]$, e questo fatto diminuisce l'utilità degli stimatori (11.66) e (11.67).

Varianze del campo e correlogrammi

La varianze delle componenti est e nord del campo di velocità costituito dalle soluzioni combinate EUREF, UPA, GP e CEGRN, calcolata secondo le eq. (11.65) sono pari a:

$\sigma_e^2 [mm/yr]^2$	$\sigma_n^2 [mm/yr]^2$
0.7660	1.1082

Nelle figure seguenti vengono riportati i correlogrammi delle componenti nord ed est del campo di velocità. Per realizzare i correlogrammi sono state effettuate diversi tentativi, variando la tolleranza Δ_d al fine di ottenere il miglior compromesso tra numero di punti su cui fittare la funzione e numero di punti presenti all'interno di ciascun *bin*: il valore più idoneo è risultato essere 60 Km. Per migliorare il fit i valori del correlogramma sono stati poi lisciati per mezzo della media mobile, a 3 e 5 punti. Le tabelle seguenti riassumono i risultati:

	$d_{n0} [km]$	lim. inf. [km]	lim.sup. [km]
raw	90.6	49.4	131.9
M.A. 3 punti	96.0	54.7	137.4
M.A.5 punti	92.4	55.3	129.5

	$d_{e0} [km]$	lim. inf. [km]	lim.sup. [km]
raw	81.8	67.9	95.7
M.A. 3 punti	114.5	105.7	123.2
M.A.5 punti	104.8	94.7	114.9

possiamo osservare che i valori della lunghezza di correlazione per entrambe le componenti sono compatibili. Osserviamo inoltre che il correlogramma delle componenti nord non è monotono decrescente: questo effetto è tipico di molti correlogrammi empirici relativi a misure di campi non omogeneamente distribuite su tutta la superficie di interesse. L'effetto del massimo locale attorno al valore $d = 500$ Km è quello di aumentare l'incertezza associata alla stima di d_{n0} , diminuendo in particolare l'estremo inferiore dell'intervallo di incertezza. Assumiamo che i valori di riferimento siano dati dai fit eseguiti sui valori lisciati tramite media mobile a 3 punti, allora, euristica-mente, definiamo la stima della lunghezza di correlazione come la media tra i valori relativi alla componente est e quelli relativi alla componente nord. Perciò in seguito utilizzeremo per la lunghezza di correlazione il seguente valore:

$$d_0 = 105 \quad \text{Km.} \quad (11.73)$$

Il valore così ottenuto è inferiore di $\frac{1}{3}$ rispetto al valore di 150 Km determinato da [49], per il solo campo di velocità EUREF. I lavori [31], [33], [36], ?? fa riferimento allo stesso valore di [49] nello studio di diversi campi di velocità indipendenti dalle soluzioni EUREF, ma in essi il valore della lunghezza di correlazione non viene stimato. Nelle seguenti figure rappresentiamo il campo interpolato, relativamente alla regione europea e alla regione mediterranea.

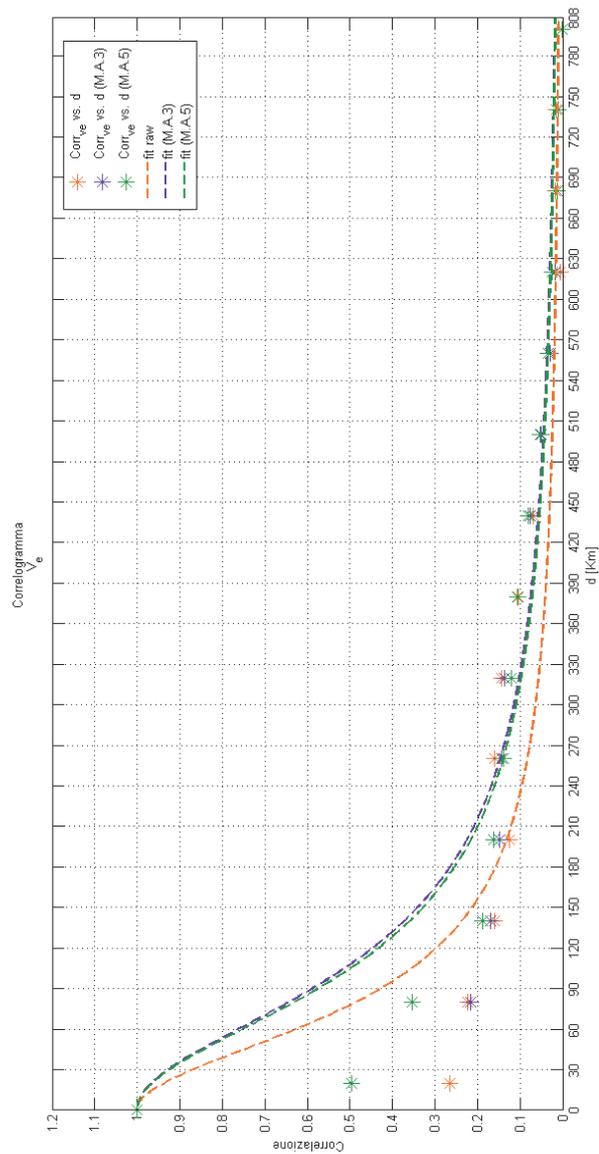


Figura 11.1: Correlogramma V_e : rosso=dati raw, blu = dati lisciati (media mobile a 3 punti), verde = dati lisciati (media mobile a 5 punti).

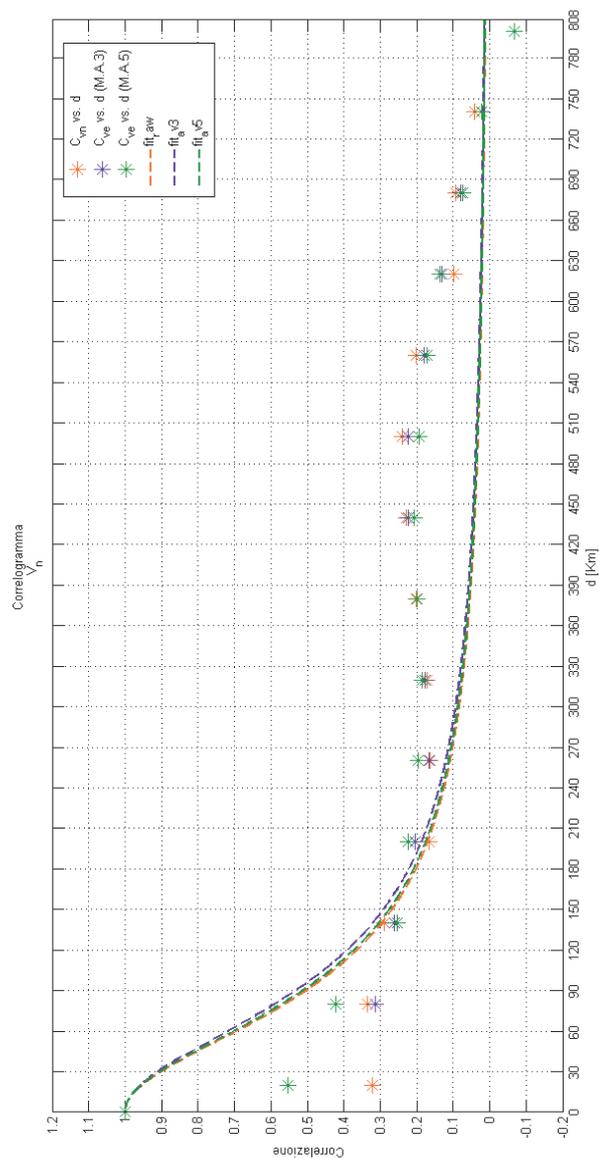
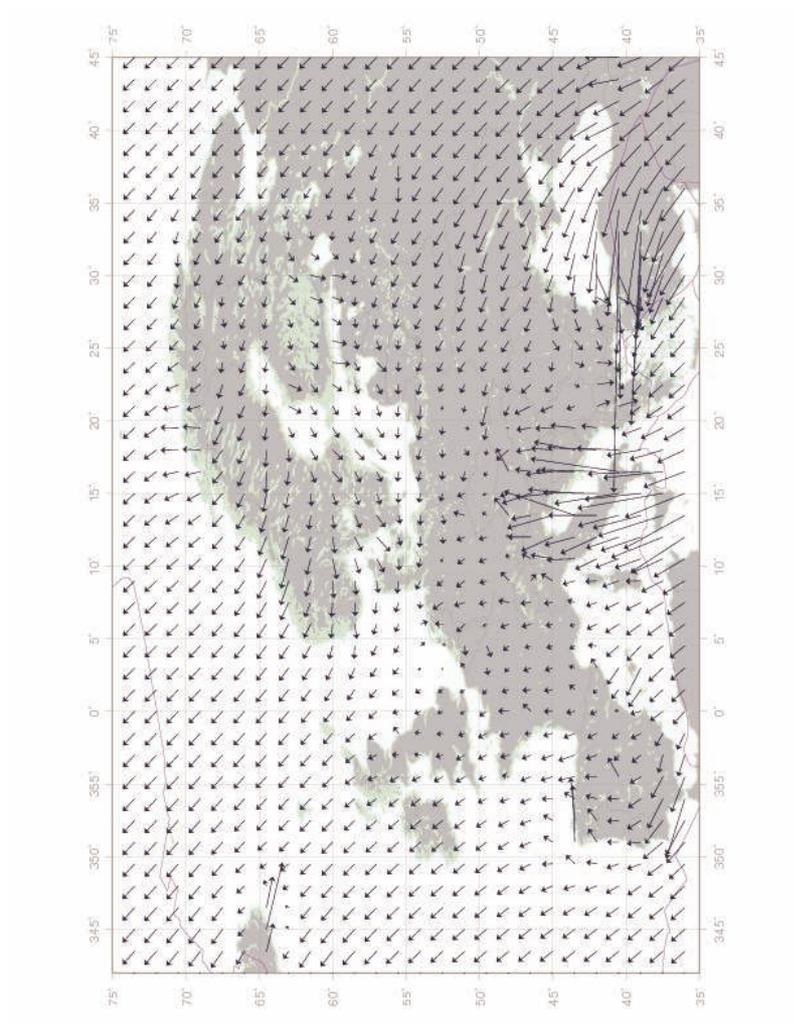
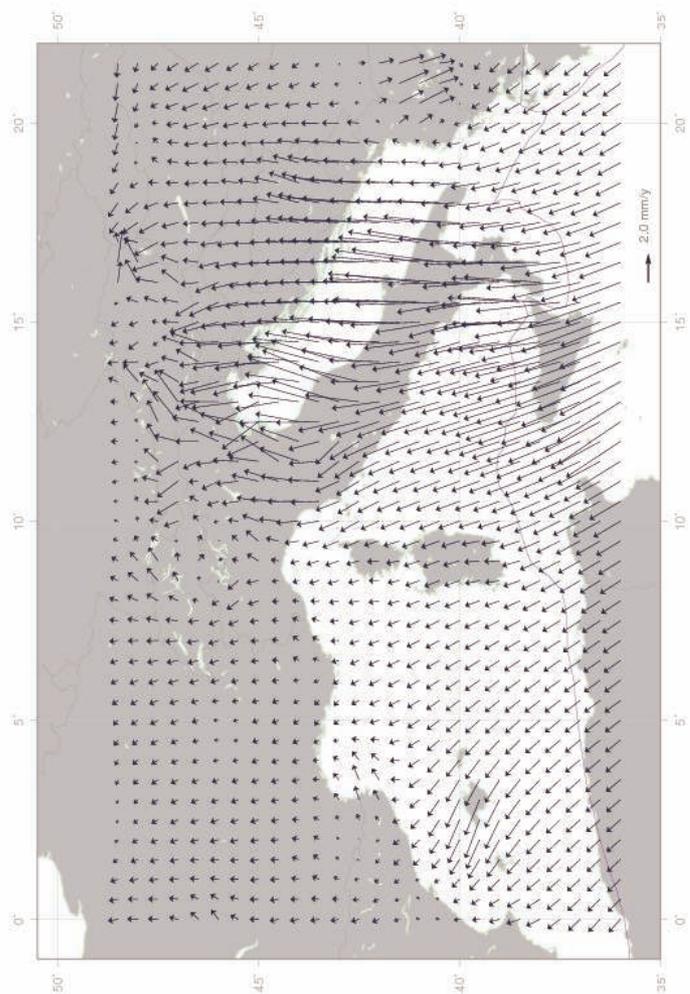


Figura 11.2: Correlogramma V_n : rosso=dati raw, blu = dati lisciati (media mobile a 3 punti), verde = dati lisciati (media mobile a 5 punti).



Campo ETRF interpolato.



Campo ETRF interpolato, regione mediterranea.

Capitolo 12

Calcolo del tasso di deformazione

12.1 Introduzione

In questo capitolo mostriamo la connessione tra la derivata temporale del tensore di deformazione e il campo di velocità, descriviamo un algoritmo per il calcolo del tasso di deformazione orizzontale in un punto qualunque della superficie di interesse ed applichiamo i risultati al campo di velocità determinato nei capitoli precedenti.

12.2 Il tasso di deformazione

Il tensore di deformazione descrive come un continuo si deforma in seguito ad una forza applicata. Per un continuo tridimensionale il tensore è definito da una matrice quadrata di dimensione 3:

$$\epsilon_{3d} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}. \quad (12.1)$$

Consideriamo ora un punto sulla superficie terrestre, siamo interessati ad indagare la deformazione orizzontale in un punto qualsiasi giacente su di essa. A tal scopo introduciamo un sistema di riferimento topocentrico bidimensionale, che avrà gli assi coordinati diretti verso est e nord. In tal caso il tensore di deformazione sarà una matrice di dimensione 2:

$$\epsilon_{2d} = \begin{pmatrix} \epsilon_{ee} & \epsilon_{en} \\ \epsilon_{ne} & \epsilon_{nn} \end{pmatrix}. \quad (12.2)$$

Supponiamo, dunque, che la deformazione sia descritta dal tensore (12.2), e che le componenti di tale tensore siano funzioni, oltre che delle coordinate spaziali, anche del tempo. Siamo interessati a descrivere quanto si dilata, o si comprime, la superficie terrestre in un punto qualsiasi, nell'unità di tempo, cioè siamo interessati a descrivere il tasso di deformazione. Il tensore che descrive tale tasso si definisce come la derivata

temporale del tensore (12.2):

$$\dot{\epsilon}_{2d} = \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{ee} & \dot{\epsilon}_{en} \\ \dot{\epsilon}_{ne} & \dot{\epsilon}_{nn} \end{pmatrix}. \quad (12.3)$$

Tra il tensore di deformazione, e il suo derivato, hanno la proprietà di essere simmetrici. Inoltre, sia $\mathbf{V} = (v^e, v^n)$ una funzione vettoriale che descrive il campo di velocità sulla superficie di interesse, si ha che, in ogni punto, le componenti del tensore del tasso di deformazione sono legate alle derivate parziali del campo \mathbf{V} tramite le seguenti relazioni:

$$\dot{\epsilon}_{ee} = \frac{\partial v^e}{\partial e} \quad (12.4)$$

$$\dot{\epsilon}_{en} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^n}{\partial e} + \frac{\partial v^e}{\partial n} \right) \quad (12.5)$$

$$\dot{\epsilon}_{nn} = \frac{\partial v^n}{\partial n}. \quad (12.6)$$

Infine il tensore di deformazione, come il suo derivato, possono essere diagonalizzati in base alle seguenti equazioni (vedi [2]):

$$\tan 2\theta = \frac{2\epsilon_{en}}{\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn}} \quad (12.7)$$

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2} (\epsilon_{ee} + \epsilon_{nn}) + \sqrt{\epsilon_{en}^2 + \frac{1}{4} (\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn})^2} \quad (12.8)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{2} (\epsilon_{ee} + \epsilon_{nn}) - \sqrt{\epsilon_{en}^2 + \frac{1}{4} (\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn})^2} \quad (12.9)$$

dove l'angolo θ definisce la direzione degli assi principali, e ϵ_1 e ϵ_2 rappresentano gli elementi diagonali del tensore diagonalizzato.

12.3 Calcolo del tensore del tasso di deformazione: approccio discreto

Per completezza, descriviamo brevemente l'algoritmo utilizzato per calcolare il tensore del tasso di deformazione in un punto, tramite un approccio discreto (vedi [30] e [28]). Consideriamo un triangolo che ha per vertici le posizioni di 3 siti le cui velocità sono conosciute. Se le dimensioni del triangolo sono piccole, in relazione al raggio terrestre, allora può essere considerato piano. Inoltre ipotizziamo che il tasso di deformazione sia omogeneo all'interno del triangolo considerato. Supponiamo che l'origine del sistema di riferimento sia il baricentro del triangolo. Le velocità dei vertici siano rappresentate

dal vettore

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_1^e \\ v_2^e \\ v_3^e \\ v_1^n \\ v_2^n \\ v_3^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_i^e \\ v_i^n \end{pmatrix}_{i=1,2,3} \quad (12.10)$$

allora, al primo ordine, per ogni vertice i , vale l'equazione:

$$\begin{pmatrix} v_i^e \\ v_i^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_B^e \\ v_B^n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial V_e}{\partial e} & \frac{\partial V_e}{\partial n} \\ \frac{\partial V_n}{\partial e} & \frac{\partial V_n}{\partial n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E_i \\ \Delta N_i \end{pmatrix} \quad (12.11)$$

la precedente eq. contiene 6 incognite: le 2 componenti della velocità del baricentro e le 4 componenti del gradiente del campo di velocità. Per ogni triangolo si possono perciò scrivere le 6 equazioni:

$$\begin{pmatrix} v_1^e \\ v_2^e \\ v_3^e \\ v_1^n \\ v_2^n \\ v_3^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta E_1 & \Delta N_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta E_1 & \Delta N_1 \\ 1 & 0 & \Delta E_2 & \Delta N_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta E_2 & \Delta N_2 \\ 1 & 0 & \Delta E_3 & \Delta N_3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta E_3 & \Delta N_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_B^e \\ v_B^n \\ \frac{\partial V_e}{\partial e} \\ \frac{\partial V_e}{\partial n} \\ \frac{\partial V_n}{\partial e} \\ \frac{\partial V_n}{\partial n} \end{pmatrix} \quad (12.12)$$

che permettono di interpolare il campo di velocità nel baricentro del triangolo e di calcolare le derivate parziali che, in combinazione con le eq. (12.4), (12.5) e (12.6), permettono il calcolo del tensore del t. di deformazione. Osserviamo che il triangolo scelto per effettuare il calcolo è assolutamente arbitrario, ne segue che per una data rete possono essere definiti diversi insiemi di triangoli per coprire la superficie di interesse (triangolazione di Delaunay), e che a insiemi di triangoli diversi corrisponderanno valori di deformazione differenti, per uno stesso punto. Siamo interessati ad eliminare questa ambiguità ed a fondare il calcolo sulle caratteristiche statistiche del campo di velocità. Quanto descritto nel capitolo precedente ci viene in aiuto.

12.4 Calcolo del gradiente del campo

12.4.1 Legame tra tensore di deformazione e gradiente del campo

Ricordiamo che in base a quanto detto nel capitolo precedente, il campo di velocità orizzontale viene approssimato per mezzo della seguente equazione:

$$\begin{pmatrix} \hat{v}_k^n \\ \hat{v}_k^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{ki}^{nn} & 0 \\ 0 & C_{ki}^{ee} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{ij}^{nn} & 0 \\ 0 & C_{ij}^{ee} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_i^n \\ V_i^e \end{pmatrix} \quad (12.13)$$

dove gli elementi di matrice C_{ij} assumono la forma di una funzione di Cauchy dipendente dalla distanza tra i siti i e j , e k indical il k -esimo nodo della griglia di interpolazione. In tale equazione le coordinate del punto su cui si desidera intepolare il campo figurano unicamente nella matrice di cross-covarianza:

$$\begin{pmatrix} C_{ki}^{nn} & 0 \\ 0 & C_{ki}^{ee} \end{pmatrix}. \quad (12.14)$$

Dato che siamo interessati a calcolare il gradiente delle funzione (12.13) nel punto di interpolazione, scriviamo le derivate parziali rispetto alle direzioni est e nord. La derivata rispetto alla direzione est è:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \hat{v}_k^n}{\partial e} \\ \frac{\partial \hat{v}_k^e}{\partial e} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial C_{ki}^{nn}}{\partial e} & 0 \\ 0 & \frac{\partial C_{ki}^{ee}}{\partial e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{ij}^{nn} & 0 \\ 0 & C_{ij}^{ee} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_i^n \\ V_i^e \end{pmatrix} \quad (12.15)$$

e la derivata rispetto alla direzione nord è:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \hat{v}_k^n}{\partial n} \\ \frac{\partial \hat{v}_k^e}{\partial n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial C_{ki}^{nn}}{\partial n} & 0 \\ 0 & \frac{\partial C_{ki}^{ee}}{\partial n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{ij}^{nn} & 0 \\ 0 & C_{ij}^{ee} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_i^n \\ V_i^e \end{pmatrix}. \quad (12.16)$$

Tra il tensore del tasso di deformazione e le derivate parziali del campo di velocità orizzontale esistono le seguenti relazioni: Il tensore del tasso di deformazione può essere diagonalizzato, la direzione degli assi principali essendo data dalla seguente equazione:

12.4.2 Calcolo delle derivate parziali della matrice di covarianza

Descriviamo esplicitamente il calcolo delle derivate parziali della funzione di covarianza, rispetto alle direzioni est e nord. Il calcolo viene eseguito presupponendo che la funzione di covarianza sia rappresentata dalla funzione di Cauchy: Per la regola di derivazione delle funzioni composte la derivata rispetto alla direzione est si scrive come:

$$\frac{\partial C_{ki}^{ee}}{\partial e} = \frac{-2d_{ij}\sigma_e^2}{d_0^2 \left[1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right)^2 \right]^2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial e} \quad (12.17)$$

mentre la derivata rispetto alla direzione nord è data da:

$$\frac{\partial C_{ki}^{ee}}{\partial n} = \frac{-2d_{ij}\sigma_n^2}{d_0^2 \left[1 + \left(\frac{d_{ij}}{d_0} \right)^2 \right]^2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial n} \quad (12.18)$$

Dove d_{ij} è la distanza sulla superficie tra il sito i e il sito j . Supponiamo ora che la superficie terrestre sia rappresentata da una sfera di raggio $r_0 = 6378$ Km. In tal caso, la separazione angolare a_{ij} tra i siti è legata alla distanza sulla sfera attraverso la relazione:

$$d_{i,j} = r_0 a_{ij}. \quad (12.19)$$

Si ha perciò che:

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial e} = r_0 \frac{\partial a_{ij}}{\partial e} \quad (12.20)$$

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial n} = r_0 \frac{\partial a_{ij}}{\partial n} \quad (12.21)$$

Sulla sfera i differenziali rispetto alle direzioni est e nord si possono esprimere come funzioni dei differenziali di λ e θ , e dalla :

$$de = r_o \cos \theta d\lambda \quad (12.22)$$

$$dn = r_0 d\theta \quad (12.23)$$

da cui si ottiene che:

$$\frac{1}{r_o \cos \theta} = \frac{d\lambda}{de} \quad (12.24)$$

$$\frac{1}{r_o} = \frac{d\theta}{dn}. \quad (12.25)$$

La regola di derivazione delle funzioni composte permette di scrivere che la derivata parziale della distanza sferica rispetto alla direzione est è:

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial e} = r_0 \frac{\partial a_{ij}}{\partial e} = r_0 \frac{\partial a_{ij}}{\partial \lambda_i} \frac{\partial \lambda_i}{\partial e} = \frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial a_{ij}}{\partial \lambda_i} \quad (12.26)$$

e quella rispetto alla direzione nord è:

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial n} = r_0 \frac{\partial a_{ij}}{\partial n} = r_0 \frac{\partial a_{ij}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial n} = \frac{\partial a_{ij}}{\partial \theta_i}. \quad (12.27)$$

Si tratta ora di calcolare le derivate parziali della distanza angolare tra la coppia di siti i e j , rispetto a λ e θ . Partiamo dalla relazione:

$$\cos(a_{ij}) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_i\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_j\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_i\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_j\right) \cos(\lambda_i - \lambda_j) \quad (12.28)$$

derivando rispetto a λ_i otteniamo:

$$-\sin a_{ij} \frac{\partial a_{ij}}{\partial \lambda_i} = -\cos \theta_i \cos \theta_j \sin(\lambda_i - \lambda_j) \quad (12.29)$$

mentre la derivata rispetto a θ_i è:

$$-\sin a_{ij} \frac{\partial a_{ij}}{\partial \theta_i} = \cos \theta_i \sin \theta_j - \sin \theta_i \cos \theta_j \cos(\lambda_i - \lambda_j) \quad (12.30)$$

Le derivate della separazione angolare a_{ij} sono perciò:

$$\frac{\partial a_{ij}}{\partial \lambda_i} = \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j \sin(\lambda_i - \lambda_j)}{\sin a_{ij}} \quad (12.31)$$

$$\frac{\partial a_{ij}}{\partial \theta_i} = \frac{\sin \theta_i \cos \theta_j \cos(\lambda_i - \lambda_j) - \cos \theta_i \sin \theta_j}{\sin a_{ij}} \quad (12.32)$$

e sostituendo le precedenti derivate nelle eq. (12.26) e (12.27) otteniamo finalmente:

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial e} = \frac{1}{\cos \theta_i} \frac{\partial a_{ij}}{\partial \lambda_i} = \frac{1}{\cos \theta_i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j \sin(\lambda_i - \lambda_j)}{\sin a_{ij}} \quad (12.33)$$

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial n} = \frac{\sin \theta_i \cos \theta_j \cos(\lambda_i - \lambda_j) - \cos \theta_i \sin \theta_j}{\sin a_{ij}}. \quad (12.34)$$

12.4.3 Calcolo dell'errore associato alle componenti del tensore del tasso di deformazione

L'approssimazione del campo data dall'eq. (12.13) permette di ricavare il gradiente del campo tramite le eq. (12.15) e (12.16). Osserviamo che, come funzioni di (V_e, V_n) , tali relazioni sono lineari. Ricordiamo inoltre che, se vale la relazione vettoriale:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (12.35)$$

dove \mathbf{A} è una matrice che rappresenta una funzione lineare, e $\mathbf{C}_x, \mathbf{C}_y$ rappresentano le matrici di covarianza associate ai vettori \mathbf{x} e \mathbf{y} , allora vale anche la seguente equazione:

$$\mathbf{C}_y = \mathbf{A}\mathbf{C}_x\mathbf{A}^T. \quad (12.36)$$

L'eq (12.36) determina come trasforma la matrice di covarianza a seguito di una trasformazione lineare. Nel caso delle derivate parziali del campo di velocità orizzontale, identifichiamo le trasformazioni lineari con le seguenti matrici:

$$\mathbf{A}_{de} = \begin{pmatrix} \frac{\partial C_{ki}^{nn}}{\partial e} & 0 \\ 0 & \frac{\partial C_{ki}^{ee}}{\partial e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{ij}^{nn} & 0 \\ 0 & C_{ij}^{ee} \end{pmatrix}^{-1} \quad (12.37)$$

$$\mathbf{A}_{dn} = \begin{pmatrix} \frac{\partial C_{ki}^{nn}}{\partial n} & 0 \\ 0 & \frac{\partial C_{ki}^{ee}}{\partial n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{ij}^{nn} & 0 \\ 0 & C_{ij}^{ee} \end{pmatrix}^{-1} \quad (12.38)$$

e la matrice di covarianza \mathbf{C}_x con la matrice:

$$\mathbf{C}_x = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^{n2} & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^{n2} & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & \sigma_{q-1,q-1}^{e2} & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & \sigma_{q,q}^{e2} \end{pmatrix} \quad (12.39)$$

che corrisponde alla matrice del noise descritta nel capitolo precedente, opportunamente scalata per un fattore 10. Tramite la relazione (12.36) possiamo mappare le incertezze della stima delle velocità nelle incertezze delle derivate parziali delle componenti delle velocità, calcolate in un punto qualunque della superficie di interesse. Le varianze delle componenti diagonali (12.4) e (12.6) del tensore del tasso di deformazione si scrivono perciò come:

$$\sigma_{ee}^2 = \sigma_{\frac{\partial v_k^e}{\partial e}}^2 \quad (12.40)$$

$$\sigma_{nn}^2 = \sigma_{\frac{\partial v_k^n}{\partial n}}^2 \quad (12.41)$$

mentre la varianza associata al termine diagonale è data da:

$$\sigma_{en} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{\frac{\partial v_k^n}{\partial e}}^2 + \sigma_{\frac{\partial v_k^e}{\partial n}}^2} \quad (12.42)$$

12.4.4 Calcolo degli errori associati al tensore del tasso di deformazione diagonalizzato

Il tensore del tasso di deformazione diagonalizzato consente di individuare le direzioni di maggiore espansione e compressione in ogni punto della superficie di interesse. Come abbiamo visto il tensore del t. di deformazione può essere sempre diagonalizzato per mezzo delle relazioni (12.7), (12.8) e (12.9). Siamo interessati perciò a ricavare le incertezze per le componenti diagonali del suddetto tensore. Osserviamo che le eq. che legano le componenti del tensore non diagonalizzato a quelle del tensore diagonalizzato non sono lineari. Potremo perciò ottenere solo una approssimazione al primo ordine delle incertezze. Indicando le incertezze relative alle componenti ϵ_{ee} , ϵ_{nn} e ϵ_{en} con $d\epsilon_{ee}$, $d\epsilon_{nn}$ e $d\epsilon_{en}$, rispettivamente, e sviluppando al primo ordine le relazioni (12.8) e (12.9), otteniamo:

$$d\epsilon_1 = \frac{1}{2}(d\epsilon_{ee} + d\epsilon_{nn}) + \frac{\frac{1}{2}(d\epsilon_{ee} - d\epsilon_{nn})(\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn}) + 2d\epsilon_{en}\epsilon_{en}}{2\sqrt{\epsilon_{en}^2 + \frac{1}{4}(\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn})^2}} \quad (12.43)$$

$$d\epsilon_2 = \frac{1}{2}(d\epsilon_{ee} + d\epsilon_{nn}) - \frac{\frac{1}{2}(d\epsilon_{ee} - d\epsilon_{nn})(\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn}) + 2d\epsilon_{en}\epsilon_{en}}{2\sqrt{\epsilon_{en}^2 + \frac{1}{4}(\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn})^2}} \quad (12.44)$$

Per l'angolo di azimuth si ha:

$$d\theta = \cos^2 2\theta \left[\frac{d\epsilon_{en}}{\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn}} - \epsilon_{en} \frac{d\epsilon_{ee} + d\epsilon_{nn}}{(\epsilon_{ee} - \epsilon_{nn})^2} \right] \quad (12.45)$$

12.5 Applicazione al campo di velocità combinato.

In questo paragrafo utilizziamo il campo di velocità orizzontale ETRF determinato in precedenza per inferire il tensore del tasso di deformazione.

12.5.1 Regione considerata

La regione caratterizzata dalla maggior densità di siti è quella compresa, approssimativamente, tra 36° e 49° di latitudine, e 0° e 22° di longitudine. Tale regione è sufficientemente ampia da comprendere le principali strutture geologiche che caratterizzano l'area mediterranea e l'arco alpino.

12.5.2 Caratteristiche del campo approssimato

Il campo di velocità viene approssimato per mezzo della stima di minima varianza descritta nei capitoli precedenti. La funzione di covarianza è una funzione di Cauchy con i valori di varianze e distanza di correlazione desunti al capitolo 13. L'interpolazione viene effettuata su una griglia di 0.5° , e all'interpolazione concorrono tutti i valori osservati del campo di velocità combinato.

12.5.3 Tasso di deformazione nella regione mediterranea.

La figura seguente rappresenta una visualizzazione del tasso di deformazione relativamente alla regione considerata. Vengono rappresentate le componenti principali del tensore del tasso di deformazione. In rosso è indicata la direzione di massima estensione, e in blu quella di massima compressione. I triangoli neri, infine, indicano la distribuzione dei siti (EUREF, GP ed UPA). La figura (12.1) rappresenta i valori degli assi principali del tensore del tasso di deformazione interpolati su una griglia di punti equidistanti 0.5° . Qualitativamente la figura consente di individuare le zone di maggior estensione e compressione. Possiamo notare che la regione apenninica centro-settentrionale è caratterizzata da un forte movimento espansivo, con valori del tasso di espansione dell'ordine dei 20 nanostrain/anno. Altre zone di deformazione si individuano in corrispondenza delle alpi, della basilicata, dello stretto di Sicilia e dei monti abanidi. Osserviamo infine che il blocco costituito dalla Sardegna e dalla Corsica non presenta tassi di deformazione significativi.

Confrontiamo ora i risultati ottenuti dal campo velocità con gli studi precedenti. Tra gli studi che si occupano dell'area esaminata in precedenza troviamo i lavori [13], [16]. Il primo lavoro si basa su una combinazione delle eq. normali EUREF ed UPA, relativa a 45 distribuiti sull'area considerata, con un intervallo temporale massimo di osservazione di 6 anni. In tal caso il software di elaborazione è bernese 4.2, quello di stacking è ADDNEQ, e il calcolo del tensore del tasso di deformazione è eseguito per mezzo di un algoritmo di minima varianza analogo a quello descritto nei parametri precedenti. Il secondo lavoro si basa su una combinazione di varie reti GPS a carattere locale, regionale e globale, il software di elaborazione è GAMIT/GLOBK e quello di stacking è QOCA. L'algoritmo di calcolo del tensore del tasso di deformazione è basato su un approccio discreto e sulla triangolazione di Delunay. Infine, la combinazione si basa su dati raccolti tra il 1991 e il 2002, Confrontiamo i risultati da noi ottenuti del secondo lavoro, per 3 motivi:

1. Il numero di siti considerati e l'intervallo temporale sono confrontabili con il nostro lavori.
2. I softwares di elaborazione, di stacking e di calcolo del tasso di deformazione sono diversi da quelli che noi abbiamo utilizzato.
3. Le reti GPS considerate sono differenti.

Un accordo tra i nostri risultati e quelli del secondo lavoro citato costituirebbe, pertanto, una conferma più rigorosa del lavoro svolto. Per confrontare i risultati abbiamo scelto di calcolare il tasso di deformazione in corrispondenza dei 37 distretti sismotettonici individuati da [16], e rappresentati dalla figura (12.2). Il tasso di deformazione relativo a tali distretti è rappresentato dalla figura (12.3).

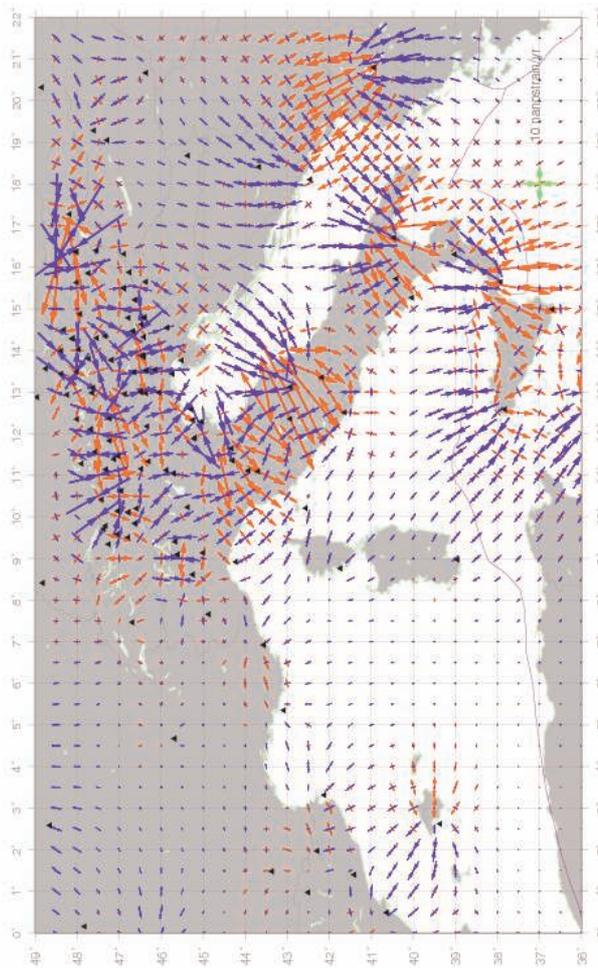


Figura 12.1: Campo di deformazione interpolato su una griglia di punti equispaziati (0.5°).



Figura 12.2: Posizione dei principali distretti sismici nella regione mediterranea.

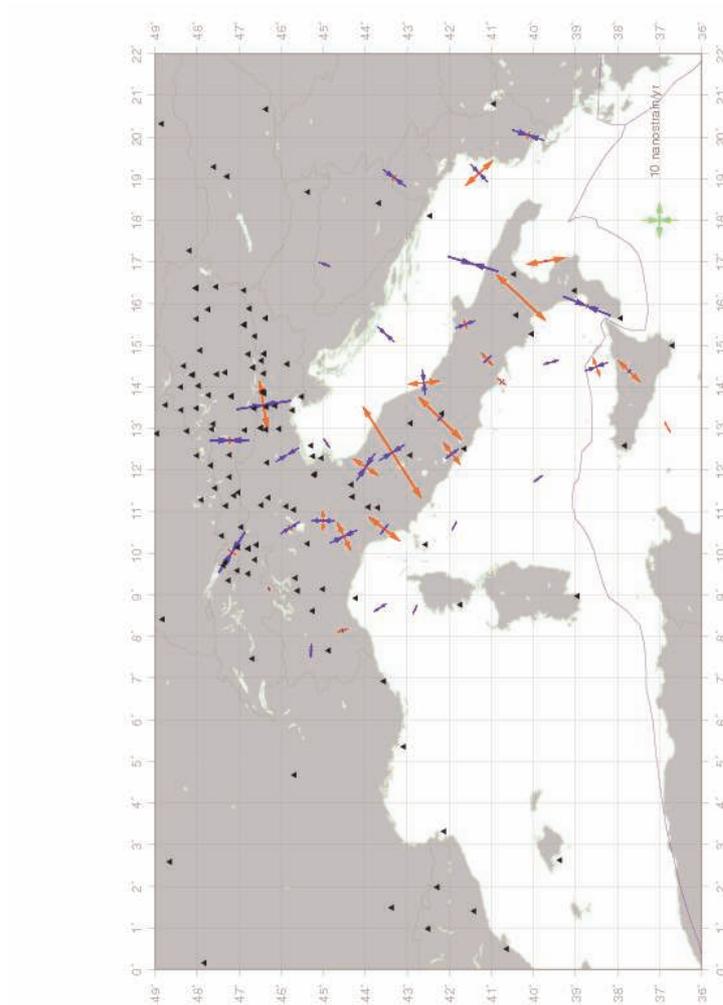


Figura 12.3: Tasso di deformazione relativo ai principali distretti sismici.

La tabella seguente rappresenta i valori del tasso della figura (12.3). I distretti che mostrano in maggior accordo sono evidenziati nella figura (12.4).

$\lambda[^\circ]$	$\phi[^\circ]$	$\epsilon_{\max}[\frac{10^{-9}}{yr}]$	$\sigma_{\epsilon_{\max}}$	$\epsilon_{\min}[\frac{10^{-9}}{yr}]$	$\sigma_{\epsilon_{\min}}$	$\theta[^\circ]$	σ_θ	Distretto
13.03	36.81	3.39	1.58	-0.08	1.04	-28.58	19.13	1
14.37	37.72	8.34	2.51	1.33	0.13	-45.54	-4.67	2
14.48	38.5	5.62	2.68	-6.49	0.85	-19.98	4.22	3
15.94	38.73	1.39	1.01	-13.62	7.03	22.34	4.24	4
14.59	39.58	0.46	2.84	-4.14	2.03	-16.49	21.31	5
17.02	39.71	10.78	2.9	0.49	2.9	79.96	-11.61	6
16.14	40.29	18.51	7.4	-0.02	1.18	-46.68	-2.79	7
14.12	40.75	2.97	3.19	-1.57	0.48	-49.44	-4.28	8
14.66	41.1	4.49	3.16	-2.93	0.78	-41.51	7.23	9
15.5	41.62	2.76	1.67	-5.71	0.99	-20.9	6.33	10
11.79	39.89	0.93	0.97	-2.97	0.28	-36.87	4.75	11
10.66	41.88	0.3	2.71	-2.6	0.49	-60.48	-10.67	12
12.39	41.94	7.69	3.6	-4.21	0.83	-36.88	4.97	13
13.24	42.22	16.43	5.63	1.94	0.95	-45.02	0.2	14
14.1	42.61	8.7	3.03	-6.94	2.27	84.06	-6.16	15
8.64	42.82	0.62	3.94	-2.61	0.41	-66.13	-4.94	16
8.69	43.65	-0.13	2.89	-4.2	0.72	-33.77	13.59	17
10.58	43.55	10.87	4.89	-3.27	1.08	-52.05	-1.56	18
12.42	43.36	29.81	6.64	-7.95	0.46	-32.26	0.52	19
8.14	44.54	2.95	1.84	-0.93	4.41	74.64	-25.69	20
10.4	44.51	8.46	4.41	-8.16	1.66	-25.55	4.89	21
12.07	43.99	8.35	5.2	-8.91	0.65	-56.04	-0.21	22
10.78	45.01	5.53	3.2	-6.25	3.74	-0.31	12.33	23
12.64	44.92	0.98	1.08	-2.95	5.6	53.8	-11.54	24
7.66	45.29	1.13	3.28	-3.52	2.83	-88.07	-27.62	25
9.14	46.29	1.57	6.05	-0.11	2.24	-27.04	78.71	26
10.61	45.79	-1.48	8.35	-6.04	1.75	-33.07	16.17	27
10.02	47.17	2.64	9.26	-13.03	2.11	-57.49	-6.08	28
12.37	45.85	-0.05	7.78	-7.09	1.65	-31.54	13.37	29
12.71	47.23	1.97	5.56	-10.5	4.76	-1.17	16	30
13.56	46.42	13.34	7.08	-14.82	4.88	-9.12	8.41	31
16.94	44.97	1.2	0.67	-3.16	2.33	19.76	10.13	32
15.26	43.51	0.52	0.08	-6.25	1.43	42.87	0.96	33
19.02	43.31	1.93	0.9	-7.63	5.72	37.68	-2.28	34
19.13	41.29	10.3	0.33	-6.62	2.67	47.16	0.09	35
16.95	41.44	0.99	0.35	-14.14	3.31	16.85	2.33	36
20.04	40.12	1.99	0.42	-9.08	2.24	18.58	2.38	37

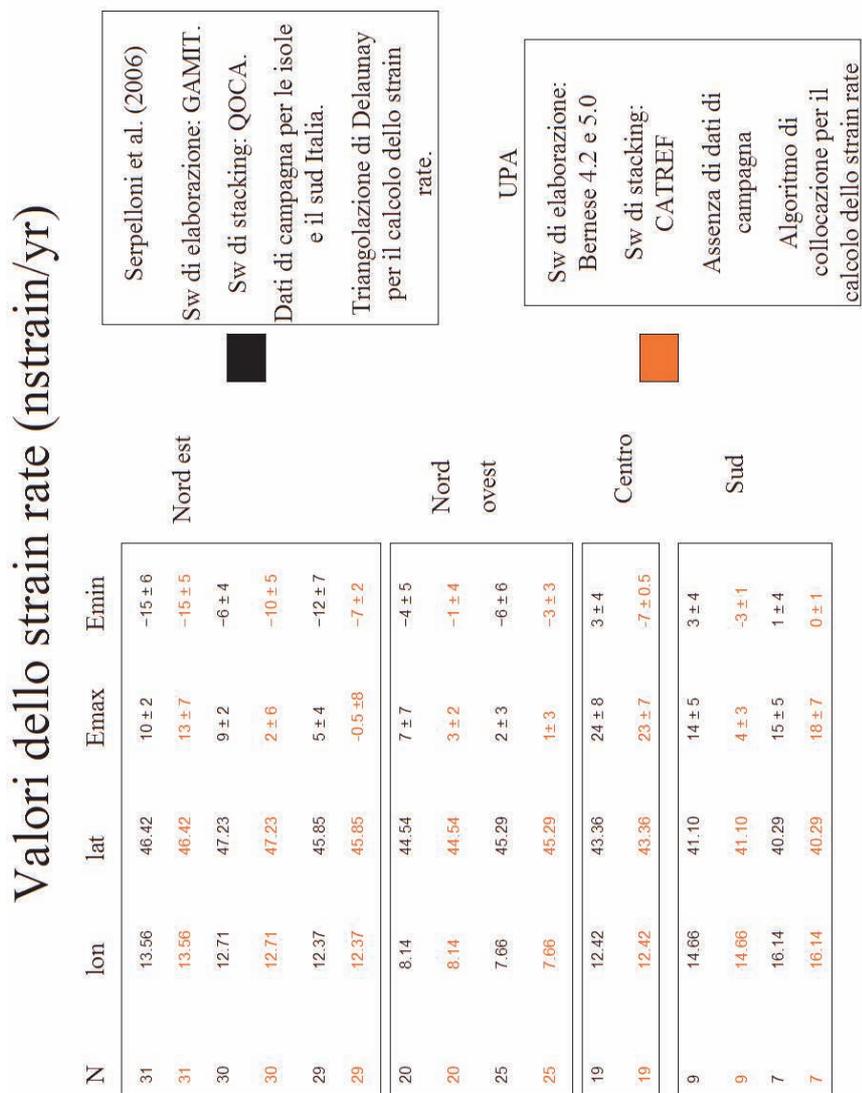


Figura 12.4: Distretti sismotettonici che mostrano il miglior accordo.

Conclusioni

E' stato determinato un campo di velocità valido per la regione europea combinando soluzioni settimanali provenienti da tre reti GPS (EUREF, UPA, GP, per un totale di 247 siti). Dai sistemi di equazioni normali sono stati rimossi i vincoli preesistenti e sono stati imposti i minimi vincoli, rispetto alla soluzione ITRF mappata all'epoca di interesse. Per ciascun network è stata eseguita una combinazione multi-anno preliminare, imponendo vincoli interni, allo scopo di determinare le discontinuità e rimuovere gli outliers presenti nelle serie storiche di ogni sito. In questa fase dell'elaborazione si è notata la scarsa consistenza, in termini di sistema di riferimento, delle soluzioni settimanali UPA e GP. Tale problema non degrada la qualità intrinseca delle soluzioni settimanali in questione, come dimostrato dai valori del WRMS, che sono risultati paragonabili a quelli relativi alla soluzione EUREF. La combinazione dei sistemi di equazioni normali delle tre reti, effettuata settimana per settimana, da cui sono state ottenute le soluzioni settimanali EGU, ha consentito di migliorare la consistenza, raggiungendo un livello paragonabile alla soluzione EUREF. In termini di velocità abbiamo verificato che il campo così ottenuto è allineato a quello ITRF2005 a livello di 0.11 mm/yr per la componente est e di 0.07 mm/yr per la componente nord. Abbiamo infine verificato che l'intervallo minimo di tempo considerato è sufficiente a mediare gli effetti del termine annuale presente nelle serie storiche di molti siti. L'effetto del termine annuale è di 0.01 mm/yr per la componente est, e di 0.06 mm/yr per la componente nord.

In un secondo tempo abbiamo effettuato l'elaborazione di 9 campagne, a cadenza annuale e di 2 anni, relative alla rete GPS CEGRN (intervallo temporale 1994–2007), utilizzando orbite ed EOPs riprocessati [50], distribuita nell'Europa centro-orientale. Le equazioni normali di campagna, combinate con le corrispondenti prodotte da altri centri di analisi, sono state combinate con le rispettive soluzioni settimanali EGU, allo scopo di ottenere una nuova soluzione che rappresentasse un campo di velocità densificato adatto a descrivere la cinematica della crosta terrestre nella regione europea mediterranea e centro-orientale. Il numero di siti la cui velocità è stata determinata è di 296.

Le proprietà statistiche di tale campo sono state indagate: sotto le ipotesi di isotropia ed omogeneità sono state determinate le varianze delle componenti nord ed est e i parametri delle funzioni di covarianza. La funzione di covarianza è rappresentata da una funzione di Cauchy con lunghezza di correlazione stimata pari a $d_0 = 105$ Km. L'informazione statistica è stata usata per approssimare il

campo di velocità per mezzo di un algoritmo di minima varianza. Il tensore del tasso di deformazione è stato calcolato derivando rispetto alle direzioni nord ed est l'approssimazione analitica sopra citata. I valori del tensore del tasso di deformazione così calcolato sono risultati essere in accordo con quelli determinati da [16]. Le alpi sudorientali mostrano un tasso di deformazione di $10 \div 15$ nstrain/yr, l'Italia centrale è caratterizzata da un tasso di estensione di circa 25 nstrain/yr, in direzione ortogonale alla catena apenninica. La Sardegna e la Corsica non rivelano tassi di deformazione apprezzabili. In generale l'accordo tra i valori del tasso di deformazione calcolati da noi e [16] è migliore nelle zone di maggior densità di siti. Riteniamo che tale risultato rappresenta una conferma indipendente dei valori che il tasso di deformazione della crosta assume nell'area studiata. Considerando che i due campi di velocità differiscono per siti, software di elaborazione e di stacking, e per algoritmo di calcolo del tasso di deformazione, possiamo affermare, inoltre, che tale accordo rappresenta anche una conferma della stima della lunghezza di correlazione. Infine, il campo di velocità combinato si presta facilmente ad ulteriori densificazioni, necessarie soprattutto per esaminare le deformazioni nell'Italia centro-meridionale.

Appendice A

Scripts

A.1 Driver per il download dei dati e il pre-processing dei files

```
#!/usr/bin/perl
    use diagnostics;
    use strict;
    use lib $ENV{BPE};
    use startBPE;
    use bpe_util;
    use Gps_Date;
    use Bernutil;
    my $server;
    my $datadir = "C:/GPSDATA";
    my $gpsdata = 'GPSDATA'; #don't forget to use backslash!!! otherwise teqc does not work...
    my $gpsweek = $ARGV[0]; #set GPS week
    my @gpsday = (0..6);
    my $year2 = &gps_date("-wd $gpsweek 0 -o %y");
    my $year4 = '20'.$year2;
    #set month the day of the week belongs to.
    my @month;
    $month[0] = &gps_date("-wd $gpsweek 0 -o %m");
    $month[1] = &gps_date("-wd $gpsweek 1 -o %m");
    $month[2] = &gps_date("-wd $gpsweek 2 -o %m");
    $month[3] = &gps_date("-wd $gpsweek 3 -o %m");
    $month[4] = &gps_date("-wd $gpsweek 4 -o %m");
    $month[5] = &gps_date("-wd $gpsweek 5 -o %m");
    $month[6] = &gps_date("-wd $gpsweek 6 -o %m");
    my @doy;
    my @day;
```

```

my @campdir;
#update satellit and sat_2005 files
my $url = 'http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/GEN/SATELLIT.';
my $ld = 'C:\BERN50\GPS\GEN';
my $lf = 'SATELLIT';
&downloadfromberne($url,$ld,$lf);
$url = 'http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/GEN/SAT_ $year4.CRX';
$lf = 'SAT_'. $year4.'.CRX';
&downloadfromberne($url,$ld,$lf);
# set doy, day of the month and campaing names (YY_DDD)
for (my $i=0; $i<=6; ) {
$doy[$i] = &gps_date("-wd $gpsweek $i -o %j");
$day[$i] = &gps_date("-wd $gpsweek $i -o %d");
$campdir[$i] = $year2."_". $doy[$i];
$i++;
}
print "@gpsday\n";
print "@doy\n";
print "@day\n";
print "@campdir\n";
# set days of the week whose data we want to download
my $first = 0;
my $last = 6;
print "Downloading from DOW $first to DOW $last\n";
# create YY_DDD directory and download compressed data (RINEX, orbits, clock, pole etc.)
# use makecamp for EUREF stations and makecampu for NON EUREF ones.
# REMEMBER to set $datadir accordingly.
for (my $i=$first; $i<=$last; ) {
&makecamp ($doy[$i],$gpsday[$i],$year2,$year4,$datadir,$campdir[$i],$gpsweek);
$i++;
}
# create wk(GPSweek) directory and download compressed data.
print "\nCreating.... : wk$gpsweek\n";
#&maketree($datadir.'/wk'. $gpsweek);
my $from = "C:/GPSUSER/BERNEZ/STA";
my $to = $datadir.'/wk'. $gpsweek.'/STA';
#&copyfromto($from,$to);
# download pole
#my $hostname = "igs2.ifag.de";
my $hostname = "igscb.jpl.nasa.gov";
my $username = "anonymous";
my $password = "none";
#my $remotedir = "/IGS/products/orbits/$gpsweek";

```

A.1. DRIVER PER IL DOWNLOAD DEI DATI E IL PRE-PROCESSING DEI FILES 281

```
my $remotedir = "/pub/product/$gpsweek";
my $localdir = $datadir.'/wk'.$gpsweek.'/ORB';
#my $remotefile = "IGS".$gpsweek."7.ERP";
my $remotefile = "igs".$gpsweek."7.erp.Z";
my $mode = 'binary';
#my $localfile = "IGS".$gpsweek."7.IEP";
my $localfile = "igs".$gpsweek."7.erp.Z";
#&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);
chdir $datadir.'/wk'.$gpsweek.'/ORB';
system "gunzip -f *.erp.Z";
system "copy *.ERP *.IEP";
# decompress Gzipped data using Gzip 1.3.5
for (my $i=$first; $i<=$last; ) {
&decomp ($datadir,$campdir[$i]);
$i++;
}
# decompress crinex files using crz2rnx
for (my $i=$first; $i<=$last; ) {
&crztorrx ($datadir,$campdir[$i],$year2);
$i++;
}
# trim RINEX files and redefine their headers, accordingly to .CFG files
# (contained in bernez directory)
$server = 'C:\GPSUSER\BERNEZ\perlscripts\ASI';
for (my $i=$first; $i<=$last; ) {
&qualitycheck ($doy[$i],$month[$i],$day[$i],$year2,$server,$gpsdata);
$i++;
}
$server = 'C:\GPSUSER\BERNEZ\perlscripts\BKG';
for (my $i=$first; $i<=$last; ) {
&qualitycheck ($doy[$i],$month[$i],$day[$i],$year2,$server,$gpsdata);
$i++;
}
$server = 'C:\GPSUSER\BERNEZ\perlscripts\OLG';
for (my $i=$first; $i<=$last; ) {
&qualitycheck ($doy[$i],$month[$i],$day[$i],$year2,$server,$gpsdata);
$i++;
}
# $server = 'C:\GPSUSER\BERNEZ\perlscripts\IGN';
#for (my $i=$first; $i<=$last; ) {
#&qualitycheck ($doy[$i],$month[$i],$day[$i],$year2,$server,$gpsdata);
# $i++;
#}
```

```

$server = 'C:\GPSUSER\BERNEZ\perlscripts\CDDIS.txt';
for (my $i=$first; $i<=$last; ) {
&qualitycheck ($doy[$i],$month[$i],$day[$i],$year2,$server,$gpsdata);
$i++;
}
# RUN BERNESE!!!
#chdir 'C:\GPSUSER\BERNEZ\perlscripts';
#system ("perl prcd.pl $gpsweek all");
#
#chdir 'C:\GPSUSER\BERNEZ\perlscripts';
#system ("perl downloadu.pl $gpsweek");
#system ("perl prcd_int.pl $gpsweek all");

```

A.2 Modulo chiamato dal driver

```

#!/usr/bin/perl
package Bernutil;
require Exporter;
use strict;
use warnings;
use Gps_Date;
our @ISA = qw(Exporter);
our @EXPORT = qw(makecamp
makecampu
maketree
downloadfrom
downloadfromberne
copyfromto
decomp
crztornx
qualitycheck
sendto
uploadtoigs);
sub makecamp {

    # Create tree structure and download (compressed) data
    # from ASI, BKG, IGN and OLG.
    # List of stations must be provided trough ASI, BKG,
    # IGN and OLG text files.

    my $doy = $_[0];
    my $gpsday = $_[1];

```

```

my $year2 = $_[2];
my $year4 = $_[3];
my $datadir = $_[4];
my $campdir = $_[5];
my $gpsweek = $_[6];

my $hostname;
my $username;
my $password;
my $remotedir;
my $remotefile;
my $localdir;
my $localfile;
my $mode;

# Clear FTPLOG file
if (-e "ftplog") {unlink "ftplog"};

# Create campaign directory and subdirectories structure
if (&maketree($datadir."/". $campdir)) {
print "\n Campaign dir created\n";
} else {
print "\nERROR! Campaign dir NOT created\n";
}

#####
# download orbit, clock, pole and ionosphere from IGS
# -----
$hostname = "igs2.ifag.de";
$hostname = "igscb.jpl.nasa.gov";
$username = "anonymous";
$password = "wsftp605@";

#$remotedir = "/IGS/products/orbits/$gpsweek";
$remotedir = "/pub/product/$gpsweek";
$localdir = $datadir."/". $campdir."/ORB";

# download precise orbit
#$remotefile = "IGS". $gpsweek.$gpsday.".SP3";
#$localfile = "IGS". $gpsweek.$gpsday.".PRE";
$remotefile = "igs". $gpsweek.$gpsday.".sp3.Z";

```

```

$localfile = "igs".$gpsweek.$gpsday.".sp3.Z";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

# download rapid orbit
#$remotefile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".SP3";
#$localfile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".PRE";
$remotefile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".sp3.Z";
$localfile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".sp3.Z";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

# download precise pole
#$remotefile = "IGS".$gpsweek."7.ERP";
#$localfile = "IGS".$gpsweek."7.IEP";
$remotefile = "igs".$gpsweek."7.erp.Z";
$localfile = "igs".$gpsweek."7.erp.Z";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

# download rapid pole
#$remotefile = "IGS".$gpsweek."7.ERP";
#$localfile = "IGS".$gpsweek."7.IEP";
$remotefile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".erp.Z";
$localfile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".erp.Z";
$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
print "rapid pole..... $remotefile";
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

# download precise clock
#$remotefile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".CLK";
#$localdir = $datadir."/".$campdir."/OUT";
$remotefile = "igs".$gpsweek.$gpsday.".clk.Z";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/OUT";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);

```

```

# download rapid clock
#$remotefile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".CLK";
#$localdir = $datadir."/".$campdir."/OUT";
$remotefile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".clk.Z";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/OUT";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);

# download ionosphere
#$hostname = 'igs2.ifag.de';
#$remotedir = "/IGS/products/orbits/YEAR_20".$year2."/".$gpsweek;
$hostname = 'igs.ifag.de';
$username = "anonymous";
$password = "wsftp605@";
$remotedir = "/IGS/products/orbits/".$gpsweek;
print "$remotedir\n";
$remotefile = "cod".$gpsweek.$gpsday.".ion.Z";
print "$remotefile\n";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ATM";
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
#=====
# copy files from BERNEZ into STA subdirectory
#-----
my $from = "C:/GPSUSER/BERNEZ/STA";
my $to = $datadir."/".$campdir."/STA";
&copyfromto($from,$to);

#=====
# download data from Berne
#-----
my $url = 'http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/ORB/P1P2.DCB';
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORB";
$localfile = 'P1P2.DCB';
&downloadfromberne($url,$localdir,$localfile);

$url = 'http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/ORB/P1C1.DCB';
$localfile = 'P1C1.DCB';
&downloadfromberne($url,$localdir,$localfile);

#=====
# RINEX files download

```

```

# -----
my @stations;

# # download from ASI
open(ASI, "ASI_R") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <ASI>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "geodaf.mt.asi.it";
$username = "anonymous";
$password = "none";
$remotedir = "/GEOD/GPSD/RAW/" . $year4 . "/" . $doy;
$localdir = $datadir . "/" . $campdir . "/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
$remotefile = $line . $doy . "0." . $year2 . "d.Z";
print "\n$remotefile";
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
}
close(ASI);

# download from BKG
open(BKG, "BKG_R") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <BKG>;
chomp(@stations);
print @stations;

#$hostname = "igs2.ifag.de";
$hostname = "igs.ifag.de";
$username = "anonymous";
$password = 'andrea.nardo@unipd.it';
$localdir = $datadir . "/" . $campdir . "/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
#$remotedir = "/gpsdata/" . $line;
$remotedir = "/EUREF/obs/" . $year4 . "/" . $doy;
$remotefile = $line . $doy . "0." . $year2 . "d.Z";
print "\n$remotefile";
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
  #$remotedir = "/IGS/obs/" . $year4 . "/" . $doy;
  #&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
}

```

```

close(BKG);

# # download from IGN
# open(IGN, "IGN") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
# @stations = <IGN>;
# chomp(@stations);
# print @stations;

# $hostname = "igs.ensg.ign.fr";
# $username = "anonymous";
# $password = "wsftp605@";
# $localdir = $datadir."/".$scampdir."/ORX";
# $remotedir = "/pub/igs/data/"$year4."/".$doy;
# $mode = 'binary';
# foreach my $line (@stations) {
#     $remotefile = $line.$doy."0."$year2."d.Z";
#     print "\n$remotefile";
#     &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
# }
# close(IGN);
# download from CDDIS
# open(CDDIS, "CDDIS.txt") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
# @stations = <CDDIS>;
# chomp(@stations);
# print @stations;
#
# $hostname = "cddis.gsfc.nasa.gov";
# $username = "anonymous";
# $password = "wsftp605@";
# $localdir = $datadir."/".$scampdir."/ORX";
# $remotedir = "/pub/gps/data/daily/"$year4."/".$doy."/".$year2."d";
# $mode = 'binary';
# foreach my $line (@stations) {
#     $remotefile = $line.$doy."0."$year2."d.Z";
#     $localfile = $line.$doy."0."$year2."d.Z";
#     print "\n$remotefile";
#     &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);
# }
# close(CDDIS);

# download from OLG
# open(OLG, "OLG") or die "\nERROR! Can't open file: $!";

```

```

# @stations = <OLG>;
# chomp(@stations);
# print @stations;
#
# $hostname = "olggps.oeaw.ac.at";
# $username = "anonymous";
# $password = "wsftp605@";
# $localdir = $datadir."/".$campdir."/ORX";
# $mode = 'binary';
# foreach my $line (@stations) {
#     $remotedir = "/pub/outdata/" . $line;
#     $remotefile = $line.$doy."0." . $year2."d.Z";
#     print "\n$remotefile";
#     &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
# }
# close(OLG);

## download from UPA
open(UPA, "UPAU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <UPA>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "ux1.unipd.it";
$username = "gps-upad";
$password = "kslhhsng";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORX";
$mode = 'binary';

## Attenzione alla particolare struttura della
## directory di GPS-UPAD!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
foreach my $line (@stations) {
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/" . $line;
    $remotefile = $line.$doy."0." . $year2."d.Z";
    print "\n$remotefile";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
    $remotefile = $line.$doy."0." . $year2."e";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/trento/" . $line;
    $remotefile = $line.$doy."0." . $year2."e";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
}
close(UPA);
}

```

```

sub makecampu {

    # Create tree structure and download (compressed) data
    # from ASI, BKG, OLG, SOP and UPA, UPAFREDNET
    # List of stations must be provided trough ASIU, BKGU,
    # OLGU, SOPU, UPAU and UPAUFRED text files.
    my $doy = $_[0];
my $gpsday = $_[1];
my $year2 = $_[2];
my $year4 = $_[3];
my $datadir = $_[4];
my $campdir = $_[5];
my $gpsweek = $_[6];

my $hostname;
my $username;
my $password;
my $remotedir;
my $remotefile;
my $localdir;
my $localfile;
my $mode;

    # Clear FTPLOG file
if (-e "ftplog") {unlink "ftplog"};

    # Create campaign directory and subdirectories structure
if (&maketree($datadir."/". $campdir)) {
print "\n Campaign dir created\n";
} else {
print "\nERROR! Campaign dir NOT created\n";
}

#=====
# download orbit, pole, clock and ionosphere from IGS
# -----
#$hostname = "igs2.ifag.de";
$hostname = "igscb.jpl.nasa.gov";
$username = "anonymous";
$password = 'andrea.nardo@unipd.it';

```

```

#$remotedir = "/IGS/products/orbits/$gpsweek";
$remotedir = "/pub/product/$gpsweek";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORB";

# download precise orbit
#$remotefile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".SP3";
#$localfile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".PRE";
$remotefile = "igs".$gpsweek.$gpsday.".sp3.Z";
$localfile = "igs".$gpsweek.$gpsday.".sp3.Z";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

# download rapid orbit
#$remotefile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".SP3";
#$localfile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".PRE";
$remotefile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".sp3.Z";
$localfile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".sp3.Z";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

# download pole
#$remotefile = "IGS".$gpsweek."7.ERP";
#$localfile = "IGS".$gpsweek."7.IEP";
$remotefile = "igs".$gpsweek."7.erp.Z";
$localfile = "igs".$gpsweek."7.erp.Z";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

# download rapid pole
#$remotefile = "IGS".$gpsweek."7.ERP";
#$localfile = "IGS".$gpsweek."7.IEP";
$remotefile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".erp.Z";
$localfile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".erp.Z";
$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
print "rapid pole..... $remotefile";
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

# download clock
#$remotefile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".CLK";
#$localdir = $datadir."/".$campdir."/OUT";

```

```

$remotefile = "igs".$gpsweek.$gpsday.".clk.Z";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/OUT";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);

# download rapid clock
#$remotefile = "IGS".$gpsweek.$gpsday.".CLK";
#$localdir = $datadir."/".$campdir."/OUT";
$remotefile = "igr".$gpsweek.$gpsday.".clk.Z";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/OUT";
#$mode = 'ascii';
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);

# download ionosphere
#$hostname = 'igs2.ifag.de';
#$remotedir = "/IGS/products/orbits/YEAR_20".$year2."/".$gpsweek;
$hostname = 'igs.ifag.de';
$remotedir = "/IGS/products/orbits/".$gpsweek;
print "$remotedir\n";
$remotefile = "cod".$gpsweek.$gpsday.".ion.Z";
print "$remotefile\n";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ATM";
$mode = 'binary';
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
#=====
# copy files from BERNEZ into STA subdirectory
# -----
my $from = "C:/GPSUSER/BERNEZ/STAITA";
my $to = $datadir."/".$campdir."/STA";
&copyfromto($from,$to);

#=====
# download data from Berne
# -----
my $url = 'http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/ORB/P1P2.DCB';
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORB";
$localfile = 'P1P2.DCB';

```

```

&downloadfromberne($url,$localdir,$localfile);

$url = 'http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/ORB/P1C1.DCB';
$localfile = 'P1C1.DCB';
&downloadfromberne($url,$localdir,$localfile);

#=====
# RINEX files download
#-----
my @stations;

## download from ASI
open(ASI, "ASIU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <ASI>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "geodaf.mt.asi.it";
$username = "anonymous";
$password = "wsftp605@";
$remotedir = "/GEOD/GPSD/RAW/" . $year4 . "/" . $doy;
$localdir = $datadir . "/" . $campdir . "/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."d.Z";
    print "\n$remotefile";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
}
close(ASI);

## download from BKG
open(BKG, "ALLBKGU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <BKG>;
chomp(@stations);
print @stations;

#$hostname = "igs2.ifag.de";
$hostname = "igs.ifag.de";
$username = "anonymous";
$password = "wsftp605@";
$localdir = $datadir . "/" . $campdir . "/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {

```

```

#$remotedir = "/gpsdata/"$line;
$remotedir = "/EUREF/obs/"$year4."/"$doy;
$remotefile = $line.$doy."0."$year2."d.Z";
print "\n$remotefile";
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
$remotedir = "/IGS/obs/"$year4."/"$doy;
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
    }
close(BKG);

### download from OLG
open(OLG, "OLGU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <OLG>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "olggps.oeaw.ac.at";
$username = "anonymous";
$password = "wsftp605@";
$localdir = $datadir."/"$campdir."/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
    $remotedir = "/pub/outdata/"$line;
    $remotefile = $line.$doy."0."$year2."d.Z";
    print "\n$remotefile";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
    }
close(OLG);

### download from SOP
open(SOP, "SOPU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <SOP>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "lox.ucsd.edu";
$username = "anonymous";
$password = "wsftp605@";
$localdir = $datadir."/"$campdir."/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
    $remotedir = "/pub/rinex/"$year4."/"$doy;
    $remotefile = $line.$doy."0."$year2."d.Z";

```

```

print "\n$remotefile";
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
    }
close(SOP);
## download from UMBRIA
open(UMB, "UMBU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <UMB>;
chomp(@stations);
print @stations;

#$hostname = "lox.ucsd.edu";
#$username = "anonymous";
#$password = "wsftp605@";
#$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORX";
#$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
    #$remotedir = "/pub/rinex/"$year4."/".$doy;
    #$remotefile = $line.$doy."0."$year2."d.Z";
    print "gpsweek $gpsweek";
    print "doy $doy";
    my $month = &gps_date("-yd $year4 $doy -o %m");
    my $doym = &gps_date("-yd $year4 $doy -o %d");
    $localfile = $line.$doy."0."$year2."d.Z";
    $remotefile = "http://labtopo.ing.unipg.it/labtopo/dati/"$line."/rinex/30sec/$year4/$month/$doym/"$localfile;
    print "\n$remotefile";
    &downloadfromubria($remotefile,$localdir,$localfile);
    }
close(UMB);

## download from UPA
open(UPA, "UPAU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <UPA>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "ux1.unipd.it";
$username = "gps-upad";
$password = "kslhhsng";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORX";
$mode = 'binary';

```

```

## Attenzione alla particolare struttura della
## directory di GPS-UPAD!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
foreach my $line (@stations) {
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/" . $line;
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."d.Z";
    print "\n$remotefile";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."e";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
    # ROVE
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/ROVE/";
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."d.Z";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);

    # FDOS
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/FDOS/";
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."d";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);

    # Trento
    #$remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/trento/";
    #$remotefile = $line.$doy."0.".$year2."e";
    #&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
    #$remotefile = $line.$doy."0.zip";
    #$localfile = $line.$doy."0.".$year2."D.Z";
    #&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$localfile,$mode);

    #VEAR, venezia arsenale
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/VEAR/";
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."D.Z";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode);
}
close(UPA);

# download from UPA (FREDNET)
open(UPA, "UPAUFRED") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <UPA>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "ux1.unipd.it";
$username = "gps-upad";

```

```

$password = "kslhhsng";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/frednet/" . $line;
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."e";
    print "\ndownloading $remotefile";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode) or
    warn "\n$remotefile NOT DOWNLOADED!";
}
close(UPA);
# download from UPA (FVG)
open(UPA, "FVGU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <UPA>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "ux1.unipd.it";
$username = "gps-upad";
$password = "kslhhsng";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/FVG/" . $line;
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."d.Z";
    print "\ndownloading $remotefile";
    &downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode) or
    warn "\n$remotefile NOT DOWNLOADED!";
}
close(UPA);
# download from UPA (ITCG)
open(UPA, "ITCGU") or die "\nERROR! Can't open file: $!";
@stations = <UPA>;
chomp(@stations);
print @stations;

$hostname = "ux1.unipd.it";
$username = "gps-upad";
$password = "kslhhsng";
$localdir = $datadir."/".$campdir."/ORX";
$mode = 'binary';
foreach my $line (@stations) {
    $remotedir = "/utenti/user1/ftp/pub/incoming/GPS-UPAD/ROVE";

```

```

    # $remotefile = $line.$doy.'a.zip';
    $remotefile = $line.$doy."0.".$year2."d.Z";
    $localfile = $line.$doy."0.".$year2."d.Z";
print "\n$remotefile";
&downloadfrom($hostname,$username,$password,$remotedir,$remotefile,$localdir,$remotefile,$mode) or
warn "\n$remotefile NOT DOWNLOADED!";
    }
close(UPA);
}
sub maketree {
    my $campname;
    ($campname) = $_[0];
# Purpose: creating campaign directory and tree structure
# Usage: "maketree [dir]"      where dir is the absolute path
# of the campaign directory to be created
    print "\ncreating... $campname\n";

    mkdir $campname;
    mkdir "$campname/ATM";
    mkdir "$campname/BPE";
    mkdir "$campname/GEN";
    mkdir "$campname/OBS";
    mkdir "$campname/ORB";
    mkdir "$campname/ORX";
    mkdir "$campname/OUT";
    mkdir "$campname/RAW";
    mkdir "$campname/SOL";
    mkdir "$campname/STA";
    mkdir "$campname/TXT";
}
sub downloadfrom {
    use Net::FTP;
# Purpose: downloading data via ftp
# Usage: "downloadfrom [arguments]"
    #my $this = shift;
my $hostname;
    ($hostname) = $_[0];
my $username;
    ($username) = $_[1];
my $password;
    ($password) = $_[2];
my $remotedir;
    ($remotedir) = $_[3];

```

```

my $remotefile;
($remotefile) = $_[4];
my $localdir;
($localdir) = $_[5];
my $localfile;
($localfile) = $_[6];
my $mode;
($mode) = $_[7];

open (LOG, ">>ftplog");
print LOG "\nhostname.... $hostname\n
username.... $username
password.... $password
nremotedir.. $remotedir
remotefile.. $remotefile
localdir.... $localdir\n";

my $index = 0;
my $ftpobj;
while ($index<3) {
last if ($ftpobj = Net::FTP -> new ($hostname,Timeout=>20,Passive=>1))
or warn "\nERROR! Not connected to: $hostname\n";
$index++;
}

$index = 0;
while ($index<3) {
last if ($ftpobj -> login($username,$password)) or
print LOG "Invalid user name or password HOST: $hostname\n ";
$index++;
}

$ftpobj -> cwd (" $remotedir") or
print "\nCannot access this directory: $remotedir HOST: $hostname\n";

if ($mode eq 'ascii') {
$ftpobj -> ascii();
print "\nascii mode\n";
};
if ($mode eq 'binary') {
$ftpobj -> binary();
print "\nbinary mode\n";
}

```

```

};

my @listdir = $ftpobj -> ls();

print "\n\n";
print "Hostname... $hostname. Accessing directory $remotedir\n";
print "-----\n";
#foreach my $file (@listdir) {
# print "$file\n";
# }

$ftpobj -> get($remotedir."/".$remotefile,$localdir."/".$localfile)
or print LOG "Can't find $remotefile on directory $remotedir HOST: $hostname\n";
close (LOG);

# delete empty files
if ( -z $localdir."/".$localfile) {
    warn "$localfile IS EMPTY!!!!\n";
    unlink $localdir."/".$localfile;
}

$ftpobj -> quit();
}
sub downloadfromberne {

    # download data from Berne via HTTP in order
    # to bypass our (silly) firewall
    my $url;
    ($url) = $_[0];
    my $localdir;
    ($localdir) = $_[1];
    my $localfile;
    ($localfile) = $_[2];

    my $file = $localdir."/".$localfile;

    # this is a perl script contained in the activestate perl distribution
    system "lwp-download -a $url $file ";
}

```

```

    }

sub downloadfromubria {

    # download data from Umbria via HTTP because
    # they haven't a FTP server
my $url;
($url) = $_[0];
my $localdir;
($localdir) = $_[1];
my $localfile;
($localfile) = $_[2];

my $file = $localdir."/".$localfile;

# this is a perl script contained in the activestate perl distribution
system "lwp-download $url $file ";

}

sub copyfromto {
    use File::Copy;

    #my $this = shift;
my $from;
($from) = $_[0];
my $to;
($to) = $_[1];

copy($from."/EURF00.ABB",$to."/EURF00.ABB");
copy($from."/EURF00.BLQ",$to."/EURF00.BLQ");
copy($from."/EURF00.CRD",$to."/EURF00.CRD");
copy($from."/EURF00.FIX",$to."/EURF00.FIX");
copy($from."/EURF00.PLD",$to."/EURF00.PLD");
copy($from."/EURF00.STA",$to."/EURF00.STA");
copy($from."/EURF00.VEL",$to."/EURF00.VEL");
copy($from."/EURF00.FIX",$to."/EURF00.FIX");
copy($from."/SESSIONS.SES",$to."/SESSIONS.SES");

```

```

    }

sub decomp {

    # decompress compressed data (raw rinex data and ionosphere)
    # don't forget to set path to gzip in the environment variables
    # (gzip 1.3.5 is needed).
    my $datadir = $_[0];
    my $scampdir = $_[1];

    # decompress .ion files
    chdir $datadir.'/'.$scampdir.'/ATM';
    system "gunzip -f *.ion.Z";

    # decompress .Z files
    chdir $datadir.'/'.$scampdir.'/ORX';
    system "gunzip -f *.Z";

    # decompress orbit and pole files
    chdir $datadir.'/'.$scampdir.'/ORB';
    system "gunzip -f *.sp3.Z";
    system "gunzip -f *.erp.Z";

    # change extension of .SP3 and .ERP files
    system "copy *.SP3 *.PRE";
    system "copy *.ERP *.IEP";
    # decompress satellite clock files
    chdir $datadir.'/'.$scampdir.'/OUT';
    system "gunzip -f *.clk.Z";
}

sub crztorrx {

    use Cwd;
    # Purpose: decompress compressed RINEX files using crz2rxn
    # Remember to set path to bernez directory!!!!
    # teqc and crz2rxn must be contained in bernez directory.
    my $datadir = $_[0];
    my $scampdir = $_[1];
    my $year2 = $_[2];
    my $orx = $datadir.'/'.$scampdir.'/ORX';
    my $oldpat = $year2.'d';
    my $newpat = $year2.'e';

```

```

opendir (ORX,$orx) or die "Cannot open $orx";
my @oldraw = readdir ORX;
close (ORX);
chomp (@oldraw);
print @oldraw;

#rename extension .??d -> .??e
#my $oldname;
#foreach (@oldraw) {
    # $oldname = $_;
    # s/$oldpat/$newpat/i;
    # rename ($datadir.'/'.$scampdir.'/ORX/'.$oldname,$datadir.'/'.$scampdir.'/ORX/'.$_)
    # or warn "cannot rename";
# print "\n$_";
# }

print "\n" ;
chdir "$orx";
print cwd;
system 'call crz2rxn ????????.??d';
system 'call crz2rxn ????????.??e';
print "\nRINEX decompressed";

}
sub qualitycheck {

    # Purpose: trim a RINEX file and redefine its header using teqc.
    # This sub calls a batch file (qc.bat, in bernez)
    my $doy = $_[0];
    my $month = $_[1];
    my $day = $_[2];
    my $year2 = $_[3];
    my $server = $_[4];
    my $gpsdata = $_[5];

    print "\nGPSDATA:::$gpsdata\n";
    open(SERVER, $server) or die "\nERROR! Can't open file: $!";
    my @stations = <SERVER>;
    close (SERVER);
    chomp(@stations);

    foreach my $line (@stations) {
system ("call qc $doy $month $day $year2 $line $gpsdata");

```

```
}
}
sub sendto {

    # Purpose: send an e-mail
    my ($to,$from,$subject,@body) = @_ ;
    use Net::SMTP;

    my $relay = "mail.unipd.it";
    my $smtp = Net::SMTP->new($relay) or die "Can't open connection: $!";

    $smtp->mail($from);
    $smtp->to($to);

    $smtp->data();
    $smtp->datasend("To: $to\n");
    $smtp->datasend("From: $from\n");
    $smtp->datasend("Subject: $subject\n");
    $smtp->datasend("\n");

    foreach (@body) {
        $smtp->datasend("$_\n");
    }
    $smtp->dataend();
    $smtp->quit();
}
sub uploadtoigs {

    use Net::FTP;

    #Purpose: upload a file
    my $hostname;
    ($hostname) = $_[0];
    my $username;
    ($username) = $_[1];
    my $password;
    ($password) = $_[2];
    my $localdir;
    ($localdir) = $_[3];
    my $localfile;
    ($localfile) = $_[4];
    my $mode;
    ($mode) = $_[5];
```

```

my $ftpobj = Net::FTP -> new ($hostname,Timeout=>60,Passive=>1)
or warn "\nERROR! Not connected to: $hostname\n";

$ftpobj -> login($username,$password) or
print LOG "Invalid user name or password HOST: $hostname\n ";

if ($mode eq 'ascii') {
$ftpobj -> ascii();
print "\nascii mode\n";
};
if ($mode eq 'binary') {
$ftpobj -> binary();
print "\nbinary mode\n";
};

$ftpobj -> put($localdir."/".$localfile)
or print LOG "can't put $localfile on remote server, HOST: $hostname\n";
}
1;

```

A.3 Script di comando per il quality checking dei files RINEX

```

set doy=%1
set mm=%2
set dd=%3
set yy=%4
set stat=%5
set GPSDATA=%6
REM if EXIST c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat%%doy%0.%yy%e call c:\GPSUSER\bernez\crz2rnx
c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat%%doy%0.%yy%e
REM if EXIST c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat%%doy%0.%yy%d call c:\GPSUSER\bernez\crz2rnx
c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat%%doy%0.%yy%d
REM check that observation rinex file exists; if not, exit from batch
if NOT EXIST c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat%%doy%0.%yy%o GOTO END
REM trim rinex files from 00h 00m 30s to 23h 59m 30s
echo Trimming..... %stat%

```

```

cd c:\gpsuser\bernez
c:\GPSUSER\bernez\teqc -st %yy%%mm%%dd%000030 -e %yy%%mm%%dd%235930 c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat
> c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\temp.tmp
echo %stat%-----TRIMMED!
echo
copy c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\temp.tmp c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat%%doy%0.%yy%o
>nul
del c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\temp.tmp>nul
REM edit rinex files according to .cfg files
cd c:\gpsuser\bernez
if NOT EXIST %stat%.cfg GOTO END
echo Editing..... %stat% according to %stat%.cfg
c:\GPSUSER\bernez\teqc -config %stat%.cfg c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat%%doy%0.%yy%o>c:\%GPSDATA%\%y
copy c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\temp.tmp c:\%GPSDATA%\%yy%_%doy%\orx\%stat%%doy%0.%yy%o
echo %stat%-----EDITED!
:END

```

A.4 Script perl l'interrogazione del server ftp igscb

```

#!/usr/bin/perl
# Purpose: check orbits on igs.ifag.de
# Usage: perl chkrb.pl [gpsweek]
use diagnostics;
use strict;
use lib $ENV{BPE};
use startBPE;
use bpe_util;
use Gps_Date;
use Bernutil;
use Net::FTP;
# gpsweek
my $gpsweek = $ARGV[0];
my $seconds = $ARGV[1];
my $flag = 'notok';
while ($flag eq 'notok') {
    $flag = &pool($gpsweek);
    if ($flag eq 'notok') {
        print "I'm going to sleep for $seconds seconds\n";
        sleep ($seconds);
        print "...Yawnn! Retrying.....\n";
    }
}
}

```

```

sub pool {
  my $gpsweek = $_[0];
  my $hostname = "igsch.jpl.nasa.gov";
  my $username = "anonymous";
  my $password = "none";
  my $remotedir = "/pub/product/$gpsweek";
  # Create ftp object
  my $ftpobj = Net::FTP -> new ($hostname,Timeout=>60,Passive=>1) or
  warn "\nERROR! Not connected to: $hostname\n";
  $ftpobj -> login($username,$password) or
  warn "Invalid user name or password HOST: $hostname\n ";
  $ftpobj -> cwd ("$remotedir") or
  warn "Cannot access this directory: $remotedir\n";
  my @flag = (0,0,0,0,0,0);
  my @curdir = $ftpobj -> ls();
  chomp (@curdir);
  foreach (@curdir) {
    #print "$_\n";
    if ($_ eq 'igs'. $gpsweek. '0.sp3.Z') {$flag[0] = 1}
    if ($_ eq 'igs'. $gpsweek. '1.sp3.Z') {$flag[1] = 1}
    if ($_ eq 'igs'. $gpsweek. '2.sp3.Z') {$flag[2] = 1}
    if ($_ eq 'igs'. $gpsweek. '3.sp3.Z') {$flag[3] = 1}
    if ($_ eq 'igs'. $gpsweek. '4.sp3.Z') {$flag[4] = 1}
    if ($_ eq 'igs'. $gpsweek. '5.sp3.Z') {$flag[5] = 1}
    if ($_ eq 'igs'. $gpsweek. '6.sp3.Z') {$flag[6] = 1}
  }
  if ( $flag[0] == '1' &&
  $flag[1] == '1' &&
  $flag[2] == '1' &&
  $flag[3] == '1' &&
  $flag[4] == '1' &&
  $flag[5] == '1' &&
  $flag[6] == '1' ) {
    print "Orbits found for gpsweek $gpsweek on $hostname\n";
    return ('ok');
  } else {
    print "Orbits NOT found for gpsweek $gpsweek on $hostname\n";
    return ('notok');
  }
  $ftpobj->quit();
}

```

A.5 Script per l'elaborazione automatica settimanale

```
#!/usr/bin/perl
# prcd.pl
# Perl script to process weekly GPS data
# Author: Andrea Nardo 12/05/2005 17:55
# usage: perl prcd.pl [GPSweek] [Option]
# [GPSweek]..... : gps week to be processed.
# [option].... ppp: run ppp only.
# [option].... rx2snx: run rx2snx only.
# [option].... comb: run combine only.
# [option].... tropo: run tropo_p only
# [option].... all: run all the PCF.
use diagnostics;
use strict;
use lib $ENV{BPE};
use startBPE;
use bpe_util;
use Gps_Date;
use File::Copy;
# GPS week
my $gpsweek = $ARGV[0];
my $flag = $ARGV[1];
# days of the week
my @dow = ("0","1","2","3","4","5","6");
# call gps_date
my $year2 = &gps_date("-wd $gpsweek 0 -o %y");
# days of the year contained in current GPS week
my @doy = ();
$doy[0] = &gps_date("-wd $gpsweek 0 -o %j");
$doy[1] = &gps_date("-wd $gpsweek 1 -o %j");
$doy[2] = &gps_date("-wd $gpsweek 2 -o %j");
$doy[3] = &gps_date("-wd $gpsweek 3 -o %j");
$doy[4] = &gps_date("-wd $gpsweek 4 -o %j");
$doy[5] = &gps_date("-wd $gpsweek 5 -o %j");
$doy[6] = &gps_date("-wd $gpsweek 6 -o %j");
# set campaign names
my @campnam = ();
$campnam[0] = $year2."_".$doy[0];
$campnam[1] = $year2."_".$doy[1];
$campnam[2] = $year2."_".$doy[2];
$campnam[3] = $year2."_".$doy[3];
$campnam[4] = $year2."_".$doy[4];
```

```

$campnam[5] = $year2." _".$doy[5];
$campnam[6] = $year2." _".$doy[6];
printf "\noption..... $flag\n";
printf "year..... $year2\n";
printf "days of the year.... @doy\n";
printf "campaign names..... @campnam\n";
# set days of the week to be processed (from $first to $last)
my $first = 0;
my $last = 6;
#STEP 1: running PPP on each day of current gps week
#=====
# hash table
my %newVar = ("V_MIX" => "YES", "V_MAXLEN" => 2500,);
# create a new adapted BPE server object:
my $BPE1 = new startBPE(%newVar);
if ($flag eq "ppp" || $flag eq "all") {
    my $indice = "0";
    for ($indice=$first; $indice<=$last; ) {
# set mandatory variables
# -----
$$BPE1{BPE_CAMPAIGN} = '${P}.'/$campnam[$indice]";
$$BPE1{PCF_FILE} = "PPPM";
$$BPE1{SESSION} = $doy[$indice]."0";
$$BPE1{YEAR} = "20".$year2;
# Also the values for the other keywords may be changed:
# -----
$$BPE1{TASKID} = "P1";
$$BPE1{SYSOUT} = "P1_BPE";
$$BPE1{STATUS} = "PPP_BPE.SUM";
$$BPE1{CPU_FILE} = "USER";
$BPE1->resetCPU();
$BPE1->cleanTemp();
# finally start the processing
$BPE1->run();
if ($$BPE1{ERROR_STATUS} == 1) {
    die"ERROR: PPP, session $doy[$indice]"
}

$indice++;
}
}
#STEP 2: running RNX2SNX on each day of current gps week
#=====

```

```

if ($flag eq "rx2sx" || $flag eq "all") {

    my $indice = "0";
    for ($indice=$first; $indice<=$last; ) {

        $$BPE1{BPE_CAMPAIGN} = "${P}'./$campnam[$indice]";
        $$BPE1{PCF_FILE} = 'RNX2SNX';
        $$BPE1{SESSION} = $doy[$indice]."0";
        $$BPE1{YEAR} = "20".$year2;

        $$BPE1{TASKID} = "R2";
        $$BPE1{SYSOUT} = "R2S_BPE";
        $$BPE1{STATUS} = "R2S_BPE.SUM";
        $$BPE1{CPU_FILE} = "USER";
        $BPE1->resetCPU();
        $BPE1->cleanTemp();
        $BPE1->run();
        if ($$BPE1{ERROR_STATUS} == 1) {
            die"ERROR: RNX2SNX, session $doy[$indice]"
        }
    }

    $indice++;
}
}

#STEP 3: combining daily solutions through COMBINE
#=====
if ($flag eq "comb" || $flag eq "all") {
    printf "\nCombining daily solutions through COMBINE\n\n";

    my $indice = "0";
    for ($indice=$first; $indice<=$last; ) {
        my $filetobecopied = "C:\\GPSDATA"./$campnam[$indice]".\\SOL\\R1_".$year2.$doy[$indice]."0.NQ0";
        my $newfile = "C:\\GPSDATA"./wk".$gpsweek."\\SOL\\R1_".$year2.$doy[$indice]."0.NQ0";

        (-e $filetobecopied) or die"\nERROR: file $filetobecopied does not exist";

        printf "copying $filetobecopied into\n";
        printf " $newfile\n";
        copy($filetobecopied, $newfile) or die "File cannot be copied.";
        printf " copied!\n\n";

        $indice++;
    }
}

```

```

$$BPE1{BPE_CAMPAIGN} = '${P}'."/wk".$gpsweek;
$$BPE1{PCF_FILE} = 'combine';
$$BPE1{SESSION} = $doy[0]."0";
$$BPE1{YEAR} = "20".$year2;

$$BPE1{TASKID} = "aw";
$$BPE1{SYSOUT} = "AWK_BPE";
$$BPE1{STATUS} = "AWK_BPE.SUM";
$$BPE1{CPU_FILE} = "USER";
$BPE1->resetCPU();
$BPE1->cleanTemp();
$BPE1->run();
if ($$BPE1{ERROR_STATUS} == 1) {
    die"ERROR: COMBINE"
}
}
#STEP 4: estimating tropospheric parameters (fixed mean coordinates)
#=====
if ($flag eq "tropo" || $flag eq "all") {
    printf "\nestimating tropospheric parameters (fixed mean coordinates)\n\n";

    my $indice = "0";
    for ($indice=$first; $indice<=$last; ) {
        my $newfile = "C:\\GPSDATA"."/".$campnam[$indice]".\\"\\STA\\UPA".$gpsweek."7.CRD";
        my $filetobecopied = "C:\\GPSDATA"."/wk".$gpsweek."\\STA\\UPA".$gpsweek."7.CRD";
        (-e $filetobecopied) or die"\nERROR: file $filetobecopied does not exist";

        printf "copying $filetobecopied into\n";
        printf " $newfile\n";
        copy($filetobecopied, $newfile) or die "File cannot be copied.";
        printf " copied!\n\n";

        $$BPE1{BPE_CAMPAIGN} = '${P}'."/".$campnam[$indice];
        $$BPE1{PCF_FILE} = 'TROPO_P';
        $$BPE1{SESSION} = $doy[$indice]."0";
        $$BPE1{YEAR} = "20".$year2;

        $$BPE1{TASKID} = "TR";
        $$BPE1{SYSOUT} = "TRO_BPE";
        $$BPE1{STATUS} = "TRO_BPE.SUM";
        $$BPE1{CPU_FILE} = "USER";
        $BPE1->resetCPU();
    }
}

```

A.6. SCRIPT PER IL TRASFERIMENTO DEI FILES SINEX AL SERVER FTP DEL BKG311

```
$BPE1->cleanTemp();
$BPE1->run();

if ($$BPE1{ERROR_STATUS} == 1) {
    die"ERROR: TROPO_P, session $doy[$sindice]"
}
$sindice++;
}
}
```

A.6 Script per il trasferimento dei files SINEX al server FTP del BKG

```
#!/usr/bin/perl
use diagnostics;
use strict;
use lib $ENV{BPE};
use startBPE;
use bpe_util;
use Gps_Date;
use Bernutil;
# Purpose: upload data to IGS
# Usage: perl upld2igs [gpsweek];
my $gpsweek = $ARGV[0];
# call gps_date
my $year2 = &gps_date("-wd $gpsweek 0 -o %y");
# days of the year contained in current GPS week
my @doy = ();
$doy[0] = &gps_date("-wd $gpsweek 0 -o %j");
$doy[1] = &gps_date("-wd $gpsweek 1 -o %j");
$doy[2] = &gps_date("-wd $gpsweek 2 -o %j");
$doy[3] = &gps_date("-wd $gpsweek 3 -o %j");
$doy[4] = &gps_date("-wd $gpsweek 4 -o %j");
$doy[5] = &gps_date("-wd $gpsweek 5 -o %j");
$doy[6] = &gps_date("-wd $gpsweek 6 -o %j");
my @dow;
@dow = (0..6);
my $hostname = 'igs.ifag.de';
my $username = 'eurefput';
my $password = 'euref-bkg';
my $mode = 'ascii';
```

```

my $localdir;
my $localfile;
my $i;
for ($i=0;$i<=6; ) {
    my $campdir = $year2.'_'.$doy[$i];
    my $localdir = "C:/GPSDATA/$campdir/ATM";
    my $localfile = 'UPA'.$gpsweek.$dow[$i].'.TRO';
    &uploadtoigs($hostname,$username,$password,$localdir,$localfile,$mode);
    $i++;
}
$localdir = 'C:/GPSDATA/wk'.$gpsweek.'/SOL';
$localfile = 'UPA'.$gpsweek.'.7.SNX';
&uploadtoigs($hostname,$username,$password,$localdir,$localfile,$mode);
$localdir = 'C:/GPSDATA/wk'.$gpsweek.'/OUT';
$localfile = 'UPA'.$gpsweek.'.7.SUM';
&uploadtoigs($hostname,$username,$password,$localdir,$localfile,$mode);

```

A.7 Script per l'estrazione del bollettino settimanale

```

#!/usr/bin/perl
use strict;
use warnings;
# usage: perl xtract.pl [gpsweek]
my $gpsweek = $ARGV[0];
my $campdir = 'wk'.$gpsweek;
my $datadir = 'C:/GPSDATA/U';
my $addout = 'ADDNEQ2.OUT';
my $fixedfile = 'EURF00.FIX';
my $out = $datadir.'/'.$campdir.'/OUT/'.$addout;
my $fix = $datadir.'/'.$campdir.'/STA/'.$fixedfile;
print "\n$out";
open (BOL,">bol$campdir");
print BOL ' Università degli Studi di Padova
Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica
*****
Sommaro della analisi settimanale dati GPS
*****
Serie storiche, coordinate e statistiche sono alla pagina http://cisas.unipd.it/gps/project.html
*****;
my $line = "===== ";
my $line2 = "----- ";

```

```

open (ADD2,$out) or die "Cannot find $out";
my @file = <ADD2>;
print BOL "\n$line\n";
print BOL "ORBIT FILES:\n";
print BOL 'IGS'. $gpsweek."0.SP3\n";
print BOL 'IGS'. $gpsweek."1.SP3\n";
print BOL 'IGS'. $gpsweek."2.SP3\n";
print BOL 'IGS'. $gpsweek."3.SP3\n";
print BOL 'IGS'. $gpsweek."4.SP3\n";
print BOL 'IGS'. $gpsweek."5.SP3\n";
print BOL 'IGS'. $gpsweek."6.SP3\n";
print BOL "\n$line2\n";
foreach my $r (@file) {

    my $stringa = 'Program :';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;

    $stringa = 'Purpose :';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;

    $stringa = 'Campaign:.';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;

    $stringa = 'Earth rotation parameters :';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;
    $stringa = 'Phase center variations :';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;
    $stringa = 'Resulting normal equations :';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;

}
print BOL "$line\n";
foreach my $r (@file) {
    my $stringa = 'INPUT NORMAL EQUATION FILES';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;

    $stringa = 'R1_[0123456789]+.NQ0';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;

    $stringa = 'Main characteristics of normal equation files:.';
    $r =~/$stringa/ && print BOL "\n$r$line2\n";

    $stringa = 'File From';

```

```

$r =~/$stringa/ && print BOL $r;

$stringa = '\s{4}[1-7]\s{2}200';
$r =~/$stringa/ && print BOL $r;

$stringa = ' Total 20';
$r =~/$stringa/ && print BOL "$line2\n$r";

}
print BOL "\n$line2";
print BOL "\n$line";
print BOL "\n COMPARISON OF STATION COORDINATES WITH RESPECT TO THE COMBINED
SOLUTION IN MM

- UNWEIGHTED RMS OF INDIVIDUAL COORDINATE RESIDUALS\n";
print BOL "\n$line2";
print BOL "\n RMS 1 2 3 4 5 6 7 ";
print BOL "\n$line2\n";
foreach my $r (@file) {
    my $stringa = '\s{4}\s[NEU]\s{2}';
    $r =~/$stringa/ && print BOL $r;
}
print BOL $line;
print BOL "\nFixed stations (minimum constraints): $fix\n";
open (FIX,$fix) or die "Cannot find $fix";
my @station = <FIX>;
print BOL "@station";
close (FIX);
print BOL "\n$line\n\n";

print BOL 'Prof. Alessandro Caporali
Università di Padova
Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica
Via Matteotti 32
I-35137 Padova Italy
tel. +39 049 827 2052
fax +39 049 827 2070
cell.0039 328 8180575
';
close (ADD2);
close (BOL);

```

A.8 Modulo per l'int. del campo e il calcolo del t. di def.

```

# Field_analysis
#
# 1) Read gmt file.
# 2) Compute empirical covariance.
# 3) Fit covariance function
# 4) Interpolate 2d velocity
# field trough least square
# collocation.
# 5) Compute strain rate.
# 6) Create map
# Import modules:
from plotmatrix import *
from math import *
from scipy import *
from numpy import *
# import fortran format
#from Scientific.IO.FortranFormat import *
# import linear algebra module
from numpy.linalg import inv, pinv, lstsq
# import mapping module
from matplotlib.toolkits.basemap import Basemap, shiftgrid
# import string functions:
from string import split, join
# import numerical functions:
from matplotlib.mlab import movavg
from scipy.optimize import leastsq
#from LinearAlgebra import linear_least_squares
# import graphical functions:
from pylab import hist, plot, subplot, grid, title, xlabel, ylabel, show, close, clf, \
    arange, meshgrid, cm, figure, axes, gca, reshape, quiver, quiverkey, \
    load, scatter, axis, text, errorbar
# import GUI module:
# from Tkinter import *
def string2float(stringlist):
    "Convert strings into floats"
    # define float list
    floatlist = []
    for element in stringlist:
        floatlist.append(float(element))
    return floatlist

```

```

def rad2deg(rad):
    "Convert radians to degrees.
    Return float radians."
    #from math import pi
    return rad * 180.0 / pi
def deg2rad(deg):
    "Convert degrees to radians.
    Return float degrees"
    #from math import pi
    return deg * pi / 180.0
def distance(lat1, lon1, lat2, lon2):
    "Calculate spherical distance between two lat/lon pairs.
    Return float distance in Km."
    #from math import sin, cos, acos
    lat1 = deg2rad(lat1)
    lon1 = deg2rad(lon1)
    lat2 = deg2rad(lat2)
    lon2 = deg2rad(lon2)
    theta = lon1 - lon2
    dist = sin(lat1) * sin(lat2) \
    + cos(lat1) * cos(lat2) * cos(theta)
    if dist > 1.0:
        print Numerical error... cos(dist) > 1.0
        dist = 1.0
    elif dist < -1.0:
        print Numerical error... cos(dist) < -1.0
        dist = -1.0

    dist = acos(dist)
    dist = rad2deg(dist)
    meters = dist * 60.0 * 1852.0
    # output in km
    return meters/1000.0
def readField(path):
    "Read field from a file"
    # open file
    f = open(path,r)
    # read file
    data = f.readlines()
    # close file
    f.close()
    return data

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 317

```

def writeField(field,path):
    "Write field into a file"
    # open file
    f = open(path,w)
    # write file
    for key in field:
        # build formatted line
        formline = ' %7.3f %7.3f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %s\n' % (field[key][0], field[key][1], field[key][2], \
        field[key][3], field[key][4], field[key][5], \
        field[key][6], key)
        f.write(formline)
    # close file
    f.close()
def showField(field):
    "Print field on the screen"
    for key in field.keys():
        formline = '%7.3f %7.3f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %s' % (field[key][0], field[key][1], field[key][2], \
        field[key][3], field[key][4], field[key][5], \
        field[key][6], key)
        print formline
def writeStrain(strain_rate,path,path_ext,path_com):
    "Write field into a file"
    # open file
    f = open(path,w)
    f_ext = open(path_ext,w)
    f_com = open(path_com,w)
    # write file
    for key in strain_rate.keys():
        # build formatted line
        formline = '%7.3f %7.3f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %s\n' % (strain_rate[key][0], strain_rate[key][1],
strain_rate[key][2], \
        strain_rate[key][3], strain_rate[key][4], \
        strain_rate[key][5], strain_rate[key][6], \
        strain_rate[key][7], key)
        formline_ext = '%7.3f %7.3f %7.2f %7.2f %7.2f %s\n' % (strain_rate[key][0], strain_rate[key][1], strain_rate[key][2],
\
        0.0, strain_rate[key][6], key)
        formline_com = '%7.3f %7.3f %7.2f %7.2f %7.2f %s\n' % (strain_rate[key][0], strain_rate[key][1], 0.0, \
        strain_rate[key][4], strain_rate[key][6], key)
        f.write(formline)
        f_ext.write(formline_ext)
        f_com.write(formline_com)
    # close file

```

```

f.close()
f_ext.close()
f_com.close()
def showStrain(strain_rate):
    "Print field on the screen"
    for key in strain_rate.keys():
        formline = '%7.3f %7.3f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %7.2f %s' % (strain_rate[key][0], strain_rate[key][1],
strain_rate[key][2], \
    strain_rate[key][3], strain_rate[key][4], strain_rate[key][5], \
    strain_rate[key][6], strain_rate[key][7], key)
        print formline
def buildData_horiz(data):
    "Build data structure (horizontal components)"
    # from string import split, join
    # define field data structure
    field = {}
    # convert data list into field data structure
    for line in data:
        splittedline = split(line)
        site = join(splittedline[7:10])
        field[site] = string2float(splittedline[0:7])
    return field
def buildData_vert(data):
    "Build data structure (vertical components)"
    # from string import split, join
    # define field data structure
    field = {}
    # convert data list into field data structure
    for line in data:
        splittedline = split(line)
        site = join(splittedline[5:8])
        val = string2float(splittedline[0:5])
        field[site] = [val[0], \
val[1], \
val[2], \
val[3], \
0.0, \
val[4], \
0.0]
    return field
def diffFields(field1,field2):
    "Compute difference between two fields"
    difference = {}

```

```

for key in field1.keys():
if field2.has_key(key):
difference[key] = [field1[key][0], field1[key][1], \
field1[key][2] - field2[key][2], \
field1[key][3] - field2[key][3], \
field1[key][4], field1[key][5], \
field1[key][6]]
return difference
def addFields(field1,field2):
“add two fields“
added = {}
for key in field1.keys():
if field2.has_key(key):
added[key] = [field1[key][0], field1[key][1], \
field1[key][2] + field2[key][2], \
field1[key][3] + field2[key][3], \
field1[key][4], field1[key][5], \
field1[key][6]]
return added
def uniqField(field):
“Remove duplicated data“
key = field.keys()
for site1 in key:
for site2 in key:
# check that the keys exist
if field.has_key(site1) and field.has_key(site2):
# check that the sites are different
if site1 != site2:
# check that the coordinates of different
# sites are the same, if true, remove
# the related entry
if field[site1][0:1] == field[site2][0:1]:
del field[site2]
return field
def uniqFieldTol(field, tol):
“Remove duplicated data, using“
key = field.keys()
for site1 in key:
for site2 in key:
# check that the keys exist
if field.has_key(site1) and field.has_key(site2):
# check that the sites are different
if site1 != site2:

```

```

# check that the coordinates of different
# sites are the same (within a tolerance), if true, remove
# the related entry
if (fabs(field[site1][0] - field[site2][0]) <= tol and fabs(field[site1][1] - field[site2][1]) <= tol):
del field[site2]
return field
def geod2cart(lon, lat, h):
    "Convert from geodetic to cartesian coordinates (lon, lat, height -> x, y, z)
    (translated from matlab G2C function, by Kay Borre)"

    # semi-major axis (WGS-84)
    a = 6378137.000
    # flattening (WGS-84)
    f = 1.0/298.2572236
    ex2 = (2.0-f)*f/((1.0-f)**2)
    c = a*sqrt(1.0+ex2)
    N = c/sqrt(1.0+ex2*cos(lat)**2)
    x = (N+h)*cos(lat)*cos(lon)
    y = (N+h)*cos(lat)*sin(lon)
    z = ((1.0-f)**2*N+h)*sin(lat)
    return x, y, z
def cart2geod(x, y, z):
    "Convert from cartesian to geodetic coordinates (x,y,z -> lon, lat, height), using iterative method
    (translated from matlab togeod function, by Kay Borre)"
    # semi-major axis (WGS-84)
    a = 6378137.000
    # inverse of flattening (WGS-84)
    finv = 298.2572236
    # counter
    i = 0

    h = 0.0
    tolsq = 1.0e-10
    maxit = 10
    # square of the eccentricity
    if finv < 1.0e-20:
        esq = 0.0
    else:
        esq = (2.0-1.0/finv)/finv
    onesq = 1.0-esq
    #print ok1\n

    # first guess

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 321

```

# p is distance from spin axis
p = sqrt(x**2+y**2)
# direct calculation of longitude
if p > 1.0e-20:
    dlambd = atan2(y,x)
    dlambd = rad2deg(dlambd)
else:
    dlambd = 0.0

if (dlambd < 0.0):
    dlambd = dlambd + 360.0
#print OK2\n

# r is distance from origin (0,0,0)
r = sqrt(p**2+z**2)
if r > 1.0e-20:
    sinphi = z/r
else:
    sinphi = 0.0

dphi = asin(sinphi)
# initial value of height = distance from origin minus
# approximate distance from origin to surface of ellipsoid
if r < 1.0e-20:
    h = 0.0
print Doh!

h = r-a*(1-sinphi*sinphi/finv)
#print OK3\n

# iterate
for i in range(1,maxit+1):
    sinphi = sin(dphi)
    cosphi = cos(dphi)
    # compute radius of curvature in prime vertical direction
    N_phi = a/sqrt(1-esq*sinphi*sinphi)
    # compute residuals in p and z
    dP = p - (N_phi + h) * cosphi
    dZ = z - (N_phi*onesq + h) * sinphi
    # update height and latitude
    h = h + (sinphi*dZ+cosphi*dP)
    dphi = dphi+(cosphi*dZ-sinphi*dP)/(N_phi + h)
    # test for convergence

```

```

if (dP*dP + dZ*dZ < tolsq):
    break
# Not Converged-Warn user
if i == maxit:
    print Not converged

dphi = float(rad2deg(dphi))

return dlambd, dphi, h

def spherDistance(field):
    "Compute spherical distance
    between sites"
    spherdist = {}
    sites = field.keys()
    for site1 in sites:
        for site2 in sites:
            lon1 = field[site1][0]
            lat1 = field[site1][1]
            lon2 = field[site2][0]
            lat2 = field[site2][1]
            # check that the distance between
            # site1 and site2 has not been already computed
            if spherdist.has_key((site2,site1)):
                continue
            # compute spherical distance
            # print site1, site2
            elif site1 != site2:
                spherdist[site1,site2] = distance(lat1, lon1, lat2, lon2)
            if spherdist[site1,site2] == 0.0:
                print Warning, check, site1, site2
            elif site1 == site2:
                spherdist[site1,site2] = 0.0

    return spherdist

def averageDistance(spherdist):
    "Compute average distance between sites"
    n = len(spherdist)
    averagedist = 0.0
    for key in spherdist.keys():
        averagedist = averagedist + spherdist[key]
    return averagedist/float(n)

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 323

```
def writeSpherDistance(spherdist,path):
    "Write spherical distance
    into a file"
    f = open(path,w)
    for site in spherdist.keys():
        formline = %.4f %s %s\n % (spherdist[site],site[0],site[1])
    f.write(formline)
    f.close()
def binSites(spherdist,lower,upper):
    "Classify sites using spherical distance"
    binnedsites = []
    for couple in spherdist.keys():
        if lower < spherdist[couple] <= upper:
            binnedsites.append(couple)
    return binnedsites
def meanField(field):
    "Given a field, compute the average field"
    mfield = {}
    mean1 = 0.0
    mean2 = 0.0
    for key in field.keys():
        mean1 = mean1 + field[key][2]
        mean2 = mean2 + field[key][3]
    n = float(len(field))
    mean1 = mean1 / n
    mean2 = mean2 / n

    for key in field.keys():
        mfield[key] = [field[key][0], field[key][1], mean1, mean2, 0.0, 0.0, 0.0]
    return mfield
def averageField(field):
    "Given a field, compute the average"
    n = len(field)

    v1 = zeros( n )
    v2 = zeros( n )
    i = 0
    for key in field.keys():
        v1[i] = field[key][2]
        v2[i] = field[key][3]
        i = i + 1

    mean1 = mean(v1)
```

```

mean2 = mean(v2)

return mean1, mean2
def wAverageField(field):
    "Given a field, compute the weighted average"
    n = len(field)

    v1 = zeros( n )
    v2 = zeros( n )
    w1 = zeros( n )
    w2 = zeros( n )

    i = 0
    for key in field.keys():
        v1[i] = field[key][2]
        v2[i] = field[key][3]
        w1[i] = 1.0/(field[key][4]**2)
        w2[i] = 1.0/(field[key][5]**2)

    i = i + 1
    # normalize weights
    w1 = w1/sum(w1)
    w2 = w2/sum(w2)

    mean1 = sum(w1*v1)/sum(w1)
    mean2 = sum(w2*v2)/sum(w2)

    return mean1, mean2
def addConstantField(field,c1,c2):
    "Add a 2D constant field"
    addfield = {}
    for key in field.keys():
        addfield[key] = [field[key][0], field[key][1], field[key][2]+c1, field[key][3]+c2, field[key][4], field[key][5], field[key][6]
]

    return addfield
def selectArea(field,lon_centre,lat_centre,radius):
    "Select field values contained in the circle
    centered in lat_centre,lon_centre"
    selected = {}
    for key in field.keys():
        lat = field[key][1]

```

```

lon = field[key][0]
d = distance(lat, lon, lat_centre, lon_centre)
if d <= radius:
selected[key] = field[key]
n = float(len(selected))
area = pi * (radius**2)
mdist = sqrt(area/n)

return selected, mdist
def rSelectArea(field,lon1,lat1,lon2,lat2):
    "Select field values contained in the circle
    centered in lat_centre,lon_centre"
    selected = {}
    for key in field.keys():
        lat = field[key][1]
        lon = field[key][0]
        if lon1 <= lon <= lon2 and lat1 <= lat <= lat2:
            selected[key] = field[key]
    n = float(len(selected))
    area = fabs(lon1-lon2)*fabs(lat1-lat2)*(111.0**2)
    mdist = sqrt(area/n)

    return selected, mdist
def findOutliers(field, tresh1, tresh2):
    "Find outliers"
    # from math import fabs
    outliers = []
    for key in field.keys():
        if fabs(field[key][2]) > tresh1 or fabs(field[key][3]) > tresh2:
            outliers.append(key)

    return outliers
def findOutliersSep(field, tresh1, tresh2):
    "Find outliers"
    # from math import fabs
    outliers = []
    outliers1 = []
    outliers2 = []
    for key in field.keys():
        if fabs(field[key][2]) > tresh1 or fabs(field[key][3]) > tresh2:
            outliers.append(key)
        if fabs(field[key][2]) > tresh1:
            outliers1.append(key)

```

```

if fabs(field[key][3]) > tresh2:
    outliers2.append(key)

return outliers, outliers1, outliers2
def sFindOutliers(field, sigma_tresh1, sigma_tresh2):
    "Find outliers screening the sigma values"
    # from math import fabs
    outliers = []
    for key in field.keys():
        if fabs(field[key][4]) > sigma_tresh1 or fabs(field[key][5]) > sigma_tresh2:
            outliers.append(key)
    return outliers
def rejectOutliers(field, outliers):
    "Remove outliers from the field"
    cleaned = {}
    sites = field.keys()
    for key in outliers:
        sites.remove(key)

    for key in sites:
        cleaned[key] = field[key]

    return cleaned

def expWeight(a, b):
    "Compute exponential weight"
    if a != 0.0:
        ratio = fabs(a-b)/fabs(a)
    elif b != 0.0:
        ratio = fabs(a-b)/fabs(b)
    w = exp(-ratio)
    print w
    return w
def covaField(field, pairs1, pairs2):
    "Compute empirical covariance"
    cov = [0.0, 0.0]
    # compute the means of the head and the tail
    mh1 = 0.0
    mt1 = 0.0
    mh2 = 0.0
    mt2 = 0.0
    i = 0
    for key in pairs1:

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 327

```

mh1 = mh1 + field[key[0]][2]
mt1 = mt1 + field[key[1]][2]
i = i + 1
mh1 = mh1/float(i)
mt1 = mt1/float(i)

i = 0
for key in pairs2:
    mh2 = mh2 + field[key[0]][3]
    mt2 = mt2 + field[key[1]][3]
    i = i + 1
mh2 = mh2/float(i)
mt2 = mt2/float(i)

for key in pairs1:
    cov[0] = cov[0] + (field[key[0]][2]) * (field[key[1]][2])
for key in pairs2:
    cov[1] = cov[1] + (field[key[0]][3]) * (field[key[1]][3])

n1 = float(len(pairs1))
n2 = float(len(pairs2))
cov[0] = cov[0]/n1
cov[1] = cov[1]/n2
return cov
def wCovaField(field, pairs1, pairs2):
    "Compute weighted empirical covariance"
    cov = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
    n1 = len(pairs1)
    n2 = len(pairs2)
    err1 = zeros( n1 )
    err2 = zeros( n2 )
    w1 = zeros( n1 )
    w2 = zeros( n2 )
    c1 = zeros( n1 )
    c2 = zeros( n2 )
    d1 = zeros( n1 )
    d2 = zeros( n2 )
    m1 = 0.0
    m2 = 0.0

    # compute mean
    i = 0
    for key in pairs1:

```

```

m1 = m1 + field[key[0]][2] + field[key[1]][2]
i = i + 1
m1 = m1/(2.0*float(i))

i = 0
for key in pairs2:
m2 = m2 + field[key[0]][3] + field[key[1]][3]
i = i + 1
m2 = m2/(2.0*float(i))

i = 0
for key in pairs1:
d1[i] = distance( field[key[0]][1], field[key[0]][0], field[key[1]][1], field[key[1]][0] )
err1[i] = 1.0/(fabs(field[key[0]][4]) + fabs(field[key[1]][4]))
#err1[i] = 1.0/sqrt(field[key[0]][4]**2 + field[key[1]][4]**2)
c1[i] = (field[key[0]][2] ) * (field[key[1]][2])
i = i + 1
i = 0
for key in pairs2:
d2[i] = distance( field[key[0]][1], field[key[0]][0], field[key[1]][1], field[key[1]][0] )
err2[i] = 1.0/(fabs(field[key[0]][5]) + fabs(field[key[1]][5]))
#err2[i] = 1.0/sqrt(field[key[0]][5]**2 + field[key[1]][5]**2)
c2[i] = (field[key[0]][3]) * (field[key[1]][3])
i = i + 1

n1p = 2.0*float(n1)
n2p = 2.0*float(n2)
d1max = max(d1)
d2max = max(d2)
# weights modulated by distanc between sites
#w1 = exp(-d1/(d1max*1.0))*err1
#w2 = exp(-d2/(d2max*1.0))*err2
# raw weights
w1 = err1
w2 = err2
# normalize weights
w1 = w1/sum(w1)
w2 = w2/sum(w2)
# compute covariance
cov[0] = sum(w1*c1) / (1.0 - sum(w1**2))
cov[1] = sum(w2*c2) / (1.0 - sum(w2**2))
# compute errors
cov[2] = sum(1.0/err1)/float(len(pairs1))

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 329

```

cov[3] = sum(1.0/err2)/float(len(pairs2))

return cov

def mvarField(field,binnedsites):
    "Compute empirical semi-variogram for a defined bin"
    mvar = [0.0, 0.0]
    for key in binnedsites:
        mvar[0] = mvar[0] + ( field[key[0]][2] - field[key[1]][2] )**2
        mvar[1] = mvar[1] + ( field[key[0]][3] - field[key[1]][3] )**2
    n = 2.0*float(len(binnedsites))
    mvar[0] = mvar[0]/(2.0*n)
    mvar[1] = mvar[1]/(2.0*n)
    return mvar

def varField(field):
    "Compute empirical variance"
    var = [0.0, 0.0, 0.0]
    for key in field.keys():
        var[0] = var[0] + field[key][2] * field[key][2]
        var[1] = var[1] + field[key][3] * field[key][3]
        var[2] = var[2] + field[key][2] * field[key][3]
    n = float(len(field))
    var[0] = var[0]/n
    var[1] = var[1]/n
    var[2] = var[2]/n
    return var

def wVarField(field):
    "Compute weighted empirical covariance"
    var = [0.0, 0.0, 0.0]
    v1 = zeros(len(field))
    v2 = zeros(len(field))
    w1 = zeros(len(field))
    w2 = zeros(len(field))
    i = 0

    for key in field.keys():
        v1[i] = field[key][2] * field[key][2]
        v2[i] = field[key][3] * field[key][3]
        w1[i] = 1.0/(field[key][4]**2)
        w2[i] = 1.0/(field[key][5]**2)
        i = i + 1

```

```

# normalize weights
w1 = w1/sum(w1)
w2 = w2/sum(w2)
var[0] = sum(v1*w1)/sum(w1)
var[1] = sum(v2*w1)/sum(w2)
var[2] = 0.0
return var

def scatterPlot(field, lower, upper, lflag):
    "Scatterplot of the data (for a given bin)"
    # compute spherical distances
    sd = spherDistance(field)
    # bin the sites
    binnedsites = binSites(sd, lower, upper)

    v1i = zeros(len(binnedsites))
    v1j = zeros(len(binnedsites))
    v2i = zeros(len(binnedsites))
    v2j = zeros(len(binnedsites))
    cp = []

    i = 0
    for pairs in binnedsites:
        v1i[i] = field[pairs[0]][2]
        v1j[i] = field[pairs[1]][2]
        v2i[i] = field[pairs[0]][3]
        v2j[i] = field[pairs[1]][3]
        cp.append(pairs)
    i = i + 1
    couples = array(cp)
    figure(1)
    scatter(v1i, v1j)
    if lflag == 'y':
        for i in range(len(v1j)):
            text(v1i[i], v1j[i], join(couples[i]), fontsize=4 )

    v1 = axis()
    plot(arange(v1[0],v1[1]), arange(v1[0],v1[1]),'r')

    grid(True)
    title('East direction scatterplot')
    figure(2)
    scatter(v2i, v2j)

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 331

```

if lflag == 'y':
    for i in range(len(v1j)):
        text(v2i[i], v2j[i], join(couples[i]), fontsize=4 )

v2 = axis()
plot(arange(v2[0],v2[1]), arange(v2[0],v2[1]),'r')
grid(True)
title('North direction scatterplot')
show()

## line1 = arange(min(v1i),max(v1i))
##
## figure(211)
## clf
## plot(v1i,v1j,'o',line1,line1,'r')
## ylabel('East direction velocity scatterplot (mm/yr)')
## grid(True)
##
## line2 = arange(min(v2i),max(v2i))
##
## figure(212)
## clf
## plot(v2i,v2j,'o',line2,line2,'r')
## ylabel('North direction velocity scatterplot (mm/yr)')
## grid(True)
##
## show()
def CleanScatterPlot(field, binnedsites, treshold1, treshold2):
    "Remove pairs whose values are greater than treshold from binned sites list"
    # find the pairs whose difference is smaller than treshold
    pairs1 = []
    pairs2 = []
    for i in range(len(binnedsites)):
        delta1 = fabs(field[binnedsites[i][0]][2] - field[binnedsites[i][1]][2])
        delta2 = fabs(field[binnedsites[i][0]][3] - field[binnedsites[i][1]][3])
        if delta1 <= treshold1:
            #print delta1
            pairs1.append(binnedsites[i])
        if delta2 <= treshold2:
            #print delta2
            pairs2.append(binnedsites[i])

```

```

return pairs1, pairs2

def covariogram(field,lag,upperbound,flag, tresh1, tresh2, l):
    "Compute covariogram "
    covar = []
    n = float(len(field))
    # compute variance
    variance = wVarField(field)
    # Variance is the first element
    covar.append([0.0, variance[0], variance[1], n, n, 0.0, 0.0])
    # compute spherical distances between couples
    spherdist = spherDistance(field)
    bin = 0.0
    while bin <= upperbound:
        lower = bin
        bin = bin + lag
        middle = (lower + bin) / 2.0
        binnedsites = binSites(spherdist,lower,bin)
        tresh1 = tresh1/1*middle
        tresh2 = tresh2/1*middle
        pairs1, pairs2 = CleanScatterPlot(field, binnedsites, tresh1, tresh2)
        nc1 = 2.0*float(len(pairs1))
        nc2 = 2.0*float(len(pairs2))
        if flag == 'w':
            cov = wCovaField(field, pairs1, pairs2)
        elif flag == 'n':
            cov = covaField(field, pairs1, pairs2)

        covar.append([middle, cov[0], cov[1], nc1, nc2, cov[2], cov[3]])

    return covar

def mvariogram(field,lag,upperbound):
    "Compute Matheron classical variogram "
    mvario = []
    n = float(len(field))
    # compute spherical distances between couples
    spherdist = spherDistance(field)
    bin = 0.0
    while bin <= upperbound:
        lower = bin
        bin = bin + lag
        middle = (lower + bin) / 2.0

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 333

```
binnedsites = binSites(spherdist,lower,bin)
nc = 2.0*float(len(binnedsites))
mvar = mvarField(field, binnedsites)
mvario.append([middle, mvar[0], mvar[1], nc])
return mvario

def averageVariogram(vario,npoints):
    "Compute moving average of the covariogram"
    # from matplotlib.mlab import movavg

    distance = []
    var1 = []
    var2 = []
    avvar = []

    for index in range(len(vario)):
        distance.append(vario[index][0])
        var1.append(vario[index][1])
        var2.append(vario[index][2])
    if npoints > 0:
        var1avg = movavg(var1, npoints)
        var2avg = movavg(var2, npoints)
        distanceavg = movavg(distance, npoints)
    elif npoints == 0:
        var1avg = var1
        var2avg = var2
        distanceavg = distance

    for index in range(len(distanceavg)):
        avvar.append([var1avg[index], var2avg[index], distanceavg[index], 0])

    return avvar

def averageCovariogram(covar,npoints):
    "Compute moving average of the covariogram"
    # from matplotlib.mlab import movavg

    distance = []
    err1 = []
    err2 = []
    cov1 = []
    cov2 = []
    #cov3 = []
    avcovar = []
```

```

for index in range(len(covar)):
    distance.append(covar[index][0])
    cov1.append(covar[index][1])
    cov2.append(covar[index][2])
    #cov3.append(covar[index][3])
    err1.append(covar[index][5])
    err2.append(covar[index][6])

if npoints > 0:
    cov1avg = movavg(cov1, npoints)
    cov2avg = movavg(cov2, npoints)
    #cov3avg = movavg(cov3, npoints)
    distanceavg = movavg(distance, npoints)
elif npoints == 0:
    cov1avg = cov1
    cov2avg = cov2
    #cov3avg = cov3
    distanceavg = distance
    erravg1 = err1
    erravg2 = err2

for index in range(len(distanceavg)):
    avcovar.append([cov1avg[index], cov2avg[index], distanceavg[index], 0, erravg1[index], erravg2[index]])

return avcovar

def showCovariogram(covar):
    "Print covariogram on the screen"
    for index in range(len(covar)):
        print "%4f %4f %4f %4f\n" % (covar[index][0], covar[index][1], covar[index][2], covar[index][3])
def writeCovariogram(covar,path):
    "Write covariogram into a file"
    # open file
    f = open(path,w)
    # writing loop
    for index in range(len(covar)):
        # build formatted string
        formline = "%4f %4f %4f %4f\n" % (covar[index][0], covar[index][1], covar[index][2], covar[index][3])
        # write string into file
        f.write(formline)

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 335

```
# close file
f.close
def plotCovariogram(covar, p1, p2):
    "Plot covariogram, "
    # from pylab import plot, subplot, grid, title, xlabel, ylabel, show
    clf

    cov1 = []
    cov2 = []
    err1 = []
    err2 = []
    #cov3 = []
    distance = []
    f1 = []
    f2 = []

    for index in range(len(covar)):
        cov1.append(covar[index][0])
        cov2.append(covar[index][1])
        #cov3.append(covar[index][2])
        distance.append(covar[index][2])
        err1.append(covar[index][4])
        err2.append(covar[index][5])
        d = arange(0.0, max(distance), 1.0)
        f1 = peval(d, p1)
        f2 = peval(d, p2)

    subplot(211)
    plot(distance, cov1, 'bo', d, f1, 'r')
    #errorbar(distance, cov1, err1)
    grid(True)
    title('2D field covariogram')
    ylabel('East cov.')
    subplot(212)
    plot(distance, cov2, 'bo', d, f2, 'r')
    #errorbar(distance, cov2, err2)
    grid(True)
    xlabel('Distance (Km)')
    ylabel('North cov.')
    #subplot(313)
```

```

#plot(distance, cov3, 'bo')
#grid(True)
#xlabel('Distance (Km)')
#ylabel('East-North cov.')
show()
def plotVariogram(vario):
    "Plot variogram "
# from pylab import plot, subplot, grid, title, xlabel, ylabel, show
    clf

    var1 = []
    var2 = []
    distance = []

    for index in range(len(vario)):
        var1.append(vario[index][0])
        var2.append(vario[index][1])
        distance.append(vario[index][2])

    subplot(211)
    plot(distance, var1, 'bo')
    grid(True)
    title('2D field variogram')
    ylabel('East cov.')
    subplot(212)
    plot(distance, var2, 'bo')
    grid(True)
    xlabel('Distance (Km)')
    ylabel('North cov.')
    show()
def fieldHistogram(field,bin):
    "Plot the histogram of the velocities"
# from pylab import hist, xlabel, ylabel, title, show, grid, subplot
    clf

    v1 = []
    v2 = []
    for key in field.keys():
        v1.append(field[key][2])
        v2.append(field[key][3])

# compute and plot histograms

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 337

```
clf
subplot(211)
n1, bins1, patches1 = hist(v1, bin, normed=0, align='center')
grid(True)
title('Histogram of velocity components')
xlabel('East direction (cm/year)')
ylabel('Number of sites')

subplot(212)
n2, bins2, patches2 = hist(v2, bin, normed=0, align='center')
grid(True)
xlabel('North direction (cm/year)')
ylabel('Number of sites')

show()
def peval(x, p):
    "Define covariance function"
    # from math import exp
    a = p[0]
    b = p[1]

    #print len(x)
    #print x
    # exponential function
    #f = a*exp( -( x/b ) )
    # gaussian function
    #f = a*exp( -( x/b )**2 )
    # Cauchy function
    f = a/( 1.0 + (x/b)**2 )

    return f
def check_partials_de(mygrid,p):
    "Check the partial of the covariance function respect to east direction"
    lon0 = mygrid[0,0]
    lat0 = mygrid[0,1]
    f = []
    dfde = []
    d = []
    sigma_squared = p[0]
    d0 = p[1]
```

```

# evaluate covariance function
for i in range(len(mygrid)):
lon1 = mygrid[i,0]
lat1 = mygrid[i,1]
d10 = distance(lat1, lon1, lat0, lon0)
d.append(d10)
f.append(peval(d10,p))
dfde.append(dCss_de(lon0, lon1, lat0, lat1, sigma_squared, d0))

return f, dfde, d

def check_partials_dn(mygrid,p):
    "Check the partial of the covariance function respect to North direction"
lon0 = mygrid[0,0]
lat0 = mygrid[0,1]
f = []
dfdn = []
d = []
sigma_squared = p[0]
d0 = p[1]

# evaluate covariance function
for i in range(len(mygrid)):
lon1 = mygrid[i,0]
lat1 = mygrid[i,1]
d10 = distance(lat1, lon1, lat0, lon0)
d.append(d10)
f.append(peval(d10,p))
dfdn.append(dCss_dn(lon0, lon1, lat0, lat1, sigma_squared, d0))

return f, dfdn, d

def residuals(p, y, x):
    "Compute residuals between empirical covariogram covariance function"
err = y-peval(x,p)

return err

def fitCovar(covar,initval1,initval2):
    "Fit the covariance function using LM algorithm"
# import scipy
# from scipy.optimize import leastsq
y1list = []

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 339

```
y2list = []
#y3list = []
xlist = []

for index in range(len(covar)):
    y1list.append(covar[index][0])
    y2list.append(covar[index][1])
    #y3list.append(covar[index][2])
    xlist.append(covar[index][3])
    # convert to array
    y1 = array(y1list)
    y2 = array(y2list)
    #y3 = array(y3list)
    x = array(xlist)

    plsq1 = leastsq(residuals, array(initval1), args=(y1, x), maxfev=2000)
    plsq2 = leastsq(residuals, array(initval2), args=(y2, x), maxfev=2000)
    #plsq3 = leastsq(residuals, array(initval3), args=(y3, x), maxfev=2000)
    return plsq1, plsq2#, plsq3
def plotField(field, etopo, lons, lats):
    "Plot field"

    # define the region of interest
    lon = []
    lat = []
    ve = []
    vn = []

    for key in field.keys():
        lon.append(field[key][0])
        lat.append(field[key][1])
        ve.append(field[key][2])
        vn.append(field[key][3])

    for index in range(len(lon)):
        if lon[index] > 180.0:
            lon[index] = -(360.0 - lon[index])

    delta = 5.0
    maxlon = max(lon)
    minlon = min(lon)
    maxlat = max(lat)
```

```

minlat = min(lat)

maxlon = maxlon + delta
minlon = minlon - delta
maxlat = maxlat + delta
minlat = minlat - delta

print maxlon, maxlat
print minlon + 360.0, minlat

fig=figure()
# setup mercator map projection (-80 to +80).

m = Basemap(llcrnrlon=minlon,llcrnrlat=minlat,urcrnrlon=maxlon,urcrnrlat=maxlat,\
resolution='h',area_thresh=10000.0,projection='merc', lat_0 = 0.0, \
lon_0=0.5*(maxlon + minlon),lat_ts=0.0)

# transform to nx x ny regularly spaced native projection grid
nx = len(lons); ny = int(80.0*len(lats)/90.0)
#topodat = m.transform_scalar(topoin,lons,lats,nx,ny)
fig.add_axes([0.1,0.1,0.75,0.75])
# plot image over map.
#im = m.imshow(topodat,cm.jet)
# plot vector field
verot,vnrot,x,y = m.rotate_vector(array(ve),array(vn),array(lon),array(lat),returnxy=True)
q = m.quiver(x,y,verot,vnrot, color = 'r')
qk = quiverkey(q, 0.95, 1.05, 2.0, '2 mm/yr', labelpos='W')
title('Mercator',y=1.1)

m.drawcoastlines()
# m.drawcountries()
#m.fillcontinents(color='coral',lake_color='aqua')
# m.drawstates()
# m.fillcontinents()
# draw parallels
delat = 5.0
circles = arange(0.0,90.0+delat,delat).tolist()+\
arange(-delat,-90.0-delat,-delat).tolist()
m.drawparallels(circles,labels=[1,0,0,1])
# draw meridians
delon = 5.0
meridians = arange(-180,180,delon)

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 341

```
m.drawmeridians(meridians,labels=[1,0,0,1])
```

```
show()
```

```
def plotFields(field, field1, etopo, lons, lats):
```

```
    "Plot 2 fields on the same map"
```

```
    # define the region of interest
```

```
    lon = []
```

```
    lat = []
```

```
    ve = []
```

```
    vn = []
```

```
    for key in field.keys():
```

```
        lon.append(field[key][0])
```

```
        lat.append(field[key][1])
```

```
        ve.append(field[key][2])
```

```
        vn.append(field[key][3])
```

```
    lon1 = []
```

```
    lat1 = []
```

```
    ve1 = []
```

```
    vn1 = []
```

```
    for key in field1.keys():
```

```
        lon1.append(field1[key][0])
```

```
        lat1.append(field1[key][1])
```

```
        ve1.append(field1[key][2])
```

```
        vn1.append(field1[key][3])
```

```
    for index in range(len(lon)):
```

```
        if lon[index] > 180.0:
```

```
            lon[index] = -(360.0 - lon[index])
```

```
    for index in range(len(lon1)):
```

```
        if lon1[index] > 180.0:
```

```
            lon1[index] = -(360.0 - lon1[index])
```

```
    delta = 1.0
```

```
    maxlon = max(lon)
```

```
    minlon = min(lon)
```

```
    maxlat = max(lat)
```

```
    minlat = min(lat)
```

```
    maxlon = maxlon + delta
```

```

minlon = minlon - delta
maxlat = maxlat + delta
minlat = minlat - delta

print maxlon, maxlat
print minlon + 360.0, minlat

fig=figure()
# setup mercator map projection (-80 to +80).

m = Basemap(llcrnrlon=minlon,llcrnrlat=minlat,urcrnrlon=maxlon,urcrnrlat=maxlat,\
resolution='h',area_thresh=10000.0,projection='merc', lat_0 = 0.0, \
lon_0=0.5*(maxlon + minlon),lat_ts=0.0)

# transform to nx x ny regularly spaced native projection grid
nx = len(lons); ny = int(80.0*len(lats)/90.0)
#topodat = m.transform_scalar(topoin,lons,lats,nx,ny)
fig.add_axes([0.1,0.1,0.75,0.75])
# plot image over map.
#im = m.imshow(topodat,cm.jet)
# plot vector field
verot,vnrot,x,y = m.rotate_vector(array(ve),array(vn),array(lon),array(lat),returnxy=True)
verot1,vnrot1,x1,y1 = m.rotate_vector(array(ve1),array(vn1),array(lon1),array(lat1),returnxy=True)
q = m.quiver(x,y,verot,vnrot, color = 'r')
q1 = m.quiver(x1,y1,verot1,vnrot1, color = 'k')
qk = quiverkey(q, 0.95, 1.05, 2.0, '2 mm/yr', labelpos='W')
title('Mercator',y=1.1)

m.drawcoastlines()
# m.drawcountries()
#m.fillcontinents(color='coral',lake_color='aqua')
# m.drawstates()
# m.fillcontinents()
# draw parallels
delat = 5.0
circles = arange(0.0,90.0+delat,delat).tolist()+\
arange(-delat,-90.0-delat,-delat).tolist()
m.drawparallels(circles,labels=[1,0,0,1])
# draw meridians
delon = 5.0
meridians = arange(-180,180,delon)
m.drawmeridians(meridians,labels=[1,0,0,1])

```

```

show()
def setGrid(minlon, minlat, maxlon, maxlat, steplon, steplat):
    "Define the interpolation grid"
    nlon = int(fabs(minlon - maxlon)/steplon)
    nlat = int(fabs(minlat - maxlat)/steplat)
    nodes_num = nlon*nlat
    grid = zeros( (nodes_num, 2) )
    i = 0
    for k in range(nlon):
        for l in range(nlat):
            grid[i,0] = minlon + float(k*steplon)
            grid[i,1] = minlat + float(l*steplat)
            i = i + 1
    return grid
def matrixInterp(grid,field,p1,p2,p3,scale_fact):
    "Compute all the var-covar matrices needed for least squares collocation interpolation"
    # number of nodes
    m = len(grid)
    # number of data points
    n = len(field)
    field_list = []

    # transform dictionary into list
    for key in field.keys():
        field_list.append(field[key])

    # transform list into array
    field_array = array(field_list)
    # free memory
    del field, field_list

    # compute Cll matrix, build noise covariance matrix W
    # and velocity vector V.
    # Cll matrix is the var-covar matrix between
    # sites
    Cll = zeros( (n+n,n+n) )
    W = zeros( (n+n,n+n) )
    V = zeros( (n+n) )
    C11 = zeros( (n,n) )
    C22 = zeros( (n,n) )
    C12 = zeros( (n,n) )

```

```

for i in range(n):
for j in range(n):
if i < j:
#distance(lat1, lon1, lat2, lon2)
dij = distance(field_array[i,1], field_array[i,0], field_array[j,1], field_array[j,0])
C11[i,j] = peval(dij, p1)
C22[i,j] = peval(dij, p2)
#C12[i,j] = peval(dij, p3)
elif i == j:
W[i,j] = (field_array[i,4]*scale_fact)**2
W[i+n,j+n] = (field_array[i,5]*scale_fact)**2
#W[i+n,j] = field_array[i,6]
#W[i,j+n] = W[i+n,j+n]
V[i] = field_array[i,2]
V[i+n] = field_array[i,3]
print Dimension of var-covar matrix between sites... , shape(C11[n:n+n,n:n+n])
print shape(C22)
print shape(transpose(C22))
print shape(p2[0]*eye(n))
C11[0:n,0:n] = C11 + transpose(C11) + p1[0]*eye(n)
C11[n:n+n,n:n+n] = C22 + transpose(C22) + p2[0]*eye(n)
#C11[0:n,n:n+n] = p3[0]*eye(n)
#C11[n:n+n,0:n] = p3[0]*eye(n)
# free memory
del C11, C22

# compute Csl matrix
# Csl is the coss-covar matrix between
# the sites and the interpolation grid points
Csl = zeros( (m+m,n+n) )
for s in range(m):
for l in range(n):
dsl = distance(grid[s,1], grid[s,0], field_array[l,1], field_array[l,0])
Csl[s,l] = peval(dsl, p1)
Csl[s+m,l+n] = peval(dsl, p2)
#Csl[s,l+n] = peval(dsl, p3)
#Csl[s+m,l] = Csl[s,l+n]
# compute Css matrix
# Css is the var-covar matrix
# between the interpolation grid points
C11 = zeros( (m,m) )
C22 = zeros( (m,m) )

```

```

Css = zeros( (m+m,m+m) )
for i in range(m):
for j in range(m):
if i < j:
dss = distance(grid[i,1], grid[i,0], grid[j,1], grid[j,0])
C11[i,j] = peval(dss, p1)
C22[i,j] = peval(dss, p2)
#C12[i,j] = peval(dij, p3)
Css[0:m,0:m] = C11 + transpose(C11) + p1[0]*eye(m)
Css[m:m+m,m:m+m] = C22 + transpose(C22) + p2[0]*eye(m)
#Css[0:m,m:m+m] = p3[0]*eye(m)
#Css[m:m+m,0:m] = Css[0:m,m:m+m]
# Matrix of partials of Csl matrix respect to East and North direction.
# This matrix is needed for strain-rate computation.
#dCsl = zeros( (m+m,n+n+n+n) )
dCsl_de = zeros( (m+m,n+n) )
dCsl_dn = zeros( (m+m,n+n) )
#dCsl_e_de = zeros( (m,n) )
#dCsl_e_dn = zeros( (m,n) )
#dCsl_n_de = zeros( (m,n) )
#dCsl_n_dn = zeros( (m,n) )
for s in range(m):
for l in range(n):
#print s, l
dCsl_e_de = dCss_de(grid[s,0], field_array[l,0], grid[s,1], field_array[l,1], p1[0], p1[1])
dCsl_e_dn = dCss_dn(grid[s,0], field_array[l,0], grid[s,1], field_array[l,1], p1[0], p1[1])
dCsl_n_de = dCss_de(grid[s,0], field_array[l,0], grid[s,1], field_array[l,1], p2[0], p2[1])
dCsl_n_dn = dCss_dn(grid[s,0], field_array[l,0], grid[s,1], field_array[l,1], p2[0], p2[1])
#print dCsl_e_dn, dCsl_n_de

dCsl_de[s,l] = dCsl_e_de
dCsl_de[s+m,l+n] = dCsl_n_de
dCsl_dn[s,l] = dCsl_e_dn
dCsl_dn[s+m,l+n] = dCsl_n_dn
#dCsl_de = append(dCsl_e_de, dCsl_n_de,axis=0)
#dCsl_dn = append(dCsl_e_dn, dCsl_n_dn,axis=0)
return Cll, Csl, Css, W , V, dCsl_de, dCsl_dn
def fieldInterp(mygrid,Cll,Csl,Css,W, V, dCsl_de, dCsl_dn):
"Compute interpolated field and strain rate matrix"
# Collocation formula
# for the interpolated values
Cll_noise = Cll + W
inv_Cll = inv(Cll_noise)

```

```

#print shape(Csl)
#print shape(inv_Cll)
#print shape(V)
# prediction of the velocities
U = dot(dot(Csl, inv_Cll), V)
# free memory
del Cll, Cll_noise

# Collocation formula for the errors
Ess = Cssl - dot(Csl,dot(inv_Cll,transpose(Csl) ) )
# collocation formula for the partials of the velocities respect to
# east and north directions
A_de = dot(dCsl_de, inv_Cll)
A_dn = dot(dCsl_dn, inv_Cll)
strain_de = dot(A_de, V)
strain_dn = dot(A_dn, V)
# compute the covariances matrices of the partials
# y = Ax + b => D(y) = AD(x)A'
cov_strain_de = dot( dot(A_de,W),transpose(A_de) )
cov_strain_dn = dot( dot(A_dn,W),transpose(A_dn) )

# store the interpolated values into a
# field object and into a strain rate object
infield = {}
strain_rate = {}
n = len(mygrid)
for i in range(n):
key = join([INT,str(i)])
infield[key] = [ mygrid[i,0], mygrid[i,1], U[i], U[i+n], sqrt(Ess[i,i]), sqrt(Ess[i+n,i+n]), Ess[i,i+n] ]
# build symmetric part of the strain rate tensor
ee_dot = strain_de[i]
en_dot = 0.5*(strain_dn[i] + strain_de[i+n])
ne_dot = 0.5*(strain_de[i+n] + strain_dn[i])
nn_dot = strain_dn[i+n]
# compute eigenvalues analytically
e1 = 0.5*(ee_dot+nn_dot) + sqrt( 0.25*(ee_dot-nn_dot)**2 + en_dot**2 )
e2 = 0.5*(ee_dot+nn_dot) - sqrt( 0.25*(ee_dot-nn_dot)**2 + en_dot**2 )
# angle between east and e1 (in radians)
theta = 0.5 * atan2(2.0*en_dot,ee_dot - nn_dot) #* 180.0/pi
# compute the errors related to e1, e2 and theta
dee_dot = sqrt(cov_strain_de[i,i])
den_dot = 0.5*(sqrt(cov_strain_dn[i,i]+cov_strain_de[i+n,i+n]))
dne_dot = 0.5*(sqrt(cov_strain_de[i+n,i+n]+cov_strain_dn[i,i]))

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 347

```

dnn_dot = sqrt(cov_strain_dn[i+n,i+n])
# error propagation
de1 = 0.5*(dee_dot+dnn_dot) + ( 0.5*(ee_dot-nn_dot)*(dee_dot-dnn_dot)+2.0*en_dot*den_dot ) / (
2.0*sqrt( 0.25*(ee_dot-nn_dot)**2+en_dot**2))
de2 = 0.5*(dee_dot+dnn_dot) - ( 0.5*(ee_dot-nn_dot)*(dee_dot-dnn_dot)+2.0*en_dot*den_dot ) / ( 2.0*sqrt(
0.25*(ee_dot-nn_dot)**2+en_dot**2))
dtheta = cos(2.0*theta)**2 * ( (den_dot/(ee_dot-nn_dot)) - en_dot * (dee_dot-dnn_dot)/((ee_dot-nn_dot)**2)
)
#dtheta = (1.0+4.0*theta**2) * ( (den_dot/(dee_dot-dnn_dot)) - en_dot * (dee_dot-dnn_dot)/((ee_dot-
nn_dot)**2) )
# convert theta and dtheta into degrees
#print theta, dtheta
theta = float(theta) * 180.0/pi
dtheta = float(dtheta) * 180.0/pi

# find the most compressional and the most extensional eigevector
emax = max(e1,e2)
emin = min(e1,e2)

#print e1, e2
#print emax, emin
# GMT needs the azimuth (clockwise) of the most compressional eigenvector, that is emin
# theta is the angle between e1 and east, so...
if e1 == emax:
print e1 = emax
demax = de1
demin = de2
if theta >= 0.0 and theta <= 90.0:
theta = -theta
elif theta < 0.0 and theta >= -90.0:
theta = -theta
elif theta < -90.0 and theta >= -180.0:
theta = theta + 90.0 + 90.0
elif theta <= 180.0 and theta > 90.0:
theta = 360 - (theta - 90.0 + 90.0)
if e1 == emin:
print e1 = emin
demin = de1
demax = de2
if theta >= 0.0 and theta <= 90.0:
theta = 90.0 - theta
elif theta < 0.0 and theta >= -90.0:
theta = 90.0 - theta

```

```

elif theta < -90.0 and theta >= -180.0:
theta = 90.0 - theta
elif theta <= 180.0 and theta > 90.0:
theta = -(theta - 90.0)

#strain_rate[key] = [ mygrid[i,0], mygrid[i,1], array( [[strain_de[i],strain_dn[i]], [strain_de[i+n],strain_dn[i+n]
]] ) ]
strain_rate[key] = [ mygrid[i,0], mygrid[i,1], emax, demax, emin, demin, theta, dtheta ]
# 0 1 2 3 4 5 6 7

return infield, strain_rate

def compareFields(field1,field2):
“Compute the rms of two fields“

squared_res = 0.0
n = 0
for key1 in field1.keys():
for key2 in field2.keys():
if field1[key1][0] == field2[key2][0] and field1[key1][1] == field2[key2][1]:
n = n + 1
squared_res = squared_res + (field1[key1][2] - field2[key2][2])**2 + (field1[key1][3] - field2[key2][3])**2
return 0.5*squared_res/float(n)

def extractGrid(field):
“Extract a grid of coordinates from a field“
n = len(field)
mygrid = zeros( (n,2) )

i = 0
for key in field.keys():
mygrid[i,0] = field[key][0]
mygrid[i,1] = field[key][1]
i = i + 1
return mygrid

def linearFitField(field):
“Fit a linear trend to the field, return polynomial coefficients
for each component“
m = len(field)
x = zeros( (m,3) )
y1 = zeros( m )

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 349

```
y2 = zeros( m )

i = 0
for key in field.keys():
    x[i, 0] = field[key][0]
    x[i, 1] = field[key][1]
    x[i, 2] = 1.0
    y1[i] = field[key][2]
    y2[i] = field[key][3]
    i = i + 1
# using normal equations because numpy.linalg.lstsq does not work
xtx = dot(transpose(x), x)
inv_xtx = inv(xtx)
inv_xtx_xt = dot(inv_xtx, transpose(x))
c1 = dot(inv_xtx_xt, y1)
c2 = dot(inv_xtx_xt, y2)

return c1, c2
def quadraticFitField(field):
    "Fit a quadratic trend to the field, return polynomial coefficients
    for each component"
    m = len(field)
    x = zeros( (m,6) )
    y1 = zeros( m )
    y2 = zeros( m )

    i = 0
    for key in field.keys():
        x[i, 0] = field[key][0] * field[key][0]
        x[i, 1] = field[key][1] * field[key][1]
        x[i, 2] = field[key][0] * field[key][1]
        x[i, 3] = field[key][0]
        x[i, 4] = field[key][1]
        x[i, 5] = 1.0
        y1[i] = field[key][2]
        y2[i] = field[key][3]
        i = i + 1
    # using normal equations because numpy.linalg.lstsq does not work
    xtx = dot(transpose(x), x)
    inv_xtx = inv(xtx)
```

```

inv_xtx_xt = dot(inv_xtx, transpose(x))
c1 = dot(inv_xtx_xt, y1)
c2 = dot(inv_xtx_xt, y2)

return c1, c2

def detrendField(field, c1, c2):
    "Remove linear trend from the field"
    field1 = {}
    for key in field.keys():
        del1 = field[key][2] - c1[0]*field[key][0] - c1[1]*field[key][1] - c1[2]
        del2 = field[key][3] - c2[0]*field[key][0] - c2[1]*field[key][1] - c2[2]
        field1[key] = [field[key][0], field[key][1], del1, del2, field[key][4], field[key][5], field[key][6] ]

    return field1

def qDetrendField(field, c1, c2):
    "Remove quadratic trend from the field"
    field1 = {}
    for key in field.keys():
        del1 = field[key][2] - c1[0]*field[key][0]*field[key][0] - c1[1]*field[key][1]*field[key][1] - c1[2]*field[key][0]*field[key][1]
        \
        - c1[3]*field[key][0] - c1[4]*field[key][1] - c1[5]
        del2 = field[key][2] - c2[0]*field[key][0]*field[key][0] - c2[1]*field[key][1]*field[key][1] - c2[2]*field[key][0]*field[key][1]
        \
        - c2[3]*field[key][0] - c2[4]*field[key][1] - c2[5]

        field1[key] = [field[key][0], field[key][1], del1, del2, field[key][4], field[key][5], field[key][6] ]

    return field1

def spherical2cart(lon, lat):
    " Convert from spherical coordinates into cartesian coordinates"
    # set earth mean radius (Km)
    r = 6378.0
    # convert degress into radiantes

    x = r*cos(lat)*cos(lon)
    y = r*cos(lat)*sin(lon)
    z = r*sin(lat)
    return x, y, z

def geo2topo(lon, lat):
    " Compute the rotation matrix to convert vectors from topocentric into geocentric frame"
    " The order is: x, y, z -> E, N, U"

```

```

a = zeros( (3,3) )
a[0,0] = -sin(lon)
a[0,1] = cos(lon)
a[0,2] = 0.0
a[1,0] = -sin(lat)*cos(lon)
a[1,1] = -sin(lat)*sin(lon)
a[1,2] = cos(lat)
a[2,0] = cos(lat)*cos(lon)
a[2,1] = cos(lat)*sin(lon)
a[2,2] = sin(lat)
return a
def designMatrix(x, y, z):
    "Build the design matrix for the rigid motion fitting"
    design = zeros( (3,3) )
    design[0,0] = 0.0
    design[0,1] = z
    design[0,2] = -y
    design[1,0] = -z
    design[1,1] = 0.0
    design[1,2] = x
    design[2,0] = y
    design[2,1] = -x
    design[2,2] = 0.0
    return design

def poleEst(field):
    "Estimate angular rigid motion of the field"
    n = len(field)
    v_cart = zeros( 3 )
    v_topo = zeros( 3 )
    dmat = zeros( (n+n+n,3) ) # design matrix
    obs = zeros( (n+n+n,1) ) # observation vector (ve, vn, vu)
    c = zeros( (n+n+n,n+n+n) ) # covariance matrix
    w = zeros( (n+n+n,n+n+n) ) # weight matrix
    ci = zeros( (3,3) ) # covariance matrix for the i-site

    i = 0
    for key in field.keys():
        # convert spherical coordinates into cartesian ones
        lon_r = deg2rad(field[key][0])
        lat_r = deg2rad(field[key][1])
        x, y, z = geod2cart(lon_r, lat_r, 0.0)

```

```

# compute design matrix
design = designMatrix(x, y, z)
# velocity in topocentric frame
v_topo = [field[key][2], field[key][3], 0.0]
# compute rotation matrix
a = geo2topo(lon_r, lat_r)
# rotate velocity vector from topocentric to geocentric
# remember that A is the rotation matrix geocentric -> topocentric
v_cart = dot(transpose(a), v_topo)
# compute covariance matrix for the i-site, in topocentric frame
ci[0,0] = field[key][4]**2
ci[1,1] = field[key][5]**2
ci[2,2] = 0.0 # up velocity is constrained to 0.0
# rotate covariance matrix for the i-site from topocentric to geocentric
ci = dot( transpose(a), dot(ci,a) ) # if y = Ax then D(y) = AD(x)A'
# the diagonal is needed, only.
ci[0,1] = 0.0
ci[0,2] = 0.0
ci[1,2] = 0.0
ci[1,0] = 0.0
ci[2,0] = 0.0
ci[2,1] = 0.0
# fill observation vector
obs[i] = v_cart[0]
obs[i+1] = v_cart[1]
obs[i+2] = v_cart[2]
# fill design matrix
dmat[i,:] = design[0,:]
dmat[i+1,:] = design[1,:]
dmat[i+2,:] = design[2,:]
# fill covariance matrix
c[i:i+3,i:i+3] = ci

i = i + 3
# weight matrix
w = inv(c)
# normalization
w = w/sum(diag(w))
# compute normal equations
hTh = dot( transpose(dmat), dot(w,dmat) )
hTh_inv = inv(hTh)
# estimate omega
omega = dot( dot( hTh_inv, transpose(dmat) ), dot(w,obs) )

```

```

return omega
def poleTransEst(field_horiz, field_vert):
    "Estimate angular and translational rigid motion of the field"
    n = len(field_horiz)
    v_cart = zeros( 3 )
    v_topo = zeros( 3 )
    dmat = zeros( (n+n+n,3+3) )
    obs = zeros( (n+n+n,1) )
    c = zeros( (n+n+n,n+n+n) ) # covariance matrix
    w = zeros( (n+n+n,n+n+n) ) # weight matrix
    ci = zeros( (3,3) ) # covariance matrix for the i-site

    i = 0
    for key in field_horiz.keys():
        # convert spherical coordinates into cartesian ones
        lon_r = deg2rad(field_horiz[key][0])
        lat_r = deg2rad(field_horiz[key][1])
        x, y, z = geod2cart(lon_r, lat_r)
        # compute design matrix
        design = designMatrix(x, y, z)
        # rotate velocity
        v_topo = [field_horiz[key][2], field_horiz[key][3], field_vert[key][3]]
        # compute rotation matrix
        a = geo2topo(lon_r, lat_r)
        v_cart = dot(transpose(a),v_topo)
        # compute covariance matrix for the i-site, in topocentric frame
        ci[0,0] = field_horiz[key][4]**2
        ci[1,1] = field_horiz[key][5]**2
        ci[2,2] = field_vert[key][4]**2
        # rotate covariance matrix for the i-site from topocentric to geocentric
        ci = dot( transpose(a), dot(ci,a) ) # if y = Ax then D(y) = AD(x)A'
        # the diagonal is needed, only.
        ci[0,1] = 0.0
        ci[0,2] = 0.0
        ci[1,2] = 0.0
        ci[1,0] = 0.0
        ci[2,0] = 0.0
        ci[2,1] = 0.0
        # observation vector
        obs[i] = v_cart[0]
        obs[i+1] = v_cart[1]
        obs[i+2] = v_cart[2]

```

```

# fill design matrix (rotational motion)
dmat[i,:3] = design[0,:]
dmat[i+1,:3] = design[1,:]
dmat[i+2,:3] = design[2,:]
# fill design matrix (translational motion)
dmat[i,3] = 1.0
dmat[i+1,4] = 1.0
dmat[i+2,5] = 1.0
# fill covariance matrix
c[i:i+3,i:i+3] = ci

i = i + 3
# weight matrix is the inverse of the covariance matrix
w = inv(c)
# normalize weights
w = w/sum(diag(w))
# compute normal equations
hTh = dot(transpose(dmat), dot(w,dmat))
hTh_inv = inv(hTh)
# estimate omega
omega = dot( dot( hTh_inv, transpose(dmat) ), dot(w, obs) )
return omega
def rigidFieldP(field, omega):
    "Compute field related to angular rigid motion"
    rfield = {}
    v_cart = zeros( 3 )
    v_topo = zeros( 3 )
    for key in field.keys():
        # convert spherical coordinates into cartesian ones
        lon_r = deg2rad(field[key][0])
        lat_r = deg2rad(field[key][1])
        x, y, z = geod2cart(lon_r, lat_r, 0.0)
        # compute cross product matrix
        cross = designMatrix(x, y, z)
        # compute rigid motion
        v_cart = dot(cross, omega)
    print v_cart
    # transform geocentric velocity vector into topocentric frame.
    a = geo2topo(lon_r, lat_r)
    v_topo = dot(a, v_cart)
    # build rigid motion field
    rfield[key] = [field[key][0], field[key][1], float(v_topo[0]), float(v_topo[1]), 0.0, 0.0, 0.0]
    return rfield

```

```

def rigidFieldPT(field, omega):
    "Compute field related to angular and translational rigid motion"
    rfield = {}
    v_cart = zeros( 3 )
    v_topo = zeros( 3 )
    for key in field.keys():
        # convert spherical coordinates into cartesian ones
        lon_r = deg2rad(field[key][0])
        lat_r = deg2rad(field[key][1])
        x, y, z = geod2cart(lon_r, lat_r, 0.0)
        # compute cross product matrix
        cross = designMatrix(x, y, z)
        # compute rigid motion
        v_cart = dot(cross, omega[0:3]) + omega[3:6]
        #print v_cart
        # transform geocentric velocity vector into topocentric frame.
        a = geo2topo(lon_r, lat_r)
        v_topo = dot(a, v_cart)
        # build rigid motion field
        rfield[key] = [field[key][0], field[key][1], float(v_topo[0]), float(v_topo[1]), 0.0, 0.0, 0.0]
    return rfield

def dCss_de(lon1, lon2, lat1, lat2, sigma_squared, d0):
    "Compute partials of Css respect to east direction"
    # earth mean radius (mm)
    r = 6378.0e+6
    # compute spherical distance
    d12 = distance(lat1, lon1, lat2, lon2)
    print d12
    print lat1, lon1, lat2, lon2
    # compute angular distance
    d12 = d12*1.0e+6
    d0 = d0*1.0e+6
    a12 = d12/r
    #p = [sigma, d0]
    # convert degrees into radianties
    lon1_r = deg2rad(lon1)
    lat1_r = deg2rad(lat1)
    lon2_r = deg2rad(lon2)
    lat2_r = deg2rad(lat2)

    # partial of the cauchy function respect to the spherical distance d12

```

```

dC12_d12 = -2.0*d12*sigma_squared/( (d0**2)*(1.0+(d12/d0)**2)**2)
# partial of the angular distance a12 respect to lon1
da12_dlon1 = ( cos(lat1_r)*cos(lat2_r)*sin(lon1_r-lon2_r) ) / sin(a12)
#da12_dlon1 = r*(lon1-lon2)*cos(lat2)

# compute partial
dDs1s2_de = 1.0/cos(lat1_r) * dC12_d12 * da12_dlon1 * 1.0e+9
#dDs1s2_de = dC12_d12 * d12/(r*cos(lon1-lon2)) / 1.0e+6 * 1.0e+9
# partial respect to de
# Gaussian function
#dDs1s2_de = -2.0 * d12_1 * (sigma**2) / ( sin(d12_r) * (d0*radius*cos(lat1))**2 ) * (sin(lat1)*sin(lat2)*sin(lon2-
lon1)) * exp(-(d12_1/d0)**2)
# Cauchy function
#dDs1s2_de = -2.0 * d12_1 * (sigma**2) / ( sin(d12_r) * (d0*radius*cos(lat1))**2 ) * (sin(lat1)*sin(lat2)*sin(lon2-
lon1)) / ( d0**2 *(1.0+(d12_1/d0)**2)**2)

return dDs1s2_de

def dCss_dn(lon1, lon2, lat1, lat2, sigma_squared, d0):
    "Compute partials of Css respect to north direction"
    # earth mean radius (Km)
    r = 6378.0e+6
    # compute spherical distance
    d12 = distance(lat1, lon1, lat2, lon2)
    print d12
    print lat1, lon1, lat2, lon2
    # compute angular distance
    d12 = d12*1.0e+6
    d0 = d0*1.0e+6
    a12 = d12/r
    #p = [sigma, d0]
    # convert degrees into radianes
    lon1_r = deg2rad(lon1)
    lat1_r = deg2rad(lat1)
    lon2_r = deg2rad(lon2)
    lat2_r = deg2rad(lat2)

    # partial of the cauchy function respect to the spherical distance d12
    dC12_d12 = -2.0*d12*sigma_squared/( (d0**2)*(1.0+(d12/d0)**2)**2)
    # partial of the angular distance a12 respect to lat1
    da12_dlat1 = ( sin(lat1_r)*cos(lat2_r)*cos(lon1_r-lon2_r)-cos(lat1_r)*sin(lat2_r) ) / sin(a12)
    #da12_dlat1 = r*(lat1-lat2)
    # compute partial

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 357

```

dDs1s2_dn = dC12_d12 * da12_dlat1 * 1.0e+9
#dDs1s2_dn = dC12_d12 * d12/(lat1-lat2) / 1.0e+6 * 1.0e+9
# partial respect to dn
# Gaussian function
#dDs1s2_dn = -2.0 * d12_1 * (sigma**2) / ( sin(d12_r) * (d0*radius)**2 ) * (sin(lat1)*cos(lat2)-cos(lat1)*cos(lat2)*cos(lon2-
lon1)) * exp(-(d12_1/d0)**2)
# Cauchy function
#dDs1s2_dn = -2.0 * d12_1 * (sigma**2) / ( sin(d12_r) * (d0*radius)**2 ) * (sin(lat1)*cos(lat2)-cos(lat1)*cos(lat2)*cos(lon2-
lon1)) / ( d0**2 *(1.0+(d12_1/d0)**2)**2)

return dDs1s2_dn

def readSolution(path):
    " Read sinex solution/estimate block "
    # store solution into a dictionary
    site_id_block = {}
    #solution_epochs_block = {}
    solution_estimate_block_x = {}
    solution_estimate_block_y = {}
    solution_estimate_block_z = {}
    solution_estimate_block_vx = {}
    solution_estimate_block_vy = {}
    solution_estimate_block_vz = {}
    solution_estimate_block = {}
    # define comment character
    comment = *
    # open file
    f = open(path,r)
    # read file line by line
    for s_outer in f:
        key_outer = split(s_outer)
        # jump over comment lines
        if key_outer[0][0] == comment:
            continue
        # define key
        key_block_start = +SITE/ID
        key_block_end = -SITE/ID
        # scan for keyword
        if key_outer[0] == key_block_start:
            # keyword found, start inner loop
            for s_inner in f:
                line = split(s_inner)
                if line[0][0] == comment:

```

```

continue
elif line[0] == key_block_end:
break
#site = join[line[0],line[2]]
site_id_block[line[0]] = join([ line[0],line[2] ])

### # define key
## key_block_start = +SOLUTION/EPOCHS
## key_block_end = -SOLUTION/EPOCHS
##
##
### # scan for keyword
## if key_outer[0] == key_block_start:
## # keyword found, start inner loop
## for s_inner in f:
## line = split(s_inner)
##
## if line[0][0] == comment:
## continue
## elif line[0] == key_block_end:
## break

# define key
key_block_start = +SOLUTION/ESTIMATE
key_block_end = -SOLUTION/ESTIMATE

# scan for keyword
if key_outer[0] == key_block_start:
# keyword found, start inner loop
for s_inner in f:
line = split(s_inner)
if line[0][0] == comment:
continue
elif line[0] == key_block_end:
break
if line[1] == STAX:
solution_estimate_block_x[ join([site_id_block[line[2]],line[4]]) ] = [float(line[8]),float(line[9])]

if line[1] == STAY:
solution_estimate_block_y[ join([site_id_block[line[2]],line[4]]) ] = [float(line[8]),float(line[9])]
if line[1] == STAZ:

```

```

solution_estimate_block_z[ join([site_id_block[line[2]],line[4]]) ] = [float(line[8]),float(line[9])]

if line[1] == VELX:
solution_estimate_block_vx[ join([site_id_block[line[2]],line[4]]) ] = [float(line[8]),float(line[9])]

if line[1] == VELY:
solution_estimate_block_vy[ join([site_id_block[line[2]],line[4]]) ] = [float(line[8]),float(line[9])]
if line[1] == VELZ:
solution_estimate_block_vz[ join([site_id_block[line[2]],line[4]]) ] = [float(line[8]),float(line[9])]

# close file
f.close()

# do the output
for key in solution_estimate_block_x.keys():
solution_estimate_block[key] = [solution_estimate_block_x[key][0], solution_estimate_block_y[key][0], solution_estimate_block_z[key][0], \
solution_estimate_block_x[key][1], solution_estimate_block_y[key][1], solution_estimate_block_z[key][1], \
solution_estimate_block_vx[key][0], solution_estimate_block_vy[key][0], solution_estimate_block_vz[key][0], \
\
solution_estimate_block_vx[key][1], solution_estimate_block_vy[key][1], solution_estimate_block_vz[key][1]
]

return solution_estimate_block

def poleTransEstSnx(solution_estimate_block):
“Estimate angular and translational rigid motion of the field using cartesian coordinates
and velocities extracted from sinex“
n = len(solution_estimate_block)
dmat = zeros( (n+n+n,3+3) )
obs = zeros( (n+n+n,1) )
c = zeros( (n+n+n,n+n+n) ) # covariance matrix
w = zeros( (n+n+n,n+n+n) ) # weight matrix
ci = zeros( (3,3) ) # covariance matrix for the i-site

i = 0
for key in solution_estimate_block.keys():

x = solution_estimate_block[key][0]
y = solution_estimate_block[key][1]
z = solution_estimate_block[key][2]
# compute design matrix

```

```

design = designMatrix(x, y, z)
# compute covariance matrix for the i-site
ci[0,0] = solution_estimate_block[key][9]
ci[1,1] = solution_estimate_block[key][10]
ci[2,2] = solution_estimate_block[key][11]

# observation vector
obs[i] = solution_estimate_block[key][6]
obs[i+1] = solution_estimate_block[key][7]
obs[i+2] = solution_estimate_block[key][8]
# fill design matrix (rotational motion)
dmat[i,:3] = design[0,:]
dmat[i+1,:3] = design[1,:]
dmat[i+2,:3] = design[2,:]
# fill design matrix (translational motion)
dmat[i,3] = 1.0
dmat[i+1,4] = 1.0
dmat[i+2,5] = 1.0
# fill covariance matrix
c[i:i+3,i:i+3] = ci

i = i + 3
# weight matrix is the inverse of the covariance matrix
w = inv(c)
# normalize weights
w = w/sum(diag(w))
# compute normal equations
hTh = dot(transpose(dmat), dot(w,dmat))
hTh_inv = inv(hTh)
# estimate omega
omega = dot( dot( hTh_inv, transpose(dmat) ), dot(w, obs) )
return omega

def poleEstSnx(solution_estimate_block):
    "Estimate angular rigid motion of the field using cartesian coordinates
    and velocities extracted from sinex"
    n = len(solution_estimate_block)
    dmat = zeros( (n+n+n,3) )
    obs = zeros( (n+n+n,1) )
    c = zeros( (n+n+n,n+n+n) ) # covariance matrix
    w = zeros( (n+n+n,n+n+n) ) # weight matrix
    ci = zeros( (3,3) ) # covariance matrix for the i-site

```

A.8. MODULO PER L'INT. DEL CAMPO E IL CALCOLO DEL T. DI DEF. 361

```

i = 0
for key in solution_estimate_block.keys():

    x = solution_estimate_block[key][0]
    y = solution_estimate_block[key][1]
    z = solution_estimate_block[key][2]
    # compute design matrix
    design = designMatrix(x, y, z)
    # compute covariance matrix for the i-site
    ci[0,0] = solution_estimate_block[key][9]
    ci[1,1] = solution_estimate_block[key][10]
    ci[2,2] = solution_estimate_block[key][11]

    # compute geodetic coordinates
    lon_d, lat_d, h = cart2geod(x,y,x)
    # convert to radianties
    lon_r = deg2rad(lon_d)
    lat_r = deg2rad(lat_d)

    # compute rotation matrix
    a = geo2topo(lon_r, lat_r)
    # rotate velocity vector into topocentric
    v = array([solution_estimate_block[key][6],solution_estimate_block[key][7],solution_estimate_block[key][8]])
    v_enu = dot(a,v)
    # constrain up component to zero
    v_enu[2] = 0.0
    # rotate constrained velocity vector into cartesian
    v_constrained = dot(transpose(a),v_enu)

    # define observation vector
    obs[i] = v_constrained[0]
    obs[i+1] = v_constrained[1]
    obs[i+2] = v_constrained[2]
    # fill design matrix (rotational motion)
    dmat[i,:3] = design[0,:]
    dmat[i+1,:3] = design[1,:]
    dmat[i+2,:3] = design[2,:]
    # fill covariance matrix
    c[i:i+3,i:i+3] = ci

    i = i + 3
    # weight matrix is the inverse of the covariance matrix
    w = inv(c)

```

```

# normalize weights
w = w/sum(diag(w))
# compute normal equations
hTh = dot(transpose(dmat), dot(w,dmat))
hTh_inv = inv(hTh)
# estimate omega
omega = dot( dot( hTh_inv, transpose(dmat) ), dot(w, obs) )
return omega
def projectField(cart_field):
    “Transform a field from cartesian to topocentric frame (vx, vy, vz -> east, north, up)“
    # to convert from m/yr to mm/yr
    scfact = 1000.0
    field_horiz = {}
    field_vert = {}

    v_cart = zeros(3)
    v_topo = zeros(3)
    c_cart = zeros( (3,3) )
    c_topo = zeros( (3,3) )
    a = zeros( (3,3) )
    for key in cart_field.keys():
        x = cart_field[key][0]
        y = cart_field[key][1]
        z = cart_field[key][2]

        v_cart[0] = cart_field[key][6]*scfact
        v_cart[1] = cart_field[key][7]*scfact
        v_cart[2] = cart_field[key][8]*scfact
        c_cart[0,0] = (cart_field[key][9]*scfact)**2
        c_cart[1,1] = (cart_field[key][10]*scfact)**2
        c_cart[2,2] = (cart_field[key][11]*scfact)**2
        # transform from cartesian to geodetic
        lon, lat, h = cart2geod(x, y, z)
        # rotation matrix (geocentric to topocentric)
        a = geo2topo(deg2rad(lon), deg2rad(lat))
        # rotate velocities from cartesian to topocentric frame (vx, vy, vz -> ve, vn, vu)
        v_topo = dot(a, v_cart)
        # rotate var-covar matrix from cartesian to topocentric frame (vx, vy, vz -> ve, vn, vu)
        c_topo = dot(a, dot(c_cart,transpose(a)))
        field_horiz[key] = [lon, lat, v_topo[0], v_topo[1], sqrt(c_topo[0,0]), sqrt(c_topo[1,1]), c_topo[0,1]]
        field_vert[key] = [lon, lat, 0.0, v_topo[2], 0.0, sqrt(c_topo[2,2]), 0.0]

    return field_horiz, field_vert

```

```

def rigidFieldPTsnx(cart_field, omega):
    "Compute field related to angular and translational rigid motion, using cartesian coordinates"
    rfield = {}
    v_cart = zeros( 3 )

    for key in cart_field.keys():
        # convert spherical coordinates into cartesian ones
        x = cart_field[key][0]
        y = cart_field[key][1]
        z = cart_field[key][2]

        # compute cross product matrix
        cross = designMatrix(x, y, z)
        # compute rigid motion
        v_cart = dot(cross, omega[0:3]) + omega[3:6]
        # build cartesian rigid motion field
        rfield[key] = [x, y, z, 0.0, 0.0, 0.0, float(v_cart[0]), float(v_cart[1]), float(v_cart[2]), 0.0, 0.0, 0.0]
    return rfield

def rigidFieldPsnx(cart_field, omega):
    "Compute field related to angular rigid motion, using cartesian coordinates"
    rfield = {}
    v_cart = zeros( 3 )

    for key in cart_field.keys():
        # convert spherical coordinates into cartesian ones
        x = cart_field[key][0]
        y = cart_field[key][1]
        z = cart_field[key][2]

        # compute cross product matrix
        cross = designMatrix(x, y, z)
        # compute rigid motion
        v_cart = dot(cross, omega)
        # build cartesian rigid motion field
        rfield[key] = [x, y, z, 0.0, 0.0, 0.0, float(v_cart[0]), float(v_cart[1]), float(v_cart[2]), 0.0, 0.0, 0.0]
    return rfield

def iterationPT(cart_field, tresh1, tresh2):
    " Estimate rigid field motion (rotation+translation) and find outliers, thresholds are in mm/yr"
    # estimate parameters
    omega = poleTransEstSnx(cart_field)
    # compute rigid motion
    rigid_field = rigidFieldPTsnx(cart_field, omega)

```

```

# convert field into topocentric frame
field_h, field_v = projectField(cart_field)
# convert rigid field into topocentric frame
rigid_field_h, rigid_field_v = projectField(rigid_field)
# subtract horizontal fields
res_field_h = diffFields(field_h, rigid_field_h)
# find outliers
outliers = findOutliers(res_field_h, tresh1, tresh2)
# remove outliers from the input cartesian field
cart_field_cleaned = rejectOutliers(cart_field, outliers)
return cart_field_cleaned, omega, outliers

def iterationP(cart_field, tresh1, tresh2):
    " Estimate rigid field motion (only rotation) and find outliers, thresholds are in mm/yr "
    # estimate parameters
    omega = poleEstSnx(cart_field)
    # compute rigid motion
    rigid_field = rigidFieldPsnx(cart_field, omega)
    # convert field into topocentric frame
    field_h, field_v = projectField(cart_field)
    # convert rigid field into topocentric frame
    rigid_field_h, rigid_field_v = projectField(rigid_field)
    # subtract horizontal fields
    res_field_h = diffFields(field_h, rigid_field_h)
    # find outliers
    outliers = findOutliers(res_field_h, tresh1, tresh2)
    # remove outliers from the input cartesian field
    cart_field_cleaned = rejectOutliers(cart_field, outliers)
    return cart_field_cleaned, omega, outliers

```

Appendice B

Process Control Files

B.1 PPP

```
# =====
# PPP.PCF
# =====
#
# Description:  Computes coordinates for a set of stations on the basis of
#              a precise-point-positioning (PPP) analysis. In fact, a
#              multitude of additional tasks is performed in the course of
#              this easy-to-use BPE process:
#              - computation of station coordinates (on the cm-accuracy
#                level), to get corresponding a priori information for
#                interferometric analysis (see RNX2SNX PCF),
#              - estimation of station-specific troposphere parameters,
#              - determination of phase-consistent receiver clock offsets
#                at 5-minute intervals (for time transfer),
#              - evaluation of the receiver tracking technology with
#                respect to each involved receiver (on the basis of
#                estimated P1-C1 DCB multipliers),
#              - extraction of TEC information (in the form of station-
#                specific models as well as a regional model),
#              - estimation of receiver P1-P2 DCB values,
#              - computation of a common translation vector related to
#                the PPP-based station coordinate results.
#              The following features make this PCF particularly well
#              suited as preparatory BPE processing step:
#              - (optional) computation of a priori velocities for new
#                points,
#              - (optional) detection of missing station entries in ocean
#                loading correction (BLQ) files,
#              - update of station name abbreviation (ABB) files,
#              - (optional) conversion of station coordinate results to a
#                predefined epoch,
#              - generation of a merged coordinate (CRD/VEL) file.
#              More details are provided below.
#
#              PPP BPE processing summary file name: PPPyyssss.PRC
#
# Comments   : (0) There is just one basic requirement: all processed
#              receiver and antenna names must be contained in
#              (a) the RECEIVER. file and
#              (b) the PHAS_IGS.REL file, respectively.
#
#              (1) V_STAINF (optional): If this PCF variable is blank, the
#              relevant station information is directly gathered from
#              the RINEX observation data (and thus remains
#              unverified). The current program setup allows station
#              names conform to 'xxxx yyyyyyyy' (or alternatively
#              'xxxx'). The 'APPROX POSITION XYZ' RINEX header record
#              is not really required for initialization.
#
#              (2) V_PLDINF (optional): To take into account a priori
#              (NNR-NUVEL1-A) velocities, a plate definition file has
#              to be prepared beforehand. The corresponding file name
#              may be specified using the V_PLDINF variable. In this
#              case, station coordinate results are generally referred
#              to epoch 2000.0.
```

```

#
# (3) V_BLQINF (optional): If a BLQ file name is specified,
# (station-specific) ocean loading corrections are
# applied. Missing station entries are reported in the
# processing summary file.
#
# (4) V_ABBINF (mandatory): New 4- and 2-character station
# name abbreviations will be added automatically to the
# ABB file specified by this PCF variable.
#
# (5) The diverse analysis products are output in the
# following data formats:
# - station coordinates in Bernese CRD and SINEX,
# - troposphere results in Bernese TRP and ZPD
#   values in tropospheric SINEX (TRO),
# - station clock information in clock RINEX,
# - ionosphere information in Bernese ION and IONEX,
# - P1-P2 DCB results in Bernese DCB,
# - station velocities in Bernese VEL format.
# In addition, coordinate and troposphere results are
# available in Bernese NEQ (NQO) format.
#
# (6) Ionosphere determination (IONDET PCF) is an integral
# part of the PPP PCF. Deactivation is possible by
# setting V_F blank.
# Note: Regional ionosphere maps are output in IONEX
# format. Please be aware that there are geographic range
# parameters in the controlling IONEX.PPP file which are
# specific to the station coverage.
#
# (7) PID 431 is reserved for demonstration purposes and
# therefore deactivated by default. Activation of this
# PID does not make sense until data of one or more
# fiducial stations is considered.
#
# (8) If the delete (DEL) script (see PID 902) is executed
# with a parameter set to 'ALL', result files referring
# to the current session get all removed (with the
# exception of some essential protocol files).
#
# Author      : M. Meindl, S. Schaer
# Created     : 23-Jul-2003                Last modified: 01-Mar-2004
#
# Changes    : 07-Mar-2004: Prepared for release V5.0
#
# =====
#
# PID SCRIPT  OPT_DIR  CAMPAIGN CPU      P WAIT FOR...
# 3** 8***** 8***** 8***** 8***** 1 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3**
#
# Copy required files
# -----
# 001 PPP_COP  PPP_GEN          ANY      1
#
# Prepare pole, orbit, and clock information
# -----
# 101 POLUPD  PPP_GEN          ANY      1 001
# 111 PRETAB  PPP_GEN          ANY      1 101
# 112 ORBGEN  PPP_GEN          ANY      1 111
# 121 CCRNXC  PPP_GEN          ANY      1 001
#
# Preprocess, convert, and synchronize observation data
# -----
# 201 RNXGRA  PPP_GEN          ANY      1 001
# 211 RNXSMTAP PPP_GEN          ANY      1 001
# 212 RNXSMT_P PPP_GEN          ANY      1 211
# 221 SMTBV3  PPP_GEN          ANY      1 212
# 222 CRDMERGE PPP_GEN          ANY      1 221
# 231 CODSPAP PPP_GEN          ANY      1 112 121 222
# 232 CODSP_P PPP_GEN          ANY      1 231
# 233 CODXTR  PPP_GEN          ANY      1 232
#
# Compute PPP solutions station by station (including data screening)
# -----
# 301 PPPEDTAP PPP_GEN          ANY      1 233
# 302 PPPEDT_P PPP_GEN          ANY      1 301
# 303 GPSXTR  PPP_GEN          ANY      1 302
# 311 PPPCHK  PPP_AUX          ANY      1 303
# 321 CRDMERGE PPP_AUX          ANY      1 311
# 322 ADDNEQ2 PPP_AUX          ANY      1 321
# 331 CCRNXC  PPP_AUX          ANY      1 311
#
# Take into account NNR-NUVEL1-A velocities (if desired)
# -----
# 401 PPP_PLD  PPP_GEN          ANY      1 321
# 402 NUVELO  PPP_GEN          ANY      1 401

```

```

403 COOVEL PPP_GEN ANY 1 402
411 CRDMERGE PPP_VEL ANY 1 403
421 CRDMERGE PPP_CRD ANY 1 411
431 ADDNEQ2 PPP_GCC ANY 1 322 421
#
# Generate ionosphere models and derive receiver DCB values (if desired)
# -----
501 PPP_ION PPP_ION ANY 1 321
502 PPPESTAP PPP_ION ANY 1 501
503 PPPEST_P PPP_ION ANY 1 502
504 GPSXTR PPP_ION ANY 1 503
511 ADDNEQ2 PPP_ION ANY 1 504
521 GPSEST PPP_RIM ANY 1 501
522 GPSXTR PPP_RIM ANY 1 521
#
# Create summary file and delete files
# -----
901 PPP_SUM PPP_GEN ANY 1 322 331 421 431 511 522
902 PPP_DEL PPP_GEN ANY 1 901
903 BPE_CLN PPP_GEN ANY 1 902
#
# End of BPE
# -----
999 DUMMY NO_OPT ANY 1 903
#
#
PID USER PASSWORD PARAM1 PARAM2 PARAM3 PARAM4 PARAM5 PARAM6 PARAM7 PARAM8 PARAM9
3** 12***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8*****
211 $211
212 PARALLEL $211
231 $231
232 PARALLEL $231
301 $301
302 PARALLEL $301
401 NEXTJOB 421
431 SKIP
501 NEXTJOB 901
502 $502
503 PARALLEL $502
#902 ALL
#
#
VARIABLE DESCRIPTION DEFAULT
8***** 40***** 16*****
V_A A priori information APR
V_B Orbit/ERP, DCB, CLK information IGS
V_C CRD/TRP/TRO/SNX and CLK results PPP
V_E CRD results referred to epoch 2000.0 REF
V_F Station-specific ION/DCB results ION
V_G Regional ION/INX/DCB results RIM
V_STAINF Station information file name EXAMPLE
V_PLDINF Tectonic plate definition file name EXAMPLE
V_BLQINF Ocean loading correction file name
V_ABBINF Station name abbreviation file name EXAMPLE
V_CRDREF Master/reference CRD/VEL file name IGS_00_R
V_CRDMRG Merged CRD/VEL file name IGS_00
#
# DO NOT USE V_D, V_J, V_M, V_Y VARIABLES!
#
#

```

B.2 RNX2SNX

```

# =====
# RNX2SNX.PCF
# =====
#
# Description: Computes station coordinates and troposphere parameters
# based on RINEX observation data from a regional GNSS
# network; generates corresponding normal equation (NEQ)
# information for later multi-session combination (and
# estimation of station velocities). Station coordinate as
# well as troposphere results are output in SINEX (SNX/TRO)
# format for (external) further processing, or combination.
#
# RNX2SNX BPE processing summary file name: R2Syyssss.PRC
#
# Comments : (0) To execute this PCF, the following three files are
# specifically required:
# (a) CRD file (IGS_00.CRD),
# (b) VEL file (IGS_00.VEL),
# (c) station name abbreviation file (EXAMPLE.ABB).
# The use of the PPP PCF to create these three files is

```

```

# explicitly foreseen. The main purpose of that
# preparatory BPE processing step is computation of
# approximate station coordinates for all new points of
# the GNSS network to be analyzed. That processing step
# includes creation of a complete CRD file.
#
# (1) Observation files with significant gaps or unexpectedly
# big residuals are automatically rejected.
#
# (2) Ambiguity fixing is attempted for baselines up to
# 2000 km length using the quasi-ionsphere-free (QIF)
# resolution strategy. Ambiguity resolution is performed
# exclusively for GPS observations.
#
# (3) The network solution finally computed is a minimum-
# constraint solution, realized by 3 no-net-translation
# conditions imposed on a given set of ITRF2000
# (concretely IGS00) reference coordinates. The
# coordinates of all involved fiducial stations are
# subsequently verified by means of a 3-parameter Helmert
# transformation (see PID 514). In case of discrepancies,
# the final network solution gets recomputed for
# consistent datum definition (based on a reduced set of
# fiducial stations).
# Note: Datum definition is considered successful as long
# as at least two reference stations are accepted. If you
# wish to rely just on one reference station, PID 514
# might be skipped.
#
# (4) SINEX (SNX) output file generation is restricted here
# to station coordinate results (since inclusion of
# tropospheric information in SNX files is uncommon).
# Note: Resulting SINEX data should allow for both
# reconstruction of the unconstrained, free network
# solution and for straightforward extraction of station
# coordinate values of the originally computed minimum-
# constraint solution.
#
# (5) Zenith path delay (ZPD) estimates, including horizontal
# gradient parameters, are exported through a Bernese TRP
# file; the tropospheric SINEX (TRO) file contains only
# ZPD values (in consequence of the TRO data format).
#
# (6) To prepare this PCF for operational use, R2S_COP and
# R2S_SAV must be adjusted. In principle, a script for
# data download (R2S_FTP) might be integrated. Activation
# of PID 513, a sliding 7-session comparison, would make
# sense for analysis of permanent network data.
#
# (7) If the delete (DEL) script (see PID 903) is executed
# with a parameter set to 'ALL', result files referring
# to the current session get all removed (with the
# exception of some essential protocol files).
#
#
# Author      : M. Meindl, S. Schaer
# Created     : 17-Oct-2003          Last modified: 23-Feb-2004
#
# Changes    : 23-Feb-2004: Prepared for release V5.0
#
# =====
#
# PID SCRIPT  OPT_DIR  CAMPAIGN CPU      P WAIT FOR...
# 3** 8***** 8***** 8***** 8***** 1 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3**
#
# Copy required files and create a priori CRD file
# -----
# 001 R2S_COP  R2S_GEN          ANY      1
# 002 COOVEL  R2S_GEN          ANY      1 001
#
# Prepare pole, orbit, and clock information
# -----
# 101 POLUPD  R2S_GEN          ANY      1 001
# 111 PRETAB  R2S_GEN          ANY      1 101
# 112 ORBGEN  R2S_GEN          ANY      1 111
#
# Convert and synchronize observation data
# -----
# 201 RNXGRA  R2S_GEN          ANY      1 001
# 211 RXOBV3AP R2S_GEN          ANY      1 201
# 212 RXOBV3_P R2S_GEN          ANY      1 211
# 221 CODSPFAP R2S_GEN          ANY      1 002 112 212
# 222 CODSPF_P R2S_GEN          ANY      1 221
# 223 CODXTR  R2S_GEN          ANY      1 222
#
# Form baselines, preprocess and screen phase data, save cluster NEQ files

```

```

# -----
301 SNGDIF R2S_GEN ANY 1 223
311 MAUPRPAP R2S_GEN ANY 1 301
312 MAUPRP_P R2S_GEN ANY 1 311
313 MPRXTR R2S_GEN ANY 1 312
321 GPSED_TAP R2S_GEN ANY 1 313
322 GPSED_T_P R2S_EDT ANY 1 321
331 GPSCHK R2S_GEN ANY 1 322
#
# Compute ambiguity-float network solution, resolve phase ambiguities
# -----
401 ADDNEQ2 R2S_GEN ANY 1 331
402 GPSXTR R2S_GEN ANY 1 401
411 GPSQIFAP R2S_QIF ANY 1 402
412 GPSQIF_P R2S_QIF ANY 1 411
413 GPSXTR R2S_QIF ANY 1 412
#
# Compute ambiguity-fixed network solution, create final NEQ/SNX/TRO files
# -----
501 GPSEST R2S_FIN ANY 1 413
511 ADDNEQ2 R2S_FIN ANY 1 501
512 GPSXTR R2S_FIN ANY 1 511
513 COMPAR R2S_FIN ANY 1 512
514 HELMR1 R2S_FIN ANY 1 513
521 ADDNEQ2 R2S_RED ANY 1 514
522 GPSXTR R2S_RED ANY 1 521
#
# Create summary file, save results, and delete files
# -----
901 R2S_SUM R2S_GEN ANY 1 522
902 R2S_SAV R2S_GEN ANY 1 901
903 R2S_DEL R2S_GEN ANY 1 902
904 BPE_CLN R2S_GEN ANY 1 903
#
# End of BPE
# -----
999 DUMMY NO_OPT ANY 1 904
#
#
PID USER PASSWORD PARAM1 PARAM2 PARAM3 PARAM4 PARAM5 PARAM6 PARAM7 PARAM8 PARAM9
3** 12***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8***** 8*****
211 $211
212 PARALLEL $211
221 $221
222 PARALLEL $221
311 $311
312 PARALLEL $311
321 $321
322 PARALLEL $321
331 NEXTJOB 301
411 $411
412 PARALLEL $411
513 SKIP
514 NEXTJOB 511
902 SKIP
#903 ALL
#
#
VARIABLE DESCRIPTION DEFAULT
8***** 40***** 16*****
V_A A priori information APR
V_B Orbit/ERP, DCB, ION information IGS
V_C Preliminary (ambiguity-float) results P1_
V_E Final (ambiguity-fixed) results F1_
V_F Size-reduced NEQ information R1_
V_MINUS Session range begin (for COMPAR) -6
V_PLUS Session range end +0
V_CLU Maximum number of files per cluster 3
#
# DO NOT USE V_D, V_J, V_M, V_Y VARIABLES!
#
#

```


Appendice C

Elenco delle discontinuità e degli outliers

E2 .sta file

08-OCT-06 13:45

 TYPE 001: RENAMING OF STATIONS

STATION NAME	FLG	FROM	TO	OLD STATION NAME	REMARK
*****	***	YYYY MM DD HH MM SS	YYYY MM DD HH MM SS	*****	*****
ANKR 20805M002A	001	1992 01 01 00 00 00	1999 08 16 23 59 59	ANKR 20805M002_OK	AN_??
ANKR 20805M002B	001	1999 08 17 00 00 00		ANKR 20805M002_OK	AN_??
BOGO 12207M002	001	1992 01 01 00 00 00		BOGO -----	BAD DOMES CODE
BOR1 12205M002A	001	1992 01 01 00 00 00	1999 05 30 23 59 30	BOR1 12205M002	AN_OK
BOR1 12205M002B	001	1999 05 31 00 00 00		BOR1 12205M002	AN_OK
BRUS 13101M004A	001	1997 04 06 00 00 00	2000 04 26 23 59 30	BRUS 13101M004_OK	AN_OK
BRUS 13101M004B	001	2000 04 27 00 00 00		BRUS 13101M004_OK	AN_OK
BZRG 12751M001A	001	1992 01 01 00 00 00	2000 11 28 23 59 59	BZRG 12751M001_OK	AN_??
BZRG 12751M001B	001	2000 11 29 00 00 00		BZRG 12751M001_OK	AN_??
CEUT 13449M001A	001	1992 01 01 00 00 00	2005 01 15 23 59 59	CEUT 13449M001	AN_??
CEUT 13449M001B	001	2005 01 16 00 00 00		CEUT 13449M001	AN_??
CREU 13432M001A	001	1992 01 01 00 00 00	2001 04 07 23 59 59	CREU 13432M001_OK	AN_??
CREU 13432M001B	001	2001 04 08 00 00 00	2003 08 02 23 59 59	CREU 13432M001_OK	AN_??
CREU 13432M001C	001	2003 08 03 00 00 00		CREU 13432M001_OK	AN_??
DRES 14108M001A	001	1990 01 01 00 00 00	2003 01 18 23 59 59	DRES 14108M001_OK	AN_??
DRES 14108M001B	001	2003 01 19 00 00 00		DRES 14108M001_OK	AN_??
DOUR 13113M001A	001	1990 01 01 00 00 00	2001 10 06 23 59 59	DOUR 13113M001_OK	AN_??
DOUR 13113M001B	001	2001 10 07 00 00 00		DOUR 13113M001_OK	AN_??
EUSK 14258M003A	001	1992 01 01 00 00 00	2001 05 05 23:59:59	EUSK 14258M003_OK	AN_??
EUSK 14258M003B	001	2001 05 06 00 00 00		EUSK 14258M003_OK	AN_??
GRAS 10002M006A	001	1992 01 01 00 00 00	2004 10 20 23 59 30	GRAS 10002M006_OK	AN_OK_?????
GRAS 10002M006B	001	2004 10 21 00 00 00		GRAS 10002M006_OK	AN_OK_?????
GRAZ 11001M002A	001	1997 04 06 00 00 00	2001 05 31 23 59 30	GRAZ 11001M002_OK	AN_OK
GRAZ 11001M002B	001	2001 06 01 00 00 00	2005 03 19 23 59 30	GRAZ 11001M002_OK	AN_OK
GRAZ 11001M002C	001	2005 03 20 00 00 00	2005 10 29 23 59 30	GRAZ 11001M002_OK	AN_OK
GRAZ 11001M002D	001	2005 10 30 00 00 00		GRAZ 11001M002_OK	AN_OK
HOFN 10204M002A	001	1997 09 28 00 00 00	2001 09 20 23 59 30	HOFN 10204M002_OK	AN_OK
HOFN 10204M002B	001	2001 09 21 00 00 00		HOFN 10204M002_OK	AN_OK
JOZE 12204M001	001	1997 04 06 00 00 00		JOZE*	EO.SNX
KARL 14216M001A	001	1992 01 01 00 00 00	2001 05 05 23 59 30	KARL 14216M001_OK	AN_??
KARL 14216M001B	001	2001 05 06 00 00 00	2002 07 06 23 59 30	KARL 14216M001_OK	AN_??
KARL 14216M001C	001	2002 07 07 00 00 00		KARL 14216M001_OK	AN_??
KELY 43005M001A	001	1997 04 06 00 00 00	2001 09 13 23 59 30	KELY 43005M001_OK	AN_OK
KELY 43005M001B	001	2001 09 14 00 00 00		KELY 43005M001_OK	AN_OK
KIRO 10422M001	001	1992 01 01 00 00 00		KIRO -----	BAD DOMES CODE
KLOP 14214M002A	001	1990 01 01 00 00 00	2001 05 05 23 59 59	KLOP 14214M002_OK	AN_??
KLOP 14214M002B	001	2001 05 06 00 00 00	2002 06 29 23 59 59	KLOP 14214M002_OK	AN_??
KLOP 14214M002C	001	2002 06 30 00 00 00		KLOP 14214M002_OK	AN_??
KOSG 13504M003A	001	1997 04 06 00 00 00	2003 04 19 23 59 30	KOSG 13504M003_OK	AN_OK
KOSG 13504M003B	001	2003 04 20 00 00 00		KOSG 13504M003_OK	AN_OK
JOEN 10512M001	001	1992 01 01 00 00 00		JOEN -----	BAD DOMES CODE
LAMA 12209M001A	001	1997 04 06 00 00 00	2000 10 05 23 59 30	LAMA 12209M001_OK	AN_OK
LAMA 12209M001B	001	2000 10 06 00 00 00		LAMA 12209M001_OK	AN_OK
MALL 13444M001A	001	1992 01 01 00 00 00	2003 08 09 23 59 59	MALL 13444M001_OK	AN_??
MALL 13444M001B	001	2003 08 10 00 00 00		MALL 13444M001_OK	AN_??
MATE 12734M008A	001	1992 01 01 00 00 00	1999 06 14 23 59 59	MATE 12734M008	AN_??
MATE 12734M008B	001	1999 06 15 00 00 00		MATE 12734M008	AN_??
MAR6 10405M002	001	1992 01 01 00 00 00	2020 01 01 00 00 00	MAR6 -----	BAD DOMES CODE
METS 10503S011	001	1997 04 06 00 00 00		METS*	EO.SNX
MOPI 11507M001	001	1992 01 01 00 00 00	2020 01 01 00 00 00	MOPI -----	BAD DOMES CODE
NICO 14302M001A	001	1997 06 22 00 00 00	1999 08 20 23 59 30	NICO 14302M001_OK	AN_??

372 APPENDICE C. ELENCO DELLE DISCONTINUITÀ E DEGLI OUTLIERS

NICO	14302M001B	001	1999	08	21	00	00	00					NICO	14302M001_OK	AN_??		
NPLD	13234M003A	001	1992	01	01	00	00	00	2004	08	21	23	59	30	NPLD	13234M003_OK	AN_??
NPLD	13234M003B	001	2004	08	22	00	00	00							NPLD	13234M003_OK	AN_??
ONSA	10402M004A	001	1997	04	06	00	00	00	1999	02	02	23	59	30	ONSA	10402M004_OK	AN_OK
ONSA	10402M004B	001	1999	02	02	00	00	00							ONSA	10402M004_OK	AN_OK
OSLO	10307M001	001	1992	01	01	00	00	00	2020	01	01	00	00	00	OSLO	-----	BAD DOMES CODE
PENC	11206M006A	001	1992	01	01	00	00	00	2003	05	21	23	59	30	PENC	11206M006_OK	AN_??
PENC	11206M006B	001	2003	05	22	00	00	00							PENC	11206M006_OK	AN_??
PFAN	11005S002A	001	1992	01	01	00	00	00	1999	10	30	23	59	30	PFAN	11005S002_OK	AN_??
PFAN	11005S002B	001	1999	10	31	00	00	00	2001	03	11	23	59	30	PFAN	11005S002_OK	AN_??
PFAN	11005S002C	001	2001	03	11	00	00	00							PFAN	11005S002_OK	AN_??
POTS	14106M003	001	1997	04	06	00	00	00							POTS*	-----	EO.SNX
RAMO	20703S001A	001	1992	01	01	00	00	00	2000	07	16	23	59	30	RAMO	20703S001_OK	AN_??
RAMO	20703S001B	001	2000	07	17	00	00	00	2004	03	16	23	59	30	RAMO	20703S001_OK	AN_??
RAMO	20703S001C	001	2004	03	17	00	00	00							RAMO	20703S001_OK	AN_??
REYK	10202M001A	001	1992	01	01	00	00	00	2000	07	15	23	59	30	REYK	10202M001_OK	AN_??
REYK	10202M001B	001	2000	07	16	00	00	00	2003	06	12	23	59	30	REYK	10202M001_OK	AN_??
REYK	10202M001C	001	2003	06	13	00	00	00							REYK	10202M001_OK	AN_??
RIGA	12302M002	001	1992	01	01	00	00	00							RIGA	-----	BAD DOMES CODE
RIGA	12302M002A	001	1992	01	01	00	00	00	2004	12	25	23	59	59	RIGA	12302M002_OK	AN_??
RIGA	12302M002B	001	2004	12	26	00	00	00							RIGA	12302M002_OK	AN_??
SFER	13402M004A	001	1997	04	06	00	00	00	2002	09	20	23	59	59	SFER	13402M004_OK	AN_??
SFER	13402M004B	001	2002	09	21	00	00	00	2003	06	07	23	59	59	SFER	13402M004_OK	AN_??
SFER	13402M004C	001	2003	06	08	00	00	00							SFER	13402M004_OK	AN_??
SODA	10513M001	001	1992	01	01	00	00	00							SODA	-----	BAD DOMES CODE
STAV	10330M001	001	1992	01	01	00	00	00							STAV	-----	BAD DOMES CODE
SVTL	12350M001	001	1992	01	01	00	00	00							SVTL	-----	BAD DOMES CODE
SVTL	12350M001A	001	1992	01	01	00	00	00	2004	11	27	23	59	59	SVTL	12350M001_OK	AN_??
SVTL	12350M001B	001	2004	11	28	00	00	00							SVTL	12350M001_OK	AN_??
TRO1	10302M006A	001	1997	04	06	00	00	00	2000	06	18	23	59	59	TRO1	10302M006_OK	AN_??
TRO1	10302M006B	001	2000	06	19	00	00	00	2004	07	12	23	59	59	TRO1	10302M006_OK	AN_??
TRO1	10302M006C	001	2004	07	13	00	00	00							TRO1	10302M006_OK	AN_??
TRON	10331M001	001	1992	01	01	00	00	00							TRON	-----	BAD DOMES CODE
UNPG	12752M001A	001	1992	01	01	00	00	00	2002	05	18	23	59	59	UNPG	12752M001_OK	AN_??
UNPG	12752M001B	001	2002	05	19	00	00	00	2006	04	22	23	59	59	UNPG	12752M001_OK	AN_??
UNPG	12752M001C	001	2006	04	23	00	00	00							UNPG	12752M001_OK	AN_??
VARD	10322M002	001	1992	01	01	00	00	00							VARD	-----	BAD DOMES CODE
VAAS	10511M001	001	1992	01	01	00	00	00							VAAS	-----	BAD DOMES CODE
VEVE	12741M001	001	1992	01	01	00	00	00							VEVE	-----	BAD DOMES CODE
VEVE	12741M001	001	1992	01	01	00	00	00							VEVE	-----	BAD DOMES CODE
VEVE	12741M001	001	1992	01	01	00	00	00							VEVE	-----B	BAD DOMES CODE
VEVE	12741M001	001	1992	01	01	00	00	00							VEVE	-----M---B	BAD DOMES CODE
VEVE	12741M001A	001	1992	01	01	00	00	00	2005	10	22	23	59	59	VEVE	12741M001_OK	AN_??
VEVE	12741M001B	001	2005	10	23	00	00	00							VEVE	12741M001_OK	AN_??
VILL	13406M001	001	1997	04	06	00	00	00							VILL*	-----	EO.SNX
VILO	10424M001	001	1992	01	01	00	00	00							VILO	-----	BAD DOMES CODE
VISO	10423M001	001	1992	01	01	00	00	00							VISO	-----	BAD DOMES CODE
WARE	13114M001A	001	1992	01	01	00	00	00	1998	01	10	23	59	59	WARE	13114M001	AN_??
WARE	13114M001B	001	1998	01	11	00	00	00	2003	01	18	23	59	59	WARE	13114M001	AN_??
WARE	13114M001C	001	2003	01	19	00	00	00							WARE	13114M001	AN_??
WROC	12217M001	001	1992	01	01	00	00	00							WROC	-----	BAD DOMES CODE
WROC	12217M001	001	1992	01	01	00	00	00							WROC	000000000	BAD DOMES CODE
WROC	12217M001	001	1992	01	01	00	00	00							WROC	-----B	BAD DOMES CODE
WSRT	13506M005	001	1997	08	17	00	00	00							WSRT*	-----	EO.SNX
WTZR	14201M010	001	1997	04	06	00	00	00							WTZR*	-----	EO.SNX
ZIMM	14001M004A	001	1997	04	06	00	00	00	1998	11	05	23	59	30	ZIMM	14001M004_OK	AN_OK
ZIMM	14001M004B	001	1998	11	06	00	00	00							ZIMM	14001M004_OK	AN_OK

TYPE 002: STATION INFORMATION

STATION NAME	FLG	FROM	TO	NORTH	EAST	UP
*****	***	YYYY MM DD HH MM SS	YYYY MM DD HH MM SS	***.***	***.***	***.***
ANKR	020805M002	001 1992 01 01 00 00 00	1999 08 16 23 59 59	0.0006	0.0040	0.0443
ANKR	020805M002	001 1999 08 17 00 00 00		0.0091	-0.0080	0.0590
BLEI	00000S002	001 1990 01 01 00 00 00	2010 12 31 23 59 59	999.9999	999.9999	0.1240
BOGO	12207M002C	001 1990 01 01 00 00 00	2001 08 17 23 59 59	-0.0025	-0.0011	0.0103
BOR1	12205M002	001 1997 04 06 00 00 00	1999 05 30 23 59 30	-0.0006	0.0015	0.0621
BOR1	12205M002	001 1999 05 31 00 00 00		0.0004	0.0050	0.0643
BRUS	13101M004	001 1997 04 06 00 00 00	2000 04 26 23 59 30	-0.0027	0.0005	3.9685
BRUS	13101M004	001 2000 04 27 00 00 00		-0.0057	0.0012	3.9717
BZRG	12751M001	001 1990 01 01 00 00 00	2000 11 28 23 59 59	0.0039	0.0042	0.2179
BZRG	12751M001	001 1990 01 01 00 00 00		0.0036	0.0043	0.2179
DOUR	13113M001	001 1990 01 01 00 00 00	2001 10 06 23 59 59	-0.0012	0.0006	0.7551
DOUR	13113M001	001 2001 10 07 00 00 00		0.0003	0.0038	0.7554
CAME	12754M001	001 1990 01 01 00 00 00	2003 12 14 23 59 59	-0.0003	-0.0025	-0.0102
CEUT	13449M001A	001 1992 01 01 00 00 00	2005 01 15 23 59 59	0.0000	0.0000	0.0000
CEUT	13449M001B	001 2005 01 16 00 00 00		0.0079	-0.0017	-0.0068
CREU	13432M001	001 1992 01 01 00 00 00	2001 04 07 23 59 59	0.0146	-0.0118	0.0768
CREU	13432M001	001 2001 04 08 00 00 00	2003 08 02 23 59 59	0.0160	-0.0180	0.0717
CREU	13432M001	001 2003 08 03 00 00 00		-0.0026	-0.0216	0.0443
EUSK	14258M003	001 1992 01 01 00 00 00	2001 05 05 23 59:59	0.0003	0.0012	0.0465
EUSK	14258M003	001 2001 05 06 00 00 00		-0.0011	0.0023	0.0797
DRES	14108M001	001 1990 01 01 00 00 00	2003 01 18 23 59 59	-0.1348	-0.1743	0.5547
DRES	14108M001	001 2003 01 19 00 00 00		-0.1305	-0.1774	0.5827
GOPE	11502M002	001 1990 01 01 00 00 00	2001 12 30 23 59 59	-0.0004	0.0004	-0.0084
GOPE	11502M002	001 2001 12 31 00 00 00	2002 12 30 23 59 59	-0.0004	0.0004	-0.0130
GRAS	10002M006	001 1997 04 06 00 00 00	2004 10 20 23 59 30	-0.0052	-0.0009	0.0267

374 APPENDICE C. ELENCO DELLE DISCONTINUITÀ E DEGLI OUTLIERS

TYPE 003: HANDLING OF STATION PROBLEMS

STATION NAME	FLG	FROM						TO						REMARK
*****	***	YYYY	MM	DD	HH	MM	SS	YYYY	MM	DD	HH	MM	SS	*****
GRAS 10002M006B	001	1992	01	01	00	00	00							WRONG OFFSET
KELY 43005M002B	001	1992	01	01	00	00	00							WRONG OFFSET
KIRU 10403M002B	001	1992	01	01	00	00	00							WRONG OFFSET
MATE 12734M008A	001	1996	06	30	00	00	00	1996	07	06	23	59	29	WRONG ANTENNA HEIGHT
AMMN 22201M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
CAME 12754M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
HOER 14284M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
MADR 13407S012	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
MADR 13407S012B	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
MASP 31303M002	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
MDVO 12309M002	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
NYAL 10317M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
NYAL 10317M003	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
NOTO 12717M003	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
OBER 14208M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
OBET 14208M004	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
OSLO 10307M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
PLYM 13229S001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
PULA 11903S001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
SNEC 11519M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
STAV 10330M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
TARS 12773S001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
TOUL 10003M004	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
TROM 10302M003	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
TROM 10302M006	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
TRON 10331M001	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
UPAD 12750M002	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
VARO 10322M002	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
WETT 14201M009	001	1992	01	01	00	00	00							DISMISSED
AUT1 12619M002	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
AUTN 10080M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
AUT1 12619M002	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
BACA 11405M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
BADH 14288M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
BATA 11406M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
BISK 11520M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
BOLG 12771M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
BSCN 10028M007	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
BUTE 11209M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
COBA 13453M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
COST 11407M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
DEVA 11408M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
EGLT 10032M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
ENTZ 10014M002	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
EVPA 12344M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
FATA 12773M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
GUIP 10004M501	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
HOE2 14284M002	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
IGD1 12605M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
KELY 43005M002	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
LILL 10051M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
MALA 13443M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
MARJ 11517M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
MILO 12758M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
NOA1 12620M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
POUS 11518M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
PUYV 10065M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
RIOJ 13448M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
ROVE 12774M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
SNEC 11519M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
TRFB 11047M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
TUC2 12617M003	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
VACO 11516M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
VFCH 10046M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
VIGO 13450M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
ZARA 13462M001	001	1992	01	01	00	00	00							TOO FEW DATA
ACOR 13434M001	001	1999	09	29	00	00	00	2000	01	05	23	59	59	EPN_KENYERES
ACOR 13434M001	001	2002	07	31	00	00	00	2004	01	28	23	59	59	EPN_KENYERES
AJAC 10077M005	001	2001	08	01	00	00	00	2001	08	29	23	59	59	EPN_KENYERES
ALAC 13433M001	001	2004	10	13	00	00	00	2004	10	13	23	59	59	EPN_KENYERES
ALME 13437M001	001	2001	02	21	00	00	00	2001	02	28	23	59	59	EPN_KENYERES
ALME 13437M001	001	2001	05	30	00	00	00	2001	07	04	23	59	59	EPN_KENYERES
ALME 13437M001	001	2001	10	17	00	00	00	2001	10	17	23	59	59	EPN_KENYERES
ANKR 20805M002	001	1996	08	07	00	00	00	1996	08	07	23	59	59	EPN_KENYERES
ANKR 20805M002	001	1998	11	25	00	00	00	1998	11	25	23	59	59	EPN_KENYERES
ANKR 20805M002	001	1999	08	18	00	00	00	1999	12	15	23	59	59	EPN_KENYERES
ANKR 20805M002	001	2000	03	22	00	00	00	2000	03	22	23	59	59	EPN_KENYERES
ANKR 20805M002	001	2004	04	14	00	00	00	2004	07	28	23	59	59	EPN_KENYERES
BOGO 12207M002	001	1996	07	03	00	00	00	1997	03	26	23	59	59	EPN_KENYERES
BOGO 12207M002	001	2001	07	18	00	00	00	2001	08	01	23	59	59	EPN_KENYERES
BOR1 12205M002	001	1998	02	04	00	00	00	1998	02	11	23	59	59	EPN_KENYERES
BOR1 12205M002	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	EPN_KENYERES
BORK 14268M001	001	2003	04	12	00	00	00	2003	06	25	23	59	59	EPN_KENYERES
BRUS 13101M004	001	2000	04	26	00	00	00	2000	04	26	23	59	59	EPN_KENYERES

BUCU	11401M001	001	1999	03	24	00	00	00	1999	08	04	23	59	59	EPN_KENYERES
BZRG	12751M001	001	2001	07	18	00	00	00	2002	07	03	23	59	59	EPN_KENYERES
CASC	13909S001	001	1998	11	11	00	00	00	1999	10	20	23	59	59	EPN_KENYERES
CEUT	13449M001	001	2001	12	19	00	00	00	2002	05	08	23	59	59	EPN_KENYERES
CEUT	13449M001	001	2005	01	19	00	00	00	2005	03	02	23	59	59	EPN_KENYERES
CREU	13432M001	001	1999	02	10	00	00	00	1999	06	30	23	59	59	EPN_KENYERES
CREU	13432M001	001	2002	12	18	00	00	00	2003	07	30	23	59	59	EPN_KENYERES
DENT	13112M001	001	1996	07	03	00	00	00	1997	05	28	23	59	59	EPN_KENYERES
DOUR	13113M001	001	1996	07	03	00	00	00	1996	12	18	23	59	59	EPN_KENYERES
DOUR	13113M001	001	2001	05	02	00	00	00	2001	10	03	23	59	59	EPN_KENYERES
DRAG	20710S001	001	2001	10	24	00	00	00	2001	10	24	23	59	59	EPN_KENYERES
DRAG	20710S001	001	2002	04	03	00	00	00	2002	05	01	23	59	59	EPN_KENYERES
DRAG	20710S001	001	2002	09	25	00	00	00	2002	09	25	23	59	59	EPN_KENYERES
DRAG	20710S001	001	2002	11	27	00	00	00	2002	11	27	23	59	59	EPN_KENYERES
DRAG	20710S001	001	2003	01	01	00	00	00	2003	01	01	23	59	59	EPN_KENYERES
DRAG	20710S001	001	2003	03	19	00	00	00	2003	03	19	23	59	59	EPN_KENYERES
DRAG	20710S001	001	2003	05	07	00	00	00	2003	05	14	23	59	59	EPN_KENYERES
DRES	14108M001	001	2003	01	22	00	00	00	2003	01	22	23	59	59	EPN_KENYERES
EIJS	13533M001	001	1999	06	30	00	00	00	2000	05	03	23	59	59	EPN_KENYERES
ELBA	12721M002	001	2004	11	03	00	00	00	2004	11	03	23	59	59	EPN_KENYERES
ESCO	13435M001	001	2003	05	07	00	00	00	2003	05	07	23	59	59	EPN_KENYERES
GATA	13902M001	001	2002	10	16	00	00	00	2002	10	16	23	59	59	EPN_KENYERES
GATA	13902M001	001	2003	01	01	00	00	00	2003	01	01	23	59	59	EPN_KENYERES
GLSV	12356M001	001	2005	01	26	00	00	00	2005	03	09	23	59	59	EPN_KENYERES
GOPE	11502M002	001	1999	11	10	00	00	00	2001	12	26	23	59	59	EPN_KENYERES
GRAZ	11001M002N	001	1996	07	03	00	00	00	1996	08	28	23	59	59	EPN_KENYERES
GRAZ	11001M002N	001	1996	12	25	00	00	00	1997	01	15	23	59	59	EPN_KENYERES
GRAZ	11001M002N	001	2001	05	09	00	00	00	2001	05	23	23	59	59	EPN_KENYERES
GRAZ	11001M002N	001	2005	02	09	00	00	00	2005	02	09	23	59	59	EPN_KENYERES
GSR1	14501M001	001	2001	03	07	00	00	00	2001	12	26	23	59	59	EPN_KENYERES
GSR1	14501M001	001	2002	05	29	00	00	00	2002	05	29	23	59	59	EPN_KENYERES
HERS	13212M007	001	1996	07	03	00	00	00	1996	11	06	23	59	59	EPN_KENYERES
HERS	13212M007	001	1999	04	28	00	00	00	2001	06	06	23	59	59	EPN_KENYERES
HFLK	11006S003	001	2002	10	23	00	00	00	2003	02	12	23	59	59	EPN_KENYERES
HFLK	11006S003	001	2003	10	22	00	00	00	2003	12	03	23	59	59	EPN_KENYERES
HOBU	14202M003	001	2002	06	05	00	00	00	2002	06	19	23	59	59	EPN_KENYERES
JOEN	10512M001	001	1996	11	13	00	00	00	1997	09	03	23	59	59	EPN_KENYERES
JOEN	10512M001	001	2002	12	11	00	00	00	2003	01	15	23	59	59	EPN_KENYERES
JOZE	12204M001	001	2006	01	11	00	00	00	2006	02	01	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRO	10422M001	001	1996	11	13	00	00	00	1997	04	23	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	1998	01	28	00	00	00	1998	02	25	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	1998	03	18	00	00	00	1998	03	18	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	1999	11	24	00	00	00	2000	01	26	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	2000	03	01	00	00	00	2000	03	15	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	2000	12	06	00	00	00	2001	01	10	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	2001	02	14	00	00	00	2001	03	28	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	2001	11	21	00	00	00	2001	12	05	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	2002	02	13	00	00	00	2002	03	13	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	2004	01	14	00	00	00	2004	02	11	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	2004	12	29	00	00	00	2005	02	23	23	59	59	EPN_KENYERES
KIRU	10403M002	001	2005	12	14	00	00	00	2006	01	11	23	59	59	EPN_KENYERES
KOSG	13504M003N	001	1996	07	03	00	00	00	1996	10	30	23	59	59	EPN_KENYERES
KOSG	13504M003N	001	2003	03	19	00	00	00	2003	04	16	23	59	59	EPN_KENYERES
LAGO	13903M001	001	2003	03	19	00	00	00	2003	03	19	23	59	59	EPN_KENYERES
LAMA	12209M001	001	2000	03	15	00	00	00	2000	10	04	23	59	59	EPN_KENYERES
LAMA	12209M001	001	2001	01	03	00	00	00	2001	01	03	23	59	59	EPN_KENYERES
LAMA	12209M001	001	2006	01	25	00	00	00	2006	02	08	23	59	59	EPN_KENYERES
LAMP	12706M002	001	2005	03	09	00	00	00	2005	03	09	23	59	59	EPN_KENYERES
LLIV	13436M001	001	2001	04	18	00	00	00	2001	04	18	23	59	59	EPN_KENYERES
LLIV	13436M001	001	2004	09	29	00	00	00	2004	09	29	23	59	59	EPN_KENYERES
MALL	13444M001	001	1999	05	05	00	00	00	1999	05	05	23	59	59	EPN_KENYERES
MARS	10073M008	001	1999	05	05	00	00	00	1999	05	05	23	59	59	EPN_KENYERES
MEDI	12711M003	001	1998	11	25	00	00	00	1998	12	09	23	59	59	EPN_KENYERES
MEDI	12711M003	001	2002	11	20	00	00	00	2003	01	08	23	59	59	EPN_KENYERES
METS	10503S011	001	1998	11	04	00	00	00	1998	11	18	23	59	59	EPN_KENYERES
MLVL	10092M001	001	2000	10	25	00	00	00	2000	11	15	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	1996	11	27	00	00	00	1998	05	13	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	1998	12	09	00	00	00	1998	12	09	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	1998	12	23	00	00	00	1998	12	23	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	1999	10	13	00	00	00	1999	10	20	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	2000	01	19	00	00	00	2000	01	26	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	2002	12	25	00	00	00	2002	12	25	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	2003	11	26	00	00	00	2003	12	03	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	2003	12	31	00	00	00	2003	12	31	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	2004	01	07	00	00	00	2004	01	07	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	2004	01	28	00	00	00	2004	01	28	23	59	59	EPN_KENYERES
MOPI	11507M001	001	2004	03	03	00	00	00	2004	03	03	23	59	59	EPN_KENYERES
MORP	13299S001	001	2004	10	27	00	00	00	2004	10	27	23	59	59	EPN_KENYERES
MORP	13299S001	001	2005	10	12	00	00	00	2005	11	30	23	59	59	EPN_KENYERES
MORP	13299S001	001	2006	01	04	00	00	00	2006	03	29	23	59	59	EPN_KENYERES
NSSP	12312M001	001	2001	05	23	00	00	00	2001	05	23	23	59	59	EPN_KENYERES
NSSP	12312M001	001	2002	01	16	00	00	00	2002	01	30	23	59	59	EPN_KENYERES
NSSP	12312M001	001	2003	02	12	00	00	00	2003	02	12	23	59	59	EPN_KENYERES
NYA1	10317M003	001	1998	12	30	00	00	00	1998	12	30	23	59	59	EPN_KENYERES
NYA1	10317M003	001	2004	01	14	00	00	00	2004	01	14	23	59	59	EPN_KENYERES
NYIR	11208M001	001	2003	02	12	00	00	00	2003	02	12	23	59	59	EPN_KENYERES
NYIR	11208M001	001	2005	01	19	00	00	00	2005	02	09	23	59	59	EPN_KENYERES
OBE2	14208M003	001	2001	09	12	00	00	00	2001	10	24	23	59	59	EPN_KENYERES
ORID	15601M001	001	2003	12	31	00	00	00	2003	12	31	23	59	59	EPN_KENYERES

376 APPENDICE C. ELENCO DELLE DISCONTINUITÀ E DEGLI OUTLIERS

ORID	15601M001	001	2004	03	03	00	00	00	2004	03	03	23	59	59	EPN_KENYERES
ORID	15601M001	001	2004	10	20	00	00	00	2004	10	20	23	59	59	EPN_KENYERES
OROS	11207M001	001	2001	12	19	00	00	00	2002	04	10	23	59	59	EPN_KENYERES
OSLS	10307M001	001	2001	01	03	00	00	00	2001	01	24	23	59	59	EPN_KENYERES
OSLS	10307M001	001	2002	12	18	00	00	00	2003	01	15	23	59	59	EPN_KENYERES
OSLS	10307M001	001	2004	01	07	00	00	00	2004	01	21	23	59	59	EPN_KENYERES
PADD	12750S001	001	2001	11	28	00	00	00	2002	08	07	23	59	59	EPN_KENYERES
PDEL	31906M004	001	2001	09	26	00	00	00	2001	10	10	23	59	59	EPN_KENYERES
PENC	11206M006	001	1997	01	15	00	00	00	1997	01	15	23	59	59	EPN_KENYERES
PFAN	11005S002	001	2004	01	21	00	00	00	2004	01	28	23	59	59	EPN_KENYERES
PFAN	11005S002	001	2005	12	21	00	00	00	2005	12	28	23	59	59	EPN_KENYERES
QAQ1	43007M001	001	2002	09	18	00	00	00	2003	01	01	23	59	59	EPN_KENYERES
QAQ1	43007M001	001	2003	09	10	00	00	00	2003	12	03	23	59	59	EPN_KENYERES
QAQ1	43007M001	001	2005	06	01	00	00	00	2005	06	01	23	59	59	EPN_KENYERES
RAMO	20703S001	001	2001	06	20	00	00	00	2001	07	11	23	59	59	EPN_KENYERES
RIGA	12302M002	001	1997	01	08	00	00	00	1997	01	29	23	59	59	EPN_KENYERES
RIGA	12302M002	001	2003	01	01	00	00	00	2003	01	08	23	59	59	EPN_KENYERES
RIGA	12302M002	001	2003	10	08	00	00	00	2003	10	08	23	59	59	EPN_KENYERES
SBGZ	11031S001	001	1999	02	10	00	00	00	1999	10	27	23	59	59	EPN_KENYERES
SBGZ	11031S001	001	2001	11	28	00	00	00	2001	12	26	23	59	59	EPN_KENYERES
SFER	13402M004	001	1996	07	03	00	00	00	1997	12	24	23	59	59	EPN_KENYERES
SFER	13402M004	001	2001	03	21	00	00	00	2001	03	21	23	59	59	EPN_KENYERES
SJDV	10090M001	001	1998	08	12	00	00	00	1999	03	10	23	59	59	EPN_KENYERES
SJDV	10090M001	001	2001	07	25	00	00	00	2001	08	29	23	59	59	EPN_KENYERES
SJDV	10090M001	001	2003	05	14	00	00	00	2003	05	14	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	1997	02	26	00	00	00	1998	03	25	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	1998	11	18	00	00	00	1998	11	18	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	1999	01	06	00	00	00	1999	03	24	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	2000	02	23	00	00	00	2000	03	15	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	2000	12	27	00	00	00	2001	01	10	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	2001	01	31	00	00	00	2001	01	31	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	2001	11	21	00	00	00	2002	01	09	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	2002	12	04	00	00	00	2003	03	05	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	2004	02	04	00	00	00	2004	02	18	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	2004	12	15	00	00	00	2005	03	23	23	59	59	EPN_KENYERES
SODA	10513M001	001	2005	12	14	00	00	00	2006	03	15	23	59	59	EPN_KENYERES
SOFI	11101M002	001	2001	12	26	00	00	00	2002	01	02	23	59	59	EPN_KENYERES
SOFI	11101M002	001	2003	10	22	00	00	00	2003	10	22	23	59	59	EPN_KENYERES
SRJV	11801S001	001	2000	04	19	00	00	00	2000	09	27	23	59	59	EPN_KENYERES
SRJV	11801S001	001	2003	01	08	00	00	00	2003	01	15	23	59	59	EPN_KENYERES
SVTL	12350M001	001	1996	11	27	00	00	00	1997	06	04	23	59	59	EPN_KENYERES
SVTL	12350M001	001	2001	01	10	00	00	00	2001	03	07	23	59	59	EPN_KENYERES
SVTL	12350M001	001	2002	11	20	00	00	00	2002	11	20	23	59	59	EPN_KENYERES
SVTL	12350M001	001	2002	12	25	00	00	00	2003	01	15	23	59	59	EPN_KENYERES
SVTL	12350M001	001	2004	01	28	00	00	00	2004	01	28	23	59	59	EPN_KENYERES
THU3	43001M002	001	2005	06	01	00	00	00	2005	06	01	23	59	59	EPN_KENYERES
TUBI	20806M001	001	1999	08	11	00	00	00	1999	08	11	23	59	59	EPN_KENYERES
UZHL	12301M001	001	2003	01	15	00	00	00	2003	01	15	23	59	59	EPN_KENYERES
VAAS	10511M001	001	1996	11	13	00	00	00	1997	04	23	23	59	59	EPN_KENYERES
VAAS	10511M001	001	1998	11	11	00	00	00	1998	11	11	23	59	59	EPN_KENYERES
VAAS	10511M001	001	1999	12	01	00	00	00	1999	12	22	23	59	59	EPN_KENYERES
VAAS	10511M001	001	2000	12	27	00	00	00	2001	01	10	23	59	59	EPN_KENYERES
VAAS	10511M001	001	2001	02	21	00	00	00	2001	03	07	23	59	59	EPN_KENYERES
VAAS	10511M001	001	2002	11	20	00	00	00	2002	12	11	23	59	59	EPN_KENYERES
VAAS	10511M001	001	2003	01	01	00	00	00	2003	01	15	23	59	59	EPN_KENYERES
VAAS	10511M001	001	2005	11	30	00	00	00	2006	01	11	23	59	59	EPN_KENYERES
VALE	13439M001	001	2002	05	22	00	00	00	2002	06	05	23	59	59	EPN_KENYERES
VALE	13439M001	001	2003	05	14	00	00	00	2003	05	14	23	59	59	EPN_KENYERES
VALE	13439M001	001	2003	06	18	00	00	00	2003	06	18	23	59	59	EPN_KENYERES
VALE	13439M001	001	2004	05	19	00	00	00	2004	05	19	23	59	59	EPN_KENYERES
VALE	13439M001	001	2005	05	04	00	00	00	2005	05	04	23	59	59	EPN_KENYERES
VENE	12741M001	001	1996	08	21	00	00	00	2001	12	12	23	59	59	EPN_KENYERES
VLNS	10801M001	001	1999	03	24	00	00	00	1999	04	28	23	59	59	EPN_KENYERES
VLNS	10801M001	001	2002	09	25	00	00	00	2002	09	25	23	59	59	EPN_KENYERES
VLNS	10801M001	001	2005	02	02	00	00	00	2005	02	09	23	59	59	EPN_KENYERES
WARE	13114M001	001	1996	07	03	00	00	00	1996	11	06	23	59	59	EPN_KENYERES
WSRT	13506M005	001	1997	08	27	00	00	00	1998	03	11	23	59	59	EPN_KENYERES
ZECK	12351M001	001	1997	11	26	00	00	00	1997	11	26	23	59	59	EPN_KENYERES
ZECK	12351M001	001	1997	12	10	00	00	00	1997	12	10	23	59	59	EPN_KENYERES
ZIMM	14001M004	001	1997	01	01	00	00	00	1997	01	01	23	59	59	EPN_KENYERES
ZOUF	12763M001	001	2004	12	15	00	00	00	2004	12	15	23	59	59	EPN_KENYERES
ACOR	13434M001	001	2000	03	15	00	00	00	2000	03	15	23	59	59	1053 > 3*SIG
AJAC	10077M005	001	2001	07	11	00	00	00	2001	07	11	23	59	59	1122 > 3*SIG
AJAC	10077M005	001	2001	07	25	00	00	00	2001	07	25	23	59	59	1124 > 3*SIG
AJAC	10077M005	001	2005	11	16	00	00	00	2005	11	16	23	59	59	1349 > 3*SIG
AJAC	10077M005	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363 > 3*SIG
ALME	13437M001	001	2001	03	28	00	00	00	2001	03	28	23	59	59	1107 > 3*SIG
ALME	13437M001	001	2001	04	04	00	00	00	2001	04	04	23	59	59	1108 > 3*SIG
ALME	13437M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363 > 3*SIG
ANKR	20805M002	001	1999	08	11	00	00	00	1999	08	11	23	59	59	1022 > 3*SIG
AQUI	12757M001	001	2003	01	08	00	00	00	2003	01	08	23	59	59	1200 > 3*SIG
BELL	13431M001	001	1999	02	10	00	00	00	1999	02	10	23	59	59	0996 > 3*SIG
BELL	13431M001	001	2004	03	03	00	00	00	2004	03	03	23	59	59	1260 > 3*SIG
BOGI	12207M003	001	2003	07	30	00	00	00	2003	07	30	23	59	59	1229 > 3*SIG
BOGI	12207M003	001	2005	12	21	00	00	00	2005	12	21	23	59	59	1354 > 3*SIG
BOR1	12205M002	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363 > 3*SIG
BORK	14268M001	001	2002	04	03	00	00	00	2002	04	03	23	59	59	1160 > 3*SIG
BORK	14268M001	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307 > 3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	04	20	00	00	00	2005	04	20	23	59	59	1319 > 3*SIG

BRST	10004M004	001	2005	04	27	00	00	00	2005	04	27	23	59	59	1320	>	3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	05	04	00	00	00	2005	05	04	23	59	59	1321	>	3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	05	18	00	00	00	2005	05	18	23	59	59	1323	>	3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	05	25	00	00	00	2005	05	25	23	59	59	1324	>	3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	06	08	00	00	00	2005	06	08	23	59	59	1326	>	3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	07	27	00	00	00	2005	07	27	23	59	59	1333	>	3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	10	19	00	00	00	2005	10	19	23	59	59	1345	>	3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	11	02	00	00	00	2005	11	02	23	59	59	1347	>	3*SIG
BRST	10004M004	001	2005	11	30	00	00	00	2005	11	30	23	59	59	1351	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	1997	08	06	00	00	00	1997	08	06	23	59	59	0917	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	1997	10	08	00	00	00	1997	10	08	23	59	59	0926	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	1998	10	28	00	00	00	1998	10	28	23	59	59	0981	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2003	01	08	00	00	00	2003	01	08	23	59	59	1200	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2003	01	15	00	00	00	2003	01	15	23	59	59	1201	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2003	01	29	00	00	00	2003	01	29	23	59	59	1203	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2003	02	02	00	00	00	2003	02	02	23	59	59	1204	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2003	02	12	00	00	00	2003	02	12	23	59	59	1205	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2003	02	19	00	00	00	2003	02	19	23	59	59	1206	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2003	02	26	00	00	00	2003	02	26	23	59	59	1207	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2003	04	09	00	00	00	2003	04	09	23	59	59	1213	>	3*SIG
BRUS	13101M004	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
BUCU	11401M001	001	1999	03	17	00	00	00	1999	03	17	23	59	59	1001	>	3*SIG
BUCU	11401M001	001	2000	08	30	00	00	00	2000	08	30	23	59	59	1077	>	3*SIG
BUCU	11401M001	001	2001	01	24	00	00	00	2001	01	24	23	59	59	1098	>	3*SIG
BUCU	11401M001	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
BUDP	10101M003	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
BUDP	10101M003	001	2006	01	25	00	00	00	2006	01	25	23	59	59	1359	>	3*SIG
CACE	13447M001	001	2002	08	07	00	00	00	2002	08	07	23	59	59	1178	>	3*SIG
CACE	13447M001	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
CACE	13447M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
CAGZ	12725M004	001	2004	08	18	00	00	00	2004	08	18	23	59	59	1284	>	3*SIG
CANT	13438M001	001	2001	07	11	00	00	00	2001	07	11	23	59	59	1122	>	3*SIG
CASC	13909S001	001	1999	11	10	00	00	00	1999	11	10	23	59	59	1035	>	3*SIG
CASC	13909S001	001	2002	08	21	00	00	00	2002	08	21	23	59	59	1180	>	3*SIG
CASC	13909S001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
CEUT	13449M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
COMO	12761M001	001	2006	07	19	00	00	00	2006	07	19	23	59	59	1384	>	3*SIG
DARE	13208S001	001	2005	12	14	00	00	00	2005	12	14	23	59	59	1353	>	3*SIG
DELFI	13502M004	001	2000	08	16	00	00	00	2000	08	16	23	59	59	1075	>	3*SIG
DELFI	13502M004	001	2003	08	06	00	00	00	2003	08	06	23	59	59	1230	>	3*SIG
DELFI	13502M004	001	2003	08	13	00	00	00	2003	08	13	23	59	59	1231	>	3*SIG
DELFI	13502M004	001	2004	05	12	00	00	00	2004	05	12	23	59	59	1270	>	3*SIG
DRAG	20710S001	001	2003	02	19	00	00	00	2003	02	19	23	59	59	1206	>	3*SIG
DRES	14108M001	001	2003	09	24	00	00	00	2003	09	24	23	59	59	1237	>	3*SIG
DUBR	11901M001	001	2004	02	18	00	00	00	2004	02	18	23	59	59	1258	>	3*SIG
DUBR	11901M001	001	2005	09	07	00	00	00	2005	09	07	23	59	59	1339	>	3*SIG
DUBR	11901M001	001	2005	11	23	00	00	00	2005	11	23	23	59	59	1350	>	3*SIG
EIJS	13533M001	001	2000	12	20	00	00	00	2000	12	20	23	59	59	1093	>	3*SIG
ELBA	12721M002	001	2002	06	26	00	00	00	2002	06	26	23	59	59	1172	>	3*SIG
ELBA	12721M002	001	2004	01	14	00	00	00	2004	01	14	23	59	59	1253	>	3*SIG
ESCO	13435M001	001	2005	05	04	00	00	00	2005	05	04	23	59	59	1321	>	3*SIG
ESCO	13435M001	001	2005	05	11	00	00	00	2005	05	11	23	59	59	1322	>	3*SIG
ESCO	13435M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
EUSK	14258M003	001	1998	09	09	00	00	00	1998	09	09	23	59	59	0974	>	3*SIG
EUSK	14258M003	001	2000	05	10	00	00	00	2000	05	10	23	59	59	1061	>	3*SIG
EUSK	14258M003	001	2001	08	22	00	00	00	2001	08	22	23	59	59	1128	>	3*SIG
GATA	13902M001	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
GATA	13902M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
GANP	11515M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
GENO	12712M002	001	1999	01	27	00	00	00	1999	01	27	23	59	59	0994	>	3*SIG
GENO	12712M002	001	2002	05	29	00	00	00	2002	05	29	23	59	59	1168	>	3*SIG
GENO	12712M002	001	2004	12	15	00	00	00	2004	12	15	23	59	59	1301	>	3*SIG
GENO	12712M002	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
GLSV	12356M001	001	2001	07	18	00	00	00	2001	07	18	23	59	59	1123	>	3*SIG
GLSV	12356M001	001	2001	08	01	00	00	00	2001	08	01	23	59	59	1125	>	3*SIG
GLSV	12356M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
GOPE	11502M002	001	1999	05	05	00	00	00	1999	05	05	23	59	59	1008	>	3*SIG
GOPE	11502M002	001	2006	07	12	00	00	00	2006	07	12	23	59	59	1383	>	3*SIG
GOPE	11502M002	001	2006	07	19	00	00	00	2006	07	19	23	59	59	1384	>	3*SIG
GRAS	10002M006	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
GSR1	14501M001	001	2001	02	28	00	00	00	2001	02	28	23	59	59	1103	>	3*SIG
HELG	14264M001	001	2000	09	20	00	00	00	2000	09	20	23	59	59	1080	>	3*SIG
HFLK	11006S003	001	1998	03	18	00	00	00	1998	03	18	23	59	59	0949	>	3*SIG
HFLK	11006S003	001	2005	12	28	00	00	00	2005	12	28	23	59	59	1355	>	3*SIG
HFLK	11006S003	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
HOBU	14202M003	001	2002	08	21	00	00	00	2002	08	21	23	59	59	1180	>	3*SIG
HOFN	10204M002	001	1997	10	22	00	00	00	1997	10	22	23	59	59	0928	>	3*SIG
HOFN	10204M002	001	1997	10	29	00	00	00	1997	10	29	23	59	59	0929	>	3*SIG
HOFN	10204M002	001	1997	11	05	00	00	00	1997	11	05	23	59	59	0930	>	3*SIG
IENG	12724S001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
INVE	13221S001	001	2005	01	19	00	00	00	2005	01	19	23	59	59	1306	>	3*SIG
INVE	13221S001	001	2006	06	14	00	00	00	2006	06	14	23	59	59	1379	>	3*SIG
ISTA	20807M001	001	2001	08	29	00	00	00	2001	08	29	23	59	59	1129	>	3*SIG
ISTA	20807M001	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
JOEN	10512M001	001	2002	01	23	00	00	00	2002	01	23	23	59	59	1150	>	3*SIG

378 APPENDICE C. ELENCO DELLE DISCONTINUITÀ E DEGLI OUTLIERS

JOZE	12204M001	001	1998	07	29	00	00	00	1998	07	29	23	59	59	0968	>	3*SIG
JOZE	12204M001	001	1998	08	05	00	00	00	1998	08	05	23	59	59	0969	>	3*SIG
JOZE	12204M001	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
JOZE	12204M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
KARL	14216M001	001	1999	12	22	00	00	00	1999	12	22	23	59	59	1041	>	3*SIG
KARL	14216M001	001	2003	08	13	00	00	00	2003	08	13	23	59	59	1231	>	3*SIG
KATO	12219S001	001	2003	08	13	00	00	00	2003	08	13	23	59	59	1231	>	3*SIG
KATO	12219S001	001	2004	11	03	00	00	00	2004	11	03	23	59	59	1295	>	3*SIG
KATO	12219S001	001	2005	07	06	00	00	00	2005	07	06	23	59	59	1330	>	3*SIG
KATO	12219S001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
KATO	12219S001	001	2006	07	12	00	00	00	2006	07	12	23	59	59	1383	>	3*SIG
KELY	43005M001	001	2001	10	17	00	00	00	2001	10	17	23	59	59	1136	>	3*SIG
KIRO	10422M001	001	1999	12	01	00	00	00	1999	12	01	23	59	59	1038	>	3*SIG
KIRO	10422M001	001	1999	12	15	00	00	00	1999	12	15	23	59	59	1040	>	3*SIG
KIRO	10422M001	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
KIRO	10422M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
KIRU	10403M002	001	1997	01	29	00	00	00	1997	01	29	23	59	59	0890	>	3*SIG
KIRU	10403M002	001	1999	03	17	00	00	00	1999	03	17	23	59	59	1001	>	3*SIG
KIRU	10403M002	001	1999	04	21	00	00	00	1999	04	21	23	59	59	1006	>	3*SIG
KLOP	14214M002	001	2000	02	16	00	00	00	2000	02	16	23	59	59	1049	>	3*SIG
KLOP	14214M002	001	2001	10	24	00	00	00	2001	10	24	23	59	59	1137	>	3*SIG
KLOP	14214M002	001	2004	08	04	00	00	00	2004	08	04	23	59	59	1282	>	3*SIG
KRAW	12218M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
KRAW	12218M001	001	2006	07	12	00	00	00	2006	07	12	23	59	59	1383	>	3*SIG
LAGO	13903M001	001	2001	04	11	00	00	00	2001	04	11	23	59	59	1109	>	3*SIG
LAGO	13903M001	001	2003	10	08	00	00	00	2003	10	08	23	59	59	1239	>	3*SIG
LAGO	13903M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
LAMA	12209M001	001	1998	12	02	00	00	00	1998	12	02	23	59	59	0986	>	3*SIG
LAMA	12209M001	001	2000	02	16	00	00	00	2000	02	16	23	59	59	1049	>	3*SIG
LAMA	12209M001	001	2000	03	01	00	00	00	2000	03	01	23	59	59	1051	>	3*SIG
LAMA	12209M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
LAMP	12706M002	001	2000	11	08	00	00	00	2000	11	08	23	59	59	1087	>	3*SIG
LAMP	12706M002	001	2001	04	04	00	00	00	2001	04	04	23	59	59	1108	>	3*SIG
LAMP	12706M002	001	2001	05	09	00	00	00	2001	05	09	23	59	59	1113	>	3*SIG
LAMP	12706M002	001	2001	05	30	00	00	00	2001	05	30	23	59	59	1116	>	3*SIG
LAMP	12706M002	001	2001	06	06	00	00	00	2001	06	06	23	59	59	1117	>	3*SIG
LAMP	12706M002	001	2001	06	13	00	00	00	2001	06	13	23	59	59	1118	>	3*SIG
LAMP	12706M002	001	2001	06	20	00	00	00	2001	06	20	23	59	59	1119	>	3*SIG
LINZ	11033S001	001	2002	08	21	00	00	00	2002	08	21	23	59	59	1180	>	3*SIG
LINZ	11033S001	001	2002	10	30	00	00	00	2002	10	30	23	59	59	1190	>	3*SIG
LINZ	11033S001	001	2006	01	04	00	00	00	2006	01	04	23	59	59	1356	>	3*SIG
LLIV	13436M001	001	2001	04	11	00	00	00	2001	04	11	23	59	59	1109	>	3*SIG
LPAL	81701M001	001	2002	08	28	00	00	00	2002	08	28	23	59	59	1181	>	3*SIG
LPAL	81701M001	001	2002	09	18	00	00	00	2002	09	18	23	59	59	1184	>	3*SIG
LPAL	81701M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
LROC	10023M001	001	2002	10	02	00	00	00	2002	10	02	23	59	59	1186	>	3*SIG
LROC	10023M001	001	2002	12	18	00	00	00	2002	12	18	23	59	59	1197	>	3*SIG
MALL	13444M001	001	2001	04	04	00	00	00	2001	04	04	23	59	59	1108	>	3*SIG
MALL	13444M001	001	2003	08	13	00	00	00	2003	08	13	23	59	59	1231	>	3*SIG
MALL	13444M001	001	2003	08	20	00	00	00	2003	08	20	23	59	59	1232	>	3*SIG
MALL	13444M001	001	2003	08	27	00	00	00	2003	08	27	23	59	59	1233	>	3*SIG
MALL	13444M001	001	2003	10	22	00	00	00	2003	10	22	23	59	59	1241	>	3*SIG
MANS	10091M001	001	2005	10	12	00	00	00	2005	10	12	23	59	59	1344	>	3*SIG
MAR6	10405M002	001	2000	10	25	00	00	00	2000	10	25	23	59	59	1085	>	3*SIG
MARS	10073M008	001	2003	10	22	00	00	00	2003	10	22	23	59	59	1241	>	3*SIG
MARS	10073M008	001	2003	10	29	00	00	00	2003	10	29	23	59	59	1242	>	3*SIG
MARS	10073M008	001	2003	12	03	00	00	00	2003	12	03	23	59	59	1247	>	3*SIG
MAS1	31303M002	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
MATE	12734M008	001	2000	11	08	00	00	00	2000	11	08	23	59	59	1087	>	3*SIG
MATE	12734M008	001	2003	03	26	00	00	00	2003	03	26	23	59	59	1211	>	3*SIG
MATE	12734M008	001	2004	03	03	00	00	00	2004	03	03	23	59	59	1260	>	3*SIG
MATE	12734M008	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
MEDI	12711M003	001	1997	04	23	00	00	00	1997	04	23	23	59	59	0902	>	3*SIG
METS	10503S011	001	1997	01	01	00	00	00	1997	01	01	23	59	59	0886	>	3*SIG
METS	10503S011	001	2001	02	28	00	00	00	2001	02	28	23	59	59	1103	>	3*SIG
METS	10503S011	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
MLVL	10092M001	001	2001	06	20	00	00	00	2001	06	20	23	59	59	1119	>	3*SIG
MLVL	10092M001	001	2001	07	04	00	00	00	2001	07	04	23	59	59	1121	>	3*SIG
MLVL	10092M001	001	2001	07	11	00	00	00	2001	07	11	23	59	59	1122	>	3*SIG
MLVL	10092M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
MOPI	11507M001	001	2006	07	12	00	00	00	2006	07	12	23	59	59	1383	>	3*SIG
MORP	13299S001	001	2004	12	15	00	00	00	2004	12	15	23	59	59	1301	>	3*SIG
MORP	13299S001	001	2005	01	12	00	00	00	2005	01	12	23	59	59	1305	>	3*SIG
MORP	13299S001	001	2005	05	04	00	00	00	2005	05	04	23	59	59	1321	>	3*SIG
MSEL	12711M008	001	2006	07	19	00	00	00	2006	07	19	23	59	59	1384	>	3*SIG
NEWL	13273M103	001	2004	10	27	00	00	00	2004	10	27	23	59	59	1294	>	3*SIG
NICO	14302M001	001	1998	04	08	00	00	00	1998	04	08	23	59	59	0952	>	3*SIG
NICO	14302M001	001	2005	09	07	00	00	00	2005	09	07	23	59	59	1339	>	3*SIG
NOT1	12717M004	001	2003	06	11	00	00	00	2003	06	11	23	59	59	1222	>	3*SIG
NPLD	13234M003	001	2001	06	13	00	00	00	2001	06	13	23	59	59	1118	>	3*SIG
NPLD	13234M003	001	2001	06	27	00	00	00	2001	06	27	23	59	59	1120	>	3*SIG
NPLD	13234M003	001	2001	12	05	00	00	00	2001	12	05	23	59	59	1143	>	3*SIG
NPLD	13234M003	001	2002	04	03	00	00	00	2002	04	03	23	59	59	1160	>	3*SIG
NPLD	13234M003	001	2004	08	25	00	00	00	2004	08	25	23	59	59	1285	>	3*SIG
NPLD	13234M003	001	2004	09	01	00	00	00	2004	09	01	23	59	59	1286	>	3*SIG
N																	

NYIR	11208M001	001	2005	01	19	00	00	00	2005	01	19	23	59	59	1306	>	3*SIG
OBE2	14208M003	001	2003	12	31	00	00	00	2003	12	31	23	59	59	1251	>	3*SIG
ONSA	10402M004	001	2000	09	13	00	00	00	2000	09	13	23	59	59	1079	>	3*SIG
ONSA	10402M004	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
ONSA	10402M004	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
ONSA	10402M004	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
ONSA	10402M004	001	2006	03	22	00	00	00	2006	03	22	23	59	59	1367	>	3*SIG
ORID	15601M001	001	2000	08	30	00	00	00	2000	08	30	23	59	59	1077	>	3*SIG
ORID	15601M001	001	2000	12	06	00	00	00	2000	12	06	23	59	59	1091	>	3*SIG
ORID	15601M001	001	2004	01	28	00	00	00	2004	01	28	23	59	59	1255	>	3*SIG
OROS	11207M001	001	2001	12	12	00	00	00	2001	12	12	23	59	59	1144	>	3*SIG
OROS	11207M001	001	2002	07	17	00	00	00	2002	07	17	23	59	59	1175	>	3*SIG
OSJE	11902M001	001	2001	05	02	00	00	00	2001	05	02	23	59	59	1112	>	3*SIG
OSJE	11902M001	001	2001	07	04	00	00	00	2001	07	04	23	59	59	1121	>	3*SIG
OSJE	11902M001	001	2004	12	29	00	00	00	2004	12	29	23	59	59	1303	>	3*SIG
OSJE	11902M001	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
OSJE	11902M001	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
OSJE	11902M001	001	2005	09	14	00	00	00	2005	09	14	23	59	59	1340	>	3*SIG
OSLS	10307M001	001	2002	01	23	00	00	00	2002	01	23	23	59	59	1150	>	3*SIG
OSLS	10307M001	001	2002	02	13	00	00	00	2002	02	13	23	59	59	1153	>	3*SIG
OSLS	10307M001	001	2003	02	02	00	00	00	2003	02	02	23	59	59	1204	>	3*SIG
OSLS	10307M001	001	2005	12	07	00	00	00	2005	12	07	23	59	59	1352	>	3*SIG
OSLS	10307M001	001	2006	01	25	00	00	00	2006	01	25	23	59	59	1359	>	3*SIG
PADO	12750S001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
PDEL	31906M004	001	2001	09	12	00	00	00	2001	09	12	23	59	59	1131	>	3*SIG
PDEL	31906M004	001	2001	12	12	00	00	00	2001	12	12	23	59	59	1144	>	3*SIG
PDEL	31906M004	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
PFAN	11005S002	001	1997	10	15	00	00	00	1997	10	15	23	59	59	0927	>	3*SIG
PFAN	11005S002	001	1997	12	03	00	00	00	1997	12	03	23	59	59	0934	>	3*SIG
PFAN	11005S002	001	1997	12	17	00	00	00	1997	12	17	23	59	59	0936	>	3*SIG
PFAN	11005S002	001	1999	12	08	00	00	00	1999	12	08	23	59	59	1039	>	3*SIG
PFAN	11005S002	001	2001	03	14	00	00	00	2001	03	14	23	59	59	1105	>	3*SIG
PFAN	11005S002	001	2001	08	22	00	00	00	2001	08	22	23	59	59	1128	>	3*SIG
POLV	12336M001	001	2004	01	21	00	00	00	2004	01	21	23	59	59	1254	>	3*SIG
POLV	12336M001	001	2004	01	28	00	00	00	2004	01	28	23	59	59	1255	>	3*SIG
POTS	14106M003	001	2000	05	24	00	00	00	2000	05	24	23	59	59	1063	>	3*SIG
POTS	14106M003	001	2000	08	16	00	00	00	2000	08	16	23	59	59	1075	>	3*SIG
POTS	14106M003	001	2000	12	27	00	00	00	2000	12	27	23	59	59	1094	>	3*SIG
POTS	14106M003	001	2002	09	18	00	00	00	2002	09	18	23	59	59	1184	>	3*SIG
POTS	14106M003	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
PTBB	14234M001	001	2006	07	12	00	00	00	2006	07	12	23	59	59	1383	>	3*SIG
RABT	35001M002	001	2001	03	07	00	00	00	2001	03	07	23	59	59	1104	>	3*SIG
RABT	35001M002	001	2001	03	14	00	00	00	2001	03	14	23	59	59	1105	>	3*SIG
RABT	35001M002	001	2001	03	28	00	00	00	2001	03	28	23	59	59	1107	>	3*SIG
RABT	35001M002	001	2001	04	04	00	00	00	2001	04	04	23	59	59	1108	>	3*SIG
RABT	35001M002	001	2001	06	06	00	00	00	2001	06	06	23	59	59	1117	>	3*SIG
RABT	35001M002	001	2003	09	03	00	00	00	2003	09	03	23	59	59	1234	>	3*SIG
REDU	13102M001	001	2005	02	16	00	00	00	2005	02	16	23	59	59	1310	>	3*SIG
REDU	13102M001	001	2005	12	21	00	00	00	2005	12	21	23	59	59	1354	>	3*SIG
REDU	13102M001	001	2006	01	18	00	00	00	2006	01	18	23	59	59	1358	>	3*SIG
REDU	13102M001	001	2006	02	08	00	00	00	2006	02	08	23	59	59	1361	>	3*SIG
REDU	13102M001	001	2006	02	15	00	00	00	2006	02	15	23	59	59	1362	>	3*SIG
REDU	13102M001	001	2006	03	08	00	00	00	2006	03	08	23	59	59	1365	>	3*SIG
REYK	10202M001	001	2000	03	01	00	00	00	2000	03	01	23	59	59	1051	>	3*SIG
REYK	10202M001	001	2000	03	08	00	00	00	2000	03	08	23	59	59	1052	>	3*SIG
REYK	10202M001	001	2000	06	07	00	00	00	2000	06	07	23	59	59	1065	>	3*SIG
REYK	10202M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
RIGA	12302M002	001	1998	11	11	00	00	00	1998	11	11	23	59	59	0983	>	3*SIG
RIGA	12302M002	001	2001	07	25	00	00	00	2001	07	25	23	59	59	1124	>	3*SIG
RIGA	12302M002	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
RIGA	12302M002	001	2005	11	16	00	00	00	2005	11	16	23	59	59	1349	>	3*SIG
SBGZ	11031S001	001	2000	01	19	00	00	00	2000	01	19	23	59	59	1045	>	3*SIG
SBGZ	11031S001	001	2000	01	26	00	00	00	2000	01	26	23	59	59	1046	>	3*SIG
SBGZ	11031S001	001	2005	02	02	00	00	00	2005	02	02	23	59	59	1308	>	3*SIG
SBGZ	11031S001	001	2005	12	21	00	00	00	2005	12	21	23	59	59	1354	>	3*SIG
SBGZ	11031S001	001	2005	12	28	00	00	00	2005	12	28	23	59	59	1355	>	3*SIG
SBGZ	11031S001	001	2006	07	19	00	00	00	2006	07	19	23	59	59	1384	>	3*SIG
SJDV	10090M001	001	2000	05	31	00	00	00	2000	05	31	23	59	59	1064	>	3*SIG
SJDV	10090M001	001	2001	07	04	00	00	00	2001	07	04	23	59	59	1121	>	3*SIG
SJDV	10090M001	001	2003	01	08	00	00	00	2003	01	08	23	59	59	1200	>	3*SIG
SJDV	10090M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
SKEO	10426M001	001	2004	12	29	00	00	00	2004	12	29	23	59	59	1303	>	3*SIG
SKEO	10426M001	001	2006	01	11	00	00	00	2006	01	11	23	59	59	1357	>	3*SIG
SMID	10114M001	001	2003	07	09	00	00	00	2003	07	09	23	59	59	1226	>	3*SIG
SMID	10114M001	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
SODA	10513M001	001	2000	02	09	00	00	00	2000	02	09	23	59	59	1048	>	3*SIG
SODA	10513M001	001	2000	02	16	00	00	00	2000	02	16	23	59	59	1049	>	3*SIG
SODA	10513M001	001	2002	02	13	00	00	00	2002	02	13	23	59	59	1153	>	3*SIG
SOFI	11101M002	001	1998	01	28	00	00	00	1998	01	28	23	59	59	0942	>	3*SIG
SOFI	11101M002	001	1998	04	08	00	00	00	1998	04	08	23	59	59	0952	>	3*SIG
SOFI	11101M002	001	2000	05	10	00	00	00	2000	05	10	23	59	59	1061	>	3*SIG
SOFI	11101M002	001	2003	01	29	00	00	00	2003	01	29	23	59	59	1203	>	3*SIG
SPTO	10425M001	001	2004	01	28	00	00	00	2004	01	28	23	59	59	1255	>	3*SIG
STAS	10330M001	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
SVTL	12350M001	001	1997	11	26	00	00	00	1997	11	26	23	59	59	0933	>	

380 APPENDICE C. ELENCO DELLE DISCONTINUITÀ E DEGLI OUTLIERS

THU1	43001M001	001	2002	04	10	00	00	00	2002	04	10	23	59	59	1161	>	3*SIG
THU1	43001M001	001	2002	06	19	00	00	00	2002	06	19	23	59	59	1171	>	3*SIG
TLSE	10003M009	001	2001	06	27	00	00	00	2001	06	27	23	59	59	1120	>	3*SIG
TLSE	10003M009	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
TLSE	10003M009	001	2006	06	14	00	00	00	2006	06	14	23	59	59	1379	>	3*SIG
TRAB	20808M001	001	2002	06	12	00	00	00	2002	06	12	23	59	59	1170	>	3*SIG
TRDS	10331M001	001	2004	12	22	00	00	00	2004	12	22	23	59	59	1302	>	3*SIG
TRO1	10302M006	001	2005	02	02	00	00	00	2005	02	02	23	59	59	1308	>	3*SIG
TRO1	10302M006	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
TUBI	20806M001	001	1999	08	25	00	00	00	1999	08	25	23	59	59	1024	>	3*SIG
TUBI	20806M001	001	1999	09	01	00	00	00	1999	09	01	23	59	59	1025	>	3*SIG
TUBI	20806M001	001	1999	09	15	00	00	00	1999	09	15	23	59	59	1027	>	3*SIG
TUBI	20806M001	001	1999	09	22	00	00	00	1999	09	22	23	59	59	1028	>	3*SIG
TUBI	20806M001	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
TUBO	11503M001	001	2002	08	14	00	00	00	2002	08	14	23	59	59	1179	>	3*SIG
TUBO	11503M001	001	2002	12	25	00	00	00	2002	12	25	23	59	59	1198	>	3*SIG
UNPG	12752M001	001	2001	06	13	00	00	00	2001	06	13	23	59	59	1118	>	3*SIG
UNPG	12752M001	001	2006	03	01	00	00	00	2006	03	01	23	59	59	1364	>	3*SIG
UZHL	12301M001	001	1999	11	17	00	00	00	1999	11	17	23	59	59	1036	>	3*SIG
UZHL	12301M001	001	2000	02	16	00	00	00	2000	02	16	23	59	59	1049	>	3*SIG
UZHL	12301M001	001	2000	09	20	00	00	00	2000	09	20	23	59	59	1080	>	3*SIG
UZHL	12301M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
UZHL	12301M001	001	2006	06	21	00	00	00	2006	06	21	23	59	59	1380	>	3*SIG
VAAS	10511M001	001	1998	12	30	00	00	00	1998	12	30	23	59	59	0990	>	3*SIG
VAAS	10511M001	001	1999	09	15	00	00	00	1999	09	15	23	59	59	1027	>	3*SIG
VAAS	10511M001	001	1999	09	22	00	00	00	1999	09	22	23	59	59	1028	>	3*SIG
VARS	10322M002	001	2001	01	17	00	00	00	2001	01	17	23	59	59	1097	>	3*SIG
VEVE	12741M001	001	2006	06	28	00	00	00	2006	06	28	23	59	59	1381	>	3*SIG
VILL	13406M001	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
VILL	13406M001	001	2006	02	08	00	00	00	2006	02	08	23	59	59	1361	>	3*SIG
VILL	13406M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
VISO	10423M001	001	1997	04	09	00	00	00	1997	04	09	23	59	59	0900	>	3*SIG
VISO	10423M001	001	1998	05	27	00	00	00	1998	05	27	23	59	59	0959	>	3*SIG
VISO	10423M001	001	1999	07	07	00	00	00	1999	07	07	23	59	59	1017	>	3*SIG
VLNS	10801M001	001	2004	01	07	00	00	00	2004	01	07	23	59	59	1252	>	3*SIG
VLNS	10801M001	001	2004	06	16	00	00	00	2004	06	16	23	59	59	1275	>	3*SIG
VLNS	10801M001	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
WARE	13114M001	001	1996	08	21	00	00	00	1996	08	21	23	59	59	0867	>	3*SIG
WARE	13114M001	001	1996	09	25	00	00	00	1996	09	25	23	59	59	0872	>	3*SIG
WARE	13114M001	001	1997	08	06	00	00	00	1997	08	06	23	59	59	0917	>	3*SIG
WARE	13114M001	001	2001	07	25	00	00	00	2001	07	25	23	59	59	1124	>	3*SIG
WARE	13114M001	001	2001	08	22	00	00	00	2001	08	22	23	59	59	1128	>	3*SIG
WARE	13114M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
WROC	12217M001	001	2000	05	24	00	00	00	2000	05	24	23	59	59	1063	>	3*SIG
WROC	12217M001	001	2000	06	14	00	00	00	2000	06	14	23	59	59	1066	>	3*SIG
WROC	12217M001	001	2000	08	02	00	00	00	2000	08	02	23	59	59	1073	>	3*SIG
WROC	12217M001	001	2002	10	09	00	00	00	2002	10	09	23	59	59	1187	>	3*SIG
WSRT	13506M005	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
WSRT	13506M005	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	1997	01	08	00	00	00	1997	01	08	23	59	59	0887	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2001	08	08	00	00	00	2001	08	08	23	59	59	1126	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2001	12	19	00	00	00	2001	12	19	23	59	59	1145	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2001	12	26	00	00	00	2001	12	26	23	59	59	1146	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2003	05	14	00	00	00	2003	05	14	23	59	59	1218	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2003	06	25	00	00	00	2003	06	25	23	59	59	1224	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2003	08	13	00	00	00	2003	08	13	23	59	59	1231	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2005	06	01	00	00	00	2005	06	01	23	59	59	1325	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2005	08	17	00	00	00	2005	08	17	23	59	59	1336	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
WTZR	14201M010	001	2006	03	08	00	00	00	2006	03	08	23	59	59	1365	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2000	11	01	00	00	00	2000	11	01	23	59	59	1086	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2000	11	15	00	00	00	2000	11	15	23	59	59	1088	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2000	12	06	00	00	00	2000	12	06	23	59	59	1091	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2001	01	17	00	00	00	2001	01	17	23	59	59	1097	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2001	02	28	00	00	00	2001	02	28	23	59	59	1103	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2001	03	07	00	00	00	2001	03	07	23	59	59	1104	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2001	03	28	00	00	00	2001	03	28	23	59	59	1107	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2001	06	06	00	00	00	2001	06	06	23	59	59	1117	>	3*SIG
YEBE	13420M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
ZECK	12351M001	001	1997	12	17	00	00	00	1997	12	17	23	59	59	0936	>	3*SIG
ZIMM	14001M004	001	1997	05	28	00	00	00	1997	05	28	23	59	59	0907	>	3*SIG
ZIMM	14001M004	001	1997	08	13	00	00	00	1997	08	13	23	59	59	0918	>	3*SIG
ZIMM	14001M004	001	1998	05	13	00	00	00	1998	05	13	23	59	59	0957	>	3*SIG
ZIMM	14001M004	001	2005	01	26	00	00	00	2005	01	26	23	59	59	1307	>	3*SIG
ZIMM	14001M004	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
ZIMM	14001M004	001	2006	03	08	00	00	00	2006	03	08	23	59	59	1365	>	3*SIG
ZOUF	12763M001	001	2004	08	04	00	00	00	2004	08	04	23	59	59	1282	>	3*SIG
ZOUF	12763M001	001	2006	02	22	00	00	00	2006	02	22	23	59	59	1363	>	3*SIG
ZWEN	12330M001	001	2000	04	19	00	00	00	2000	04	19	23	59	59	1058	>	3*SIG
ZWEN	12330M001	001	2000	04	26	00	00	00	2000	04	26	23	59	59	1059	>	3*SIG
ZWEN	12330M001	001	2000	05	03	00	00	00	2000	05	03	23	59	59	1060	>	3*SIG
ZWEN	12330M001	001	2000	05	10	00	00	00	2000	05	10	23	59	59	1061	>	3*SIG
ZWEN	12330M001	001	2000	05	17	00	00	00	2000	05	17	23	59	59	1062	>	3*SIG
ZWEN	12330M001	001	2000	05	24	00	00	00	2000	05	24	23	59	59	1063	>	3*SIG
ZWEN	12330M001	001	2000	05	31	00	00	00	2000	05	31	23	59	5			

ZYWI 12220S001 001 2004 10 27 00 00 00 2004 10 27 23 59 59 1294 > 3*SIG
 ZYWI 12220S001 001 2006 02 22 00 00 00 2006 02 22 23 59 59 1363 > 3*SIG

TYPE 004: STATION COORDINATES AND VELOCITIES (ADDNEQ)

STATION NAME 1	STATION NAME 2	RELATIVE CONSTR. POSITION			RELATIVE CONSTR. VELOCITY		
		NORTH	EAST	UP	NORTH	EAST	UP
*****	*****	**,****	**,****	**,****	**,****	**,****	**,****
ANKR 20805M002B	ANKR 20805M002A	00.01500	00.01500	00.01500	00.00001	00.00001	00.00001
BOR1 12205M002B	BOR1 12205M002A	99.99999	99.99999	99.99999	00.00001	00.00001	00.00001
BRUS 13101M004B	BRUS 13101M004A	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
BZRG 12751M001B	BZRG 12751M001A	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
CEUT 13449M001B	CEUT 13449M001A	00.00010	00.00010	00.00010	00.00001	00.00001	00.00001
CREU 13432M001B	CREU 13432M001A	00.00010	00.00010	00.00010	00.00001	00.00001	00.00001
CREU 13432M001C	CREU 13432M001B	00.00010	00.00010	00.00010	00.00001	00.00001	00.00001
DOUR 13113M001B	DOUR 13113M001A	00.00010	00.00010	00.00010	00.00001	00.00001	00.00001
DRES 14108M001B	DRES 14108M001A	00.00100	00.00100	00.00300	00.00001	00.00001	00.00001
EUSK 14258M003B	EUSK 14258M003A	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
GRAS 10002M006B	GRAS 10002M006A	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
GRAZ 11001M002B	GRAZ 11001M002A	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
GRAZ 11001M002C	GRAZ 11001M002B	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
GRAZ 11001M002D	GRAZ 11001M002C	00.00100	00.00100	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
HOFN 10204M002B	HOFN 10204M002A	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
KARL 14216M001B	KARL 14216M001A	00.00100	00.00100	00.04000	00.00001	00.00001	00.00001
KARL 14216M001C	KARL 14216M001B	00.00100	00.00100	00.04000	00.00001	00.00001	00.00001
KELY 43005M001B	KELY 43005M001A	99.99999	99.99999	99.99999	00.00001	00.00001	00.00001
KLOP 14214M002B	KLOP 14214M002A	99.99999	99.99999	99.99999	00.00001	00.00001	00.00001
KLOP 14214M002C	KLOP 14214M002B	99.99999	99.99999	99.99999	00.00001	00.00001	00.00001
KOSG 13504M003B	KOSG 13504M003A	00.00010	00.00010	00.00010	00.00001	00.00001	00.00001
LAMA 12209M001B	LAMA 12209M001A	00.00100	00.00100	00.00100	00.00001	00.00001	00.00001
MATE 12734M008B	MATE 12734M008A	99.99999	99.99999	99.99999	00.00001	00.00001	00.00001
MALL 13444M001B	MALL 13444M001A	00.00100	00.00100	00.00100	00.00001	00.00001	00.00001
NPLD 13234M003B	NPLD 13234M003A	00.00100	00.00100	00.00100	00.00001	00.00001	00.00001
NICO 14302M001B	NICO 14302M001A	00.00001	00.00001	00.05000	00.00001	00.00001	00.00001
ONSA 10402M004B	ONSA 10402M004A	00.00100	00.00100	00.01000	00.00001	00.00001	00.00001
PENC 11206M006B	PENC 11206M006A	00.00200	00.00200	00.02000	00.00001	00.00001	00.00001
PFAN 11005S002B	PFAN 11005S002A	00.00700	00.00700	00.02000	00.00001	00.00001	00.00001
PFAN 11005S002C	PFAN 11005S002B	00.02000	00.02000	00.05000	00.00001	00.00001	00.00001
RAMO 20703S001B	RAMO 20703S001A	00.00100	00.00100	00.01000	00.00001	00.00001	00.00001
RAMO 20703S001C	RAMO 20703S001B	00.00100	00.00100	00.01000	00.00001	00.00001	00.00001
REYK 10202M001B	REYK 10202M001A	00.02000	00.02000	00.03000	00.00001	00.00001	00.00001
REYK 10202M001C	REYK 10202M001B	00.02000	00.02000	00.03000	00.00001	00.00001	00.00001
RIGA 12302M002B	RIGA 12302M002A	00.00100	00.00400	00.00400	00.00001	00.00001	00.00001
SFER 13402M004B	SFER 13402M004A	00.00100	00.00100	00.01000	00.00001	00.00001	00.00001
SFER 13402M004C	SFER 13402M004B	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001
SVTL 12350M001B	SVTL 12350M001A	00.00100	00.00100	00.01000	00.00001	00.00001	00.00001
TR01 10302M006B	TR01 10302M006A	00.00100	00.00100	00.01000	00.00001	00.00001	00.00001
TR01 10302M006C	TR01 10302M006B	00.00100	00.00100	00.01000	00.00001	00.00001	00.00001
UNPG 12752M001B	UNPG 12752M001A	00.00400	00.00400	00.01000	00.00001	00.00001	00.00001
UNPG 12752M001C	UNPG 12752M001B	00.00400	00.00400	00.03000	00.00001	00.00001	00.00001
VEVE 12741M001B	VEVE 12741M001A	99.99999	99.99999	99.99999	00.00001	00.00001	00.00001
WARE 13114M001B	WARE 13114M001A	00.00100	00.00100	00.00100	00.00001	00.00001	00.00001
WARE 13114M001C	WARE 13114M001B	00.00100	00.00100	00.00100	00.00001	00.00001	00.00001
ZIMM 14001M004B	ZIMM 14001M004A	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001	00.00001

TYPE 005: HANDLING STATION TYPES

STATION NAME	FLG	FROM	TO	MARKER TYPE	REMARK
*****	***	YYYY MM DD HH MM SS	YYYY MM DD HH MM SS	*****	*****

Bibliografia

- [1] C.M.R Fowler, *The Solid Earth, an introduction to Global Geophysics*, Cambridge University Press.
- [2] D. L. Turcotte, G. Schubert, *Geodynamics*, Cambridge University Press.
- [3] B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, *GPS: Theory and Practice*, Springer.
- [4] U. Hugentobler, R. Dach, P. Fridez, M. Meindl, *The Bernese GPS Software Version 5.0*.
- [5] H. Moritz, *Advanced Physical Geodesy*, Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe, 1980.
- [6] K. R. Koch, *Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models*, Springer, 1989.
- [7] A. Cina, *GPS - Principi, modalità e tecniche di posizionamento*, CELID, 2000.
- [8] W. Torge, *Geodesy*, De Gruyter.
- [9] E. Brockman, *Combination of solutions for geodetic and geodynamic applications of the global positioning system (GPS)*, Ph. d. thesis.
- [10] J. M. Noquet, *MESURE DE LA DEFORMATION CRUSTALE EN EUROPE OCCIDENTALE PAR GEODESIE SPATIALE*, Ph. d. thesis.
- [11] W. Gurtner, C. Boucher, C. Bruyninx, H. V. D. Marel, *The use of the IGS/EUREF Permanent Network For Euref Densification Campaign*
- [12] A. Caporali, *Average strain rate in the Italian crust inferred from a permanent GPS Network - I Statistical analysis of the time-series of permanent GPS stations*, *Geophys. J. Int.* (2003) 155, 241-253.
- [13] A. Caporali, S. Martin, M. Massironi, *Average strain rate in the Italian crust inferred from a permanent GPS Network - II Strain rate versus seismicity and structural geology*, *Geophys. J. Int.* (2003) 155, 254-268.

- [14] A. Caporali, Adding geodetic strain rate data to a seismogenic context. *BOLLETTINO DI GEOFISICA TEORICA E APPLICATA*. (2006) 47, 455-479
- [15] D. Dong, T. A. Herring, R. W. King, Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *Journal of Geodesy*, (1998) 72: 200-214.
- [16] E. Serpelloni, M. Anzidei, P. Baldi, G. Casula, A. Galvani, Crustal velocities and strain rate fields in Italy and surrounding regions: new results from the analysis of permanent and non permanent GPS Networks, *Geophys. J. Int.* (2005) 161, 861-880.
- [17] E. Serpelloni, G. Vannucci, S. Pondrelli, A. Argnani, G. Casula, M. Anzidei, P. Baldi, P. Gasperini, Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data, *Geophys. J. Int.* (2007) 169, 1180-1200.
- [18] M. Tesauro, Christine Hollenstein, Ramon Egli, Alain Geiger, Hans-Gert Hahle, Analysis of central western Europe deformation using GPS and seismic data, *Journal of Geodynamics*, (2006) 42, 194-209.
- [19] E. Calais, Continuous GPS measurements across western Alps, 1996-1998, *Geophys. J. International* (1999) 138, 221-230.
- [20] J. M. Noquet, E. Calais, Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996-2001, *Geophys. J. International* (2003) 154, 72-88.
- [21] S. M. C. Alves, M. C. Santos, C. Germael, A velocity field estimation of the Brazilian portion of the SOAM plate, *GPS solutions*, (2003), 7, 186-193.
- [22] I. Takos, Adjustment of observation equations without full rank, *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, 1999, N.2.
- [23] P. Sillard, C. Boucher, A review of algebraic constraints in terrestrial reference frame datum definition, *Journal of Geodesy*, (2001) 75, 63-73.
- [24] J. Langbein, H. Johnson, Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B1, Pages 591-603.
- [25] P. Davies, G. Blewitt, Methodology for global geodetic time series estimation: A new tool for geodynamics, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B5, Pages 11,083-11,100.
- [26] A. Mao, C. G. A. Harrison, T. Dixon, Noise in GPS coordinate time series, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. B2, Pages 2797-2816.

- [27] R. M. S. Fernandes, J. M. Miranda, B. M. L. Meijninger, M. S. Bros, R. Noomen, L. Bastos, B. A.C. Ambrosius, R. E. M. Riva, Surface velocity field of the Ibero-Maghrebian segment of the Eurasia-Nubia plate boundary, *Geophys. J. Int.* (2007) 169, 415-324.
- [28] El-Fiky, G. S. Kato, Continuous distribution of the horizontal strain rate in the Tohoku district, Japan, predicted by least-squares collocation, *J. Geodyn.* (1999), 27, 213-236.
- [29] J. C. Wu, H. W. Tang, Y. Q. Chen, Y. X. Li, The current strain distribution in the North China Basin of eastern China by Least-squares collocation, *J. Geodyn.* (2006), 41, 462-470.
- [30] Jianqing Cai, Erik W. Grafarend, Statistical analysis of geodetic deformation (strain-rate) derived from the space geodetic measurements of BIFROST Project in Fennoscandia, *J. Geodyn.* (2007), 43, 214-238.
- [31] H. G. Kahle, M. V. Muller, A. Geiger, G. Danuser, S. Mueller, G. Veis, H. Billiris, D. Paradissis, The strain field in northwestern Greece and in the Ionian Islands: results inferred from GPS measurements, *Tectonophysics* (1995) 249, 41-52.
- [32] Ch. Hollenstein, A. Geiger, H. G. Kahle, G. Veis, CGPS time-series and trajectories of crustal motion along the West Hellenic Arc, *Geophys. J. Int.* (2006) 164, 182-191
- [33] H. G. Kahle, M. Cocard, Y. Peter, A. Geiger, R. Reilinger, A. Barka, G. Veis, GPS-derived strain rate field within the boundary zones of Eurasian, African and Arabian Plates, *Journal of Geophys. Res.* (2000), 23, 353-370.
- [34] H. G. Kahle, Christian Straub, Robert Reilingerb, Simon McCluskyb, Robert Kingb, Kenneth Hurstc, George Veisd, Kim Kastense and Paul Cross, The strain rate field in the eastern Mediterranean region, estimated by repeated GPS measurements, *Tectonophysics*, (1998), 294, 237-252.
- [35] R. Egli, A. Geiger, A. Wiget, H. G. Kahle, A modified least-squares collocation method for the determination of crustal deformation: first results in the Swiss Alps, *Geophys. J. Int.* (2006) 168, 1-12.
- [36] H. G. Kahle, M. Cocard, Y. Peter, A. Geiger, R. Reilinger, S. McClusky, R. King, A. Barka, G. Veis, The GPS strain rate field in the Aegean Sea and western Anatolia, *Geophys. Res. Letters*, (1999), 26, 2513-2516.
- [37] C. Boucher, Z. Altamimi, Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, EUREF memorandum.
- [38] Z. Altamimi, C. Boucher, D. Gambis, Long-term stability of the terrestrial reference frame, *Advances in space research* (2005), 36, 342-349.

- [39] A. Kenyeres, C. Bruyninx, EPN coordinate time series monitoring for reference frame maintenance, *GPS solutions* (2004) 8, 200-209.
- [40] H. Habrich, EUREF Regional Densification of ITRF 2005 (Draft), EUREF report.
- [41] C. Braitenberg, I. Nagy, M. Negusini, C. Romagnoli, M. Zadro, S. Zerbini, Geodetic measurements of the northern border of the Adria plate, *Journal of Geodynamics*, (2001) 32, 267-286.
- [42] E. Calais, J. Y. Han, C. DeMets, J. M. Noquet, Deformation of the North American plate interior from a decade of GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, (2006), 111, B06402.
- [43] O. Vestol, Determination of postglacial land uplift in Fennoscandia from leveling, tide-gauges and continuous GPS stations using least squares collocation, *J. Geod.*(2006) 80:248-258.
- [44] G. Grenerczy, I. Fejes, A. Kenyeres, Present crustal deformation pattern in the Pancardi Region: Constraints from Space Geodesy, EGU Stephan Mueller Special Publications series, 3,65-77, 2002.
- [45] R. Drescher, M. Becker, E. Schoenemann, Preliminary Central European Intraplate Velocities from CEGRN campaigns 1994 to 2005, (report).
- [46] CEGRN Reprocessing Guidelines V1.3.
- [47] G. Blewitt and D. Lavallée, Effect of annual signals on geodetic velocity, *JGR B* 107 (2002), p. B7 10.1029/2001JB000570.
- [48] A. Kenyeres, EPN COORDINATE TIME SERIES ANALYSIS, http://www.epncb.oma.be/_organisation/projects/series_sp/index.php
- [49] J. Legrand, Z. Altamimi, J. Olivier, Interpolation of the European velocity field using least squares collocation method, EUREF symposium 2006.
- [50] Steigenberger, P, M. Rothacher, R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke, and S. Vey (2006). Reprocessing of a global GPS network. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111, B05402.
- [51] Z. Altamimi, P. Sillard, C. Boucher, ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 107, NO. B10, 2214, doi:10.1029/2001JB000561, 2002.

- [52] Z. Altamimi, X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, C. Boucher, ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949, 2007