



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Osservatorio Vesuviano

La rete GPS in continuo dell'area vulcanica napoletana: dotazione strumentale, parametri di elaborazione e sviluppi tecnologici.

Tammaro U., Malaspina S., Serio C., Cecere G., Siniscalchi V., D'Alessandro A., Pinto S., Brandi G., Dolce M., Russo A.



Open File Report n° 4 - 2004

Osservatorio Vesuviano
Centro di Sorveglianza - Via Diocleziano 328, 80124 Napoli (Italia)
Tel: +39 0816108300 – Fax :+39 0816108351

INDICE

Riassunto	pag. 1
1. Introduzione	pag. 2
2. Stato dell'arte prima del maggio 2001	pag. 3
3. Stato dell'arte oggi	pag. 4
4 Strumentazione utilizzata	pag. 6
4.1 Strumentazione Leica	pag. 6
4.2 Strumentazione Trimble	pag. 8
5. Monumentazione dei siti	pag. 10
6. Gestione remota delle stazioni e download dei dati	pag. 13
6.1 Opzioni relative al formato	pag. 13
6.2 Opzioni relative al path	pag. 13
6.3 Opzioni relative agli allarmi	pag. 14
7. Controllo di qualità	pag. 14
8. Strategie di calcolo	pag. 17
9. Sistema di riferimento	pag. 19
10. Variazione del centro di fase	pag. 20
11. Antenna choke ring	pag. 20
12. Ritardo ionosferico	pag. 22
13. Ritardo troposferico	pag. 24
14. Elaborazione dei dati	pag. 25
15. Sistema informatico	pag. 27
16. Conclusioni	pag. 28
Bibliografia	pag. 28

La rete GPS in continuo dell'area vulcanica napoletana: dotazione strumentale, parametri di elaborazione e sviluppi tecnologici.

Tammaro U., Malaspina S., Serio C., Cecere G., Siniscalchi V., D'Alessandro A., Pinto S., Brandi G., Dolce M., Russo A.

INGV-OV, Unità funzionale di Geodesia, Via Diocleziano 328, 80124 Napoli.
e-mail: tammaro@ov.ingv.it

Riassunto

L'Osservatorio Vesuviano, sezione di Napoli dell'INGV, gestisce un sistema di monitoraggio delle deformazioni del suolo nell'aree vulcaniche attive del Vesuvio, Campi Flegrei e Ischia. A tale attività dal maggio 2001, nel contesto di una nuova organizzazione dell'Istituto, è deputata l'Unità Funzionale di Geodesia.

In questo lavoro si presenta lo stato dell'arte al maggio 2001 e la situazione attuale, dopo l'unificazione nell'unica rete CGPS delle preesistenti reti GPS. Si descrive la strumentazione impiegata, si presenta la monumentazione dei siti della rete, l'implementazione delle stazioni e si illustra la loro gestione remota. Solo marginalmente, si descrive il codice di creazione e controllo dei file in formato Rinex. Si fa riferimento alle equazioni che sono alla base degli algoritmi di funzionamento del programma di controllo della qualità dei dati, TEQC dell'UNAVCO. Si presentano i parametri di elaborazione, motivandone la scelta con riferimenti di carattere teorico. All'occorrenza, si mostrano anche alcuni grafici di sintesi, rimarcando il netto miglioramento avutosi, nell'ultimo triennio, dall'implementazione dei vertici all'elaborazione dei dati.

Parole chiave: CGPS, Quality Control, Rinex.

1. Introduzione

Nel maggio 2001, nel contesto di una più ampia riorganizzazione delle attività di monitoraggio e sorveglianza della sezione di Napoli dell'I.N.G.V., è iniziata l'opera di potenziamento della rete GPS in continuo, all'interno del sistema integrato di monitoraggio geodetico per il controllo dell'area vulcanica napoletana. Tale iniziativa, improntata non solo ad un aumento del numero di stazioni operanti in continuo, ha anche perseguito l'ottimizzazione delle procedure automatiche di acquisizione ed elaborazione dei relativi dati. L'obiettivo precipuo della riorganizzazione delle attività di monitoraggio con tecnica GPS è stato quello di rendere omogenee, dal punto di vista tecnologico, le singole reti operanti sulle tre aree vulcaniche attive napoletane. Il primo passo è stato quello di inglobarle in un'unica rete CGPS; successivamente, è stata curata l'implementazione dei siti con caratteristiche di elevata standardizzazione degli stessi e dell'intera catena strumentale. Nell'ultimo triennio, si è passati da diversi sistemi di scarico dati a distanza, in funzione della diversa strumentazione presente, che, comunque, non interessavano tutte le stazioni in continuo, ad un unico e più efficace sistema. Esso consente il download dei dati raw da tutti i siti e il controllo remoto delle stazioni attrezzate sia con ricevitori Leica sia con Trimble. Nel 2001 i dati venivano trasformati nel formato di interscambio RINEX in modo manuale e non si procedeva ad un controllo sistematico di tali file. Il controllo sulla qualità dei dati acquisiti veniva già effettuato impiegando il software di Quality Control dell'UNAVCO, ma in modalità manuale e sfruttando solo in minima parte le potenzialità del programma.

Nell'ultimo triennio, sono state realizzate procedure che hanno reso automatica la creazione dei rinex e il controllo dei dati, migliorando l'efficienza lungo l'intera filiera, che va dal dato acquisito alla rappresentazione di quello elaborato.

In questo lavoro, si illustreranno i miglioramenti apportati alla rete di GPS in continuo, dal punto di vista tecnologico, partendo dallo stato dell'arte preesistente alla riorganizzazione dell'attività di monitoraggio. Si porrà l'attenzione sul livello di standardizzazione raggiunto nell'equipaggiamento dei siti, anche partendo da situazioni totalmente diverse. Si illustrerà il programma di download dei dati raw, che oggi è unico e garantisce lo scarico di dati di diverso formato (Leica, Trimble e Ashtech). Si accennerà alla creazione automatica dei dati nel formato di interscambio rinex e marginalmente si farà riferimento al codice, scritto all'interno dell'Unità Funzionale, per il controllo automatico di tali file. Si descriverà il controllo di qualità dei dati acquisiti, riportando le equazioni fondamentali del programma TEQC dell'UNAVCO. Precisando gli aspetti teorici alla base delle scelte fatte, si presenteranno i parametri di calcolo e si descriverà l'elaborazione semiautomatica dei dati. All'interno dell'U.F. Geodesia si utilizzano anche procedure di calcolo automatico dei dati, che non sono l'oggetto di questo lavoro.

2. Stato dell'arte prima del maggio 2001

La prima esperienza, presso l'Osservatorio Vesuviano, di stazione GPS in continuo con controllo remoto e trasmissione dei dati, avvenne nel febbraio 1996 (Esposito et al., 2001). La stazione fu installata sul Vesuvio e posta sul tetto della foresteria dell'Osservatorio a circa 600 metri s.l.m. Nel 1997 fu avviato il progetto di fattibilità della rete GPS in continuo dell'area vesuviana (Esposito et al., 2001), mentre la raccolta dati utilizzando stazioni GPS permanenti iniziò nel febbraio 1998 (Esposito et al., 2001). L'acquisizione dei dati durò fino al gennaio 1999, quando l'inquinamento e.m. dell'area vesuviana raggiunse un livello tale da impedire la ricezione del segnale GPS. La mancanza di fondi e quindi la non disponibilità di strumentazione con sistemi che riducessero il multipath e migliorassero il tracciamento dei satelliti ha protetto l'interruzione fino ad ottobre 1999 (Pingue et al., 2000a e 2000b). Fin dall'inizio la rete GPS in continuo del Vesuvio era configurata a stella centrata sul punto OSVE, ubicato sulla sede storica dell'Osservatorio Vesuviano ad Ercolano. All'inizio del 2001, a causa dell'eccessivo inquinamento e.m., la qualità del segnale su OSVE peggiorò a tal punto da rendere impossibile l'elaborazione dei dati. Tale stazione fu sostituita dal sito POSI, posizionato presso l'ex sede dell'O.V. di via Manzoni (Berrino et al., 2002).

Nell'area Flegrea, tra la fine del 1998 e gli inizi del 1999 furono installate tre stazioni GPS in continuo (Del Gaudio et al., 1999a). Nel primo semestre del 2000 la rete flegrea contava già 5 stazioni, i relativi dati venivano elaborati a campione (ogni 5-6 giorni) considerando la stazione QUAR come quella di riferimento (Del Gaudio et al., 2000).

Nel febbraio 1999 fu installata la prima stazione GPS in continuo ad Ischia (Del Gaudio et al., 1999b), successivamente ne furono impiantate altre due. Nel corso del 2000 fu operativa la sola stazione FORI, poiché i ricevitori installati a SERR ed AQMO furono impiegati dal marzo per la sorveglianza dei Campi Flegrei (Berrino et al., 2002). Anche la rete ischitana usava come vertice di riferimento la stazione QUAR.

Nel maggio 2001 con la nascita dell'Unità Funzionale Geodesia, le tre reti furono unificate nell'unica rete CGPS, la quale aveva come vertice di riferimento la stazione POSI, che era funzionante in collegamento remoto ed era dotata di antenna choke ring. La rete era composta da 15 stazioni, 8 delle quali erano attrezzate per il download dei dati ed 11 erano dotate di antenna choke ring. In tab. 1 sono elencati, per aree ed escludendo POSI, il numero di stazioni allora presenti, l'ammontare di quelle in collegamento remoto e quante erano dotate di antenna choke ring.

Tab. 1: *La prima colonna presenta le tre reti esistenti nel maggio 2001, la seconda il numero di siti esistenti per area. La terza colonna precisa il numero di stazioni che allora erano teletrasmesse. La quarta, invece, indica l'ammontare di quelle dotate di choke ring.*

Rete	Numero di siti	Numero di stazioni in collegamento remoto	Stazioni dotate di antenna Choke Ring
Vesuvio	4	3	3
Campi Flegrei	7	4	6
Ischia	3	0	1
Totale	14	7	10

In fig. 1 è mostrata la configurazione della rete CGPS a maggio 2001.

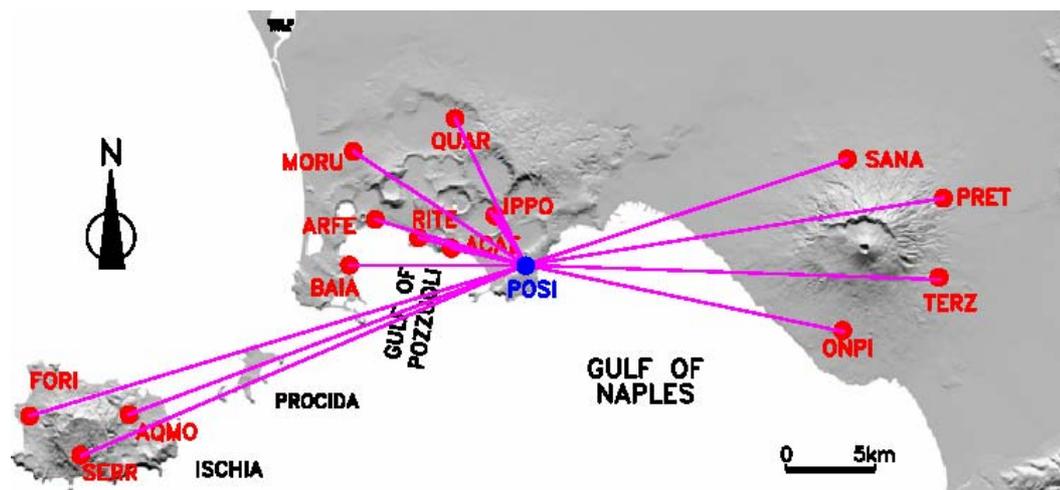


Fig. 1: Configurazione della rete CGPS dell'area vulcanica napoletana a maggio 2001, in rosso sono evidenziate le 14 stazioni che la componevano e in blu la stazione di riferimento POSI, persa nel febbraio 2002 per danneggiamento del sito.

Le 15 stazioni presentavano diverse implementazioni, ad esempio fra le 8 in scarico remoto, per la trasmissione dati, 5 necessitavano della presenza di un PC e di un modem, mentre le altre 3 solo del modem. Inoltre, il download dei dati e il controllo remoto delle stazioni avveniva con due sistemi diversi: con il programma CoRes 1.14 per le stazioni attrezzate con strumentazione Leica e per mezzo del software di gestione Trimble TRS per quelle con apparecchiatura Trimble (Berrino et al., 2002). In altri termini, non si era dotati di un tool capace di trattare sia il formato binario LB2 dei Leica sia quello DAT dei Trimble.

I dati raw, teletrasmessi o acquisiti localmente, venivano trasformati in rinex con procedure manuali, usando il software SKI per i dati Leica e gli applicativi DAT2RIN e TRRINEX per quelli Trimble.

L'elaborazione dei dati avveniva con software diversi e non ci si era ancora dotati di sistemi di elaborazione automatici.

3. Stato dell'arte oggi

Oggi la rete CGPS dell'area vulcanica napoletana conta 20 stazioni tutte in teletrasmissione, 18 delle quali attrezzate con antenne choke ring. L'intera rete è equipaggiata con ricevitori Trimble e Leica. In tab. 2 sono elencati i siti della rete CGPS, per ognuno di essi sono specificati il tipo di ricevitore e di antenna attualmente presenti. Il sito AGR1 era stato abbandonato all'inizio del 2001 a causa dell'eccessivo inquinamento elettromagnetico presente nella zona vesuviana (Berrino et al. 2002). La fig. 2, invece, mostra l'attuale configurazione della rete.

Tab. 2: Elenco dei siti della rete CGPS; per ognuno di essi sono specificati il tipo di ricevitore e di antenna attualmente presenti. La colonna "Installazione" fornisce dettagli sulle date di implementazione successive al maggio 2001.

Sito	Ricevitore	Antenna	Choke Ring	Installazione
ACAE	Trimble 4000SSI	TRM29659.00	Si	
AGR1	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	Riattivazione giugno 2003
AQMO	Trimble 4000SSI	TRM33429.00+GP	No	
ARFE	Leica RS500	LEIAT504-R	Si	
BAIA	Trimble 4000SSI	TRM29659.00	Si	
BKES	Leica RS500	LEIAT502	No	Installazione novembre 2003
ENAV	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	Installazione dicembre 2003
FORI	Trimble 4000SSI	TRM29659.00	Si	
FRUL	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	Installazione febbraio 2003
IPPO	Trimble 4000SSI	TRM29659.00	Si	
IPRO	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	Installazione luglio 2003
LICO	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	Installazione marzo 2003
MORU	Trimble 4000SSI	TRM29659.00	Si	
ONPI	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	
PRET	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	
QUAR	Trimble 4000SSI	TRM29659.00	Si	
RITE	Trimble 4000SSI	TRM29659.00	Si	
SANA	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	
SERR	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	
TERZ	Leica RS500	LEIAT504+R	Si	

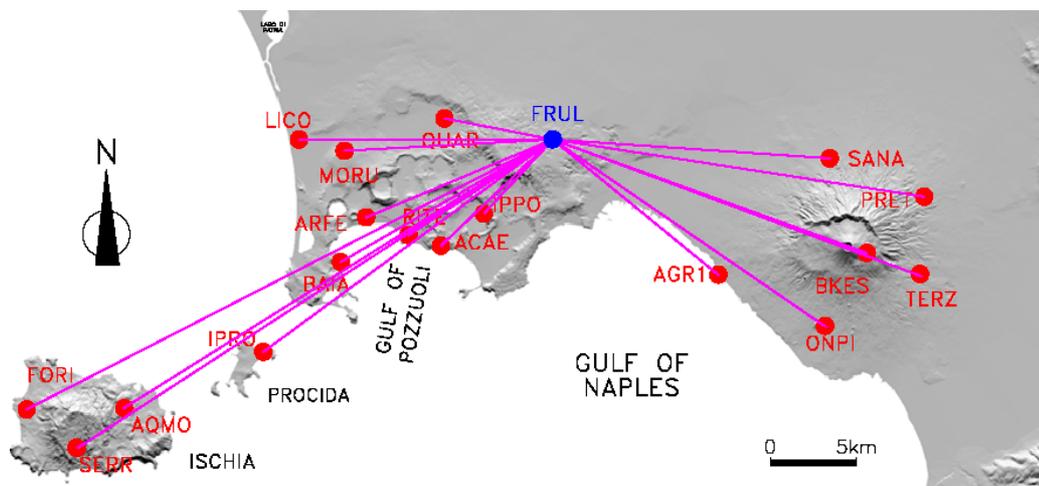


Fig. 2: Configurazione della rete CGPS dell'area vulcanica napoletana, attualmente composta da 19 stazioni, evidenziate in rosso. In blu è segnato il sito di riferimento FRUL ed in magenta le linee che sono calcolate giornalmente.

Il sistema di download dei dati raw gestisce sia il formato LB2 dei Leica sia quello DAT dei Trimble ed è anche in grado di trattare dati provenienti da ricevitori Ashtech. Sono state messe a punto procedure che, impiegando il software TEQC dell'UNAVCO, consentono la creazione automatica dei dati rinex, sia da rawdata Leica sia Trimble. Inoltre, è stato scritto un codice per il controllo dei dati rinex, in maniera tale da ridurre al minimo la possibilità di processare un dato non idoneo (poche ore di registrazione, presenza di una sola frequenza, ecc.). La validazione del dato rinex avviene solo dopo che esso abbia superato una serie di controlli imposti dal codice e che sia stato sottoposto all'analisi di qualità con il software TEQC dell'UNAVCO.

L'elaborazione avviene in modalità semiautomatica tramite il software SKI. I risultati dell'elaborazione sono costituiti da file ASCII, da cui, in maniera automatica, vengono estratte le informazioni relative alle lunghezze delle linee e alle variazioni, ΔE , ΔN , ΔU delle componenti nel sistema Est, Nord e Up.

4. Strumentazione utilizzata

Come già detto in precedenza, la rete CGPS è attualmente equipaggiata con ricevitori Leica RS500 e Trimble 4000SSI. Dodici stazioni, di cui 11 con antenna choke ring, sono equipaggiate con sistemi Leica ed otto con Trimble, di cui 7 con choke ring. Tutte le stazioni sono teletrasmesse, 17 via cavo e 3 (BKES, IPRO, SANA) via GSM. Di seguito sono illustrati i due tipi di apparecchiature impiegate e le implementazioni dei siti stazione.

4.1. Strumentazione Leica

I ricevitori Leica presenti sono modello RS500, dotato di tecnologia ClearTrak, che migliora il rapporto segnale-rumore e attenua il multipath. Inoltre, consente una più rapida acquisizione dei satelliti mantenendoli sempre agganciati anche in condizioni sfavorevoli (elevato inquinamento RF e satelliti con bassi angoli di elevazione).

Questo tipo di ricevitore, a doppia frequenza e a 12 canali su entrambe, è stato progettato per l'uso come stazione in continuo. Esso ha quattro porte seriali bidirezionali RS232, per il trasferimento dati fino a 115200 bps. Possiede, anche, due ingressi per l'alimentazione esterna, due slot per batterie e due porte per event input, che consentono la pianificazione di operazioni all'arrivo di un impulso. Inoltre, il ricevitore è dotato di una porta pps (pulse per second), che fornisce la possibilità di collegamento ad un clock esterno. In tab. 3 sono riassunte le caratteristiche tecniche del sistema, mentre in fig. 3 è mostrato il pannello del modello RS500.

Tab. 3: *Caratteristiche tecniche salienti del sistema RS500.*

Leica RS500	
Tipo di ricevitore	A doppia frequenza: L1 e L2
Numero di canali	12 canali su L1 ed L2
Comportamento quando il codice P è crittato	Operativo
Tecnologia per migliorare il rapporto segnale/rumore e l'aggancio dei satelliti	ClearTrak

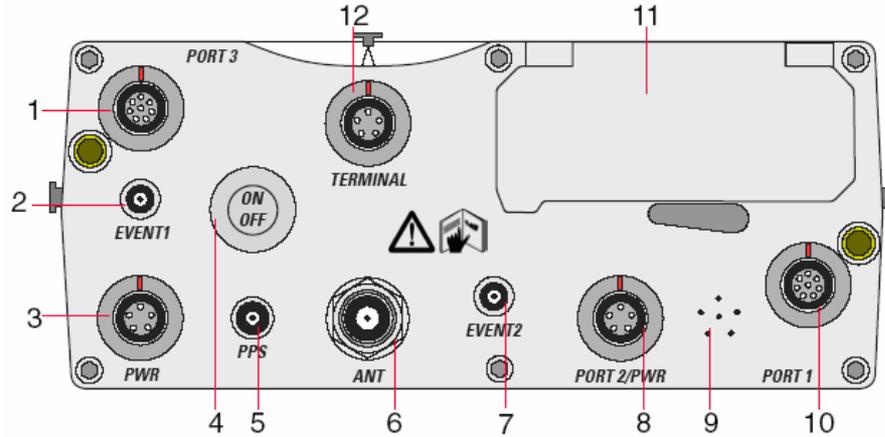


Fig. 3: Pannello di controllo del ricevitore RS500. 1. Porta 8 pin per alimentazione ed input/output dati. 2. Porta Event Input. 3. Porta 5 pin, per alimentazione. 4. Interruttore ON/OFF. 5. PPS output. 6. Ingresso antenna. 7. Porta Event Input. 8. Porta 5 pin per alimentazione ed input/output dati. 9. Fori di areazione. 10. Porta 8 pin per alimentazione ed input/output dati. 11. Vano per PC Card. 12. Porta per il terminale TR500 o per il collegamento remoto.

In tab. 4 sono mostrate le condizioni di funzionamento e di immagazzinamento, in funzione della temperatura, dell'intero sistema RS500 (ricevitore, terminale, antenna, PC flash card e internal memory).

In fig. 4 è riportato lo schema di una stazione attrezzata con strumentazione Leica.

Tab. 4: Intervalli di temperatura in cui è possibile usare o stoccare i vari componenti del sistema RS500.

Componente	Condizioni di funzionamento	Condizioni di immagazzinamento
Ricevitore	-20°C a +55°C	-40°C a +70°C
Terminale	-20°C a +55°C	-40°C a +70°C
Antenna	-40°C a +75°C	-40°C a +75°C
PC Flash Cards	-20°C a +75°C	-40°C a +75°C
Internal Memory	-20°C a +55°C	-40°C a +70°C



Fig. 4: Schema tipo di una stazione attrezzata con strumentazione Leica. Sono rappresentati l'antenna LEIAT504, i ricevitore RS500, il modem da 56000 bps, l'accumulatore da 12V e l'alimentatore.

In fig. 5, invece, è mostrato lo schema della stazione di BKES, situata a circa 900 m di quota sul Gran Cono del Vesuvio. Essa, ad oggi, è l'unica attrezzata con sistema stand-alone con alimentazione fotovoltaica a 12 Volt.



Fig. 5: Schema dell'implementazione della stazione BKES, situata, sul Gran Cono vesuviano, a circa 900 metri di quota. Sono rappresentati l'antenna LEIAT502, il ricevitore RS500, il modem GPRS da 19200 bps, l'accumalore 12V ed i pannelli solari.

Il funzionamento di tutto il sistema, acquisizione e trasmissione dati via GSM, richiede un assorbimento di 600-700 mA e per questo motivo il controllo del livello dell'alimentazione è un parametro che viene monitorato con cadenza giornaliera. Le caratteristiche del sistema di alimentazione sono presentate in tab. 5.

Tab. 5: Caratteristiche dell'impianto di alimentazione fotovoltaica della stazione BKES.

Pannelli solari	2 di 50 watt
Installazione pannelli	Su supporti tubolari
Batterie	2 da 12 Volt/40 Ah
Regolatore di carica a microprocessore	

La stazione di BKES è ancora in fase sperimentale per quanto riguarda l'alimentazione, infatti sono già stati programmati interventi al fine di ridurre ulteriormente il consumo di energia. Riduzioni, anche minime, del consumo energetico sono fondamentali, specialmente nel periodo invernale, per una stazione che ha come unica fonte di energia quella solare.

4.2. Strumentazione Trimble

I ricevitori Trimble, modello 4000SSI, sono dotati di tecnologia Super-trak, che garantisce l'acquisizione del segnale anche per basse potenze, tracciando meglio i satelliti anche in condizioni di interferenza RF elevata. Il sistema Super-trak, anche se oramai datato, fu il risultato di un'innovazione hardware e software, che consentì l'operatività anche quando il codice P era crittato. Questo ricevitore, a doppia frequenza

e 12 canali su entrambe, ha due porte seriali bidirezionali RS232 e possiede, anche, due ingressi per l'alimentazione esterna e due porte per event input, che consentono la pianificazione di operazioni all'arrivo di un impulso. Inoltre, il ricevitore è dotato di una porta pps (pulse per second), che fornisce la possibilità di collegamento ad un clock esterno. In tab. 6 sono riassunte le caratteristiche salienti del ricevitore. In fig. 6, invece, è mostrato il pannello del modello 4000SSI.

Tab. 6: Caratteristiche tecniche salienti del Trimble 4000SSI.

Trimble 4000SSI	
Tipo di ricevitore	A doppia frequenza: L1 e L2
Numero di canali	12 canali su L1 e su L2
Comportamento quando il codice P è crittato	Operativo
Tecnologia per migliorare il rapporto segnale/rumore e l'aggancio dei satelliti	Super-trak

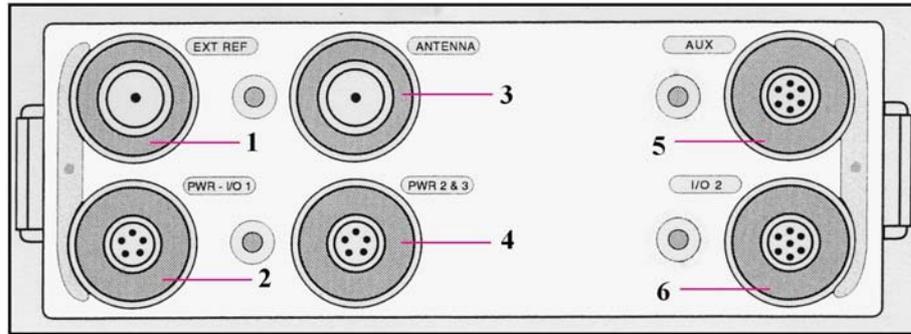


Fig. 6: Pannello del ricevitore 4000SSI. 1) PPS input. 2) Porta 5 pin per alimentazione o input/output dati. 3) Ingresso antenna. 4) Porta 5 pin, per alimentazione. 5) Porta Event Input o, se l'opzione è installata, pulse/second output. 6) Porta 8 pin per input/output dati.

In fig. 7 è presentato lo schema tipo di un sito attrezzato con strumentazione Trimble.



Fig. 7: Schema esemplificativo di una stazione attrezzata con strumentazione Trimble. Sono rappresentati l'antenna TRM29659.00, il ricevitore 4000SSI, il modem da 56000 bps, l'accumulatore da 12V e l'alimentatore.

5. Monumentazione dei siti

La monumentazione dei vertici GPS varia in funzione della finalità del sito stesso. In particolare, un vertice destinato a misure in continuo deve garantire un elevato accoppiamento caposaldo-terreno e quindi è necessario un adeguato lavoro di progettazione per ottenerlo.

Le soluzioni proposte nel corso del tempo sono state diverse; a titolo di esempio vengono descritti solo i tre tipi di monumentazione adottati dallo SCIGN (Southern California Integrated GPS Network), perché anche la costruenda rete nazionale dell'INGV prevede, per i propri siti, un'implementazione simile.

In fig. 8 è mostrata la monumentazione *Short Drill-Braced*. Essa consiste di 4 barre di acciaio del diametro di 1 pollice, tre delle quali diagonali ed una verticale. Gli assi sporgono di circa 1 metro al di sopra del terreno e sono ancorati, nella roccia, a circa 1-2.25 metri di profondità.



Fig. 8: Monumentazione tipo *Short Drill-Braced* (foto tratta dal sito della Central Washington University, <http://www.geodesy.cwu.edu>).

In fig. 9 è raffigurata la monumentazione *Deep Drill-Braced*. Essa è formata da un tubo verticale ancorato a circa 4-5 metri di profondità e stabilizzato da 4 barre diagonali, anch'esse fissate ad una profondità minima di 4-5 metri.



Fig. 9: Monumentazione tipo *Deep Drill-Braced* (foto tratta dal sito della Central Washington University, <http://www.geodesy.cwu.edu>).

In fig. 10 è rappresentata la monumentazione *Redmond-type*. Essa è una modificazione del progetto RBUT dell'UNAVCO raffigurato in fig. 11. In particolare, la monumentazione Redmond consiste di una barra di INVAR del diametro di 2.5 cm e 3 m di lunghezza. La barra è ancorata verticalmente a 2 metri di profondità ed è circondata da cemento.



Fig. 10: Monumentazione *Redmond-type* (foto tratta dal sito della Central Washington University, <http://www.geodesy.cwu.edu>).

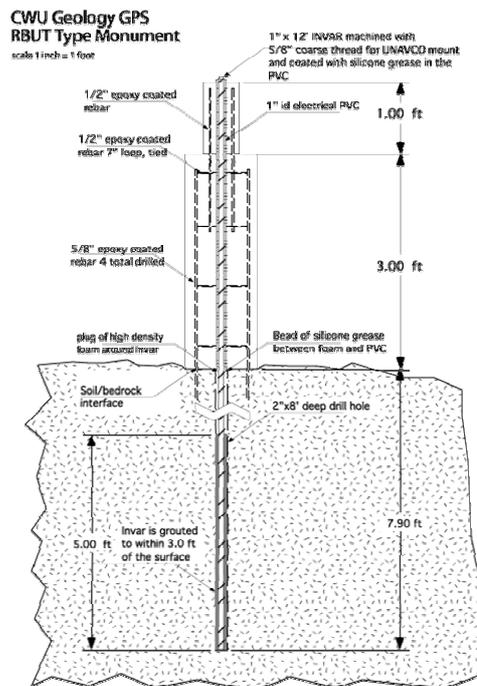


Fig. 11: Schema della monumentazione RBUT progettata dall'UNAVCO (foto tratta dal sito della Central Washington University, <http://www.geodesy.cwu.edu>).

L'area vulcanica napoletana, essendo caratterizzata da forte urbanizzazione e scarsa sicurezza raramente consente la migliore installazione nel senso dell'ottimizzazione dell'accoppiamento terreno-caposaldo. La maggioranza delle stazioni della rete CGPS è posta su edifici, curando, però, al meglio la scelta degli stessi e l'ancoraggio dei capisaldi alla struttura.



Fig. 12: *Caposaldo standard della rete CGPS dell'area vulcanica napoletana.*

Dell'intera rete GPS dell'area vulcanica napoletana solo tre capisaldi, TERZ, BKES e ENAV, non sono posti su edifici. Il sito TERZ è stato realizzato fissando il caposaldo in un pozzetto ancorato al terreno, tecnica questa consolidata da tempo all'Osservatorio Vesuviano. Infatti, negli anni settanta, si ritenne utile seguire le norme della Commissione Geodetica Italiana, costruendo i capisaldi altimetrici con bulloni cementati nel terreno (Bonasia et al., 1974, Bonasia e Pingue, 1981).

Il sito ENAV, la cui monumentazione è mostrata in fig. 13, presenta il caposaldo fissato in un pilastro di cemento, che a sua volta è ancorato alla roccia.



Fig. 13: *Monumentazione della stazione ENAV, sono visibili il pilastro su cui è fissato il caposaldo, il raccordo caposaldo-antenna e l'antenna choke ring LEIAT504 dotata di copertura (Radome).*

La monumentazione della stazione BKES è stata realizzata ancorando il caposaldo al bunker est. Presso a poco alla base del Gran Cono del Vesuvio, negli anni sessanta, furono costruite quattro sedi idonee per l'installazione di sismografi a teleregistrazione elettromagnetica. Per il raggiungimento di un'adeguata robustezza delle costruzioni si ritenne opportuno seguire il criterio di costruzione delle stazioni vedette eseguite

durante l'ultima guerra, ossia dei cosiddetti bunker, a chiusura ermetica per evitare le perturbazioni relative all'agitazione dell'aria (Imbò, 1967).

6. Gestione remota delle stazioni e download dei dati

Uno dei problemi incontrati nel progetto di omogenizzazione delle reti esistenti è stato quello di rendere possibile l'acquisizione in remoto di dati provenienti da ricevitori di marche diverse.

Il sistema di acquisizione dei dati GPS delle stazioni in continuo è gestito dal software GeoGloSS, che permette, con un'unica interfaccia, il controllo remoto delle stazioni GPS e lo scarico dei dati raw provenienti da ricevitori Leica, Trimble e Ashtech.

Rispetto ai sistemi preesistenti, non è più necessaria la presenza di un PC che faccia da interfaccia fra il ricevitore e il modem: il controllo remoto avviene tramite l'utilizzo del solo modem collegato alla stazione. Attualmente, il download dei dati avviene attraverso l'utilizzo di modem U.S. Robotics a 56000 bps su diciassette stazioni e modem GPRS a 19200 bps su tre siti.

Il programma di gestione remota consente di lanciare la misura, interromperla o modificarne le impostazioni. Rende possibile, inoltre, verificare i parametri di funzionamento della stazione, quali ad esempio lo stato della batteria, la memoria libera e il numero di satelliti. Consente di scaricare i file raw, eliminarli e formattare la memoria del ricevitore.

GeoGloSS è dotato di uno scheduler che permette di programmare e di configurare in vari modi lo scarico dei dati. Di seguito sono elencati i parametri che determinano le varie configurazioni di scarico.

6.1 Opzioni relative al formato

I dati possono essere immagazzinati in formato raw e/o in rinex ed è possibile rinominare i file raw scaricati in base alla loro data di creazione, utilizzando il classico formato nnnnddds, dove le prime quattro lettere indicano, il nome della stazione, ddd il giorno dell'anno e l'ultima, la sessione di misura. Quest'ultima funzione è particolarmente utile per i file in formato LB2 Leica, che non vengono generati dal ricevitore con nomi che specificano il giorno dell'anno (DoY).

6.2 Opzioni relative al path

I dati possono essere scaricati in un'unica cartella o organizzati in directory strutturate. Le strutture permesse sono le seguenti:

1. Anno → Mese → Giorno del Mese,
2. Anno → Mese → DoY,
3. Anno → DoY.

La struttura viene creata al momento dello scarico del file, in base alla data corrente o a quella del file scaricato.

6.3 Opzioni relative agli allarmi

Il sistema di allarmi scatta nel caso in cui una qualsiasi delle operazioni programmate non vada a buon fine o se, al momento del collegamento con la stazione, i parametri di funzionamento siano al di sotto dei valori soglia stabiliti. Inoltre, il sistema provvede ad inviare l'avviso di allarme ad una lista di utenti, via e-mail e/o via SMS e/o via rete ad un client del programma "in ascolto".

Il programma è configurato per rinominare i file in base alla loro data di creazione e, riferendosi ad essa, organizzarli in una struttura del tipo Anno → DoY. Tale struttura è creata sul server dell'Unità Funzionale di Geodesia ed è accessibile per le elaborazioni. Il software di gestione genera un file log, in cui sono riportate tutte le operazioni effettuate, in remoto, sulle stazioni.

7. Controllo di qualità

Il controllo dei dati acquisiti viene distinto in due fasi: controllo dei file rinex e controllo della qualità dei dati registrati.

Il controllo dei rinex avviene tramite un codice, scritto all'interno dell'unità, che verifica la congruenza tra i parametri presenti nell'intestazione del file relativo all'apparecchiatura presente sul sito ed i settaggi impostati. Alcuni dei parametri controllati sono l'altezza strumentale, il tipo di antenna, la velocità di campionamento e il tipo di ricevitore. Inoltre il codice consente di rilevare la presenza di buchi nella registrazione, il numero di epoche con meno di 4 satelliti e gli eventuali messaggi di errore presenti all'interno del file rinex.

Il controllo di qualità dei dati acquisiti viene realizzato con l'impiego del software TEQC dell'UNAVCO. Gli algoritmi usati da questo codice sono basati sulle stesse equazioni della precedente versione denominata QC (Estey e Meertens, 1999). Tali equazioni sono espresse dalla (1), che esprime le misure di fase, e dalla (2), che rappresenta le misure di pseudorange.

$$F_i = R + c(dt_r + dt_s) - I_i + N + m_i + n_i \lambda_i \quad (1)$$

$$P_i = R + c(dt_r + dt_s) + I_i + N + M_i \quad (2)$$

Nelle relazioni (1) e (2) l'indice i rappresenta la frequenza (L_1 o L_2), F_i la fase per λ_i , P_i la pseudodistanza, R la distanza tra il satellite e l'antenna, c la velocità della luce, dt_r l'errore associato all'orologio del ricevitore, dt_s l'errore dell'orologio posto sul satellite, I_i l'errore ionosferico, N il ritardo nell'atmosfera neutra, m_i il multipath della fase, M_i il multipath della pseudodistanza per la frequenza i , n_i ambiguità intera.

Estey e Meertens, assumendo che i percorsi dei segnali L_1 ed L_2 attraverso l'atmosfera fossero gli stessi ricavarono le equazioni, (3) e (4), per quantificare il multipath.

$$MP_1 = P_1 - \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha - 1}\right)F_1 + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)F_2 \quad (3)$$

$$MP_2 = P_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right)F_1 + \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha - 1}\right)F_2 \quad (4)$$

Nelle relazioni (3) e (4) $\alpha = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2$, dove f_1 e f_2 indicano le frequenze, perciò sostituendo i rispettivi valori delle frequenze si ottengono la (5) e la (6).

$$MP_1 = P_1 - 4.0915 \cdot F_1 + 3.0915 \cdot F_2 \quad (5)$$

$$MP_2 = P_2 - 5.0915 \cdot F_1 + 4.0915 \cdot F_2 \quad (6)$$

A titolo di esempio, sono mostrati i grafici relativi alla stazione ACAE. La fig. 14 mostra il numero di salti di ciclo dal 1/1/2001 al 14/6/2004, si nota una forte diminuzione dei cycle slip nel periodo compreso tra le due frecce. Tale riduzione, pari a circa dieci volte, è dovuta all'impiego di un Trimble TR4700 nel periodo evidenziato dalle frecce in rosso. Prima e dopo l'utilizzo del TR4700 il sito è stato occupato con un Trimble 4000SSI di precedente generazione.

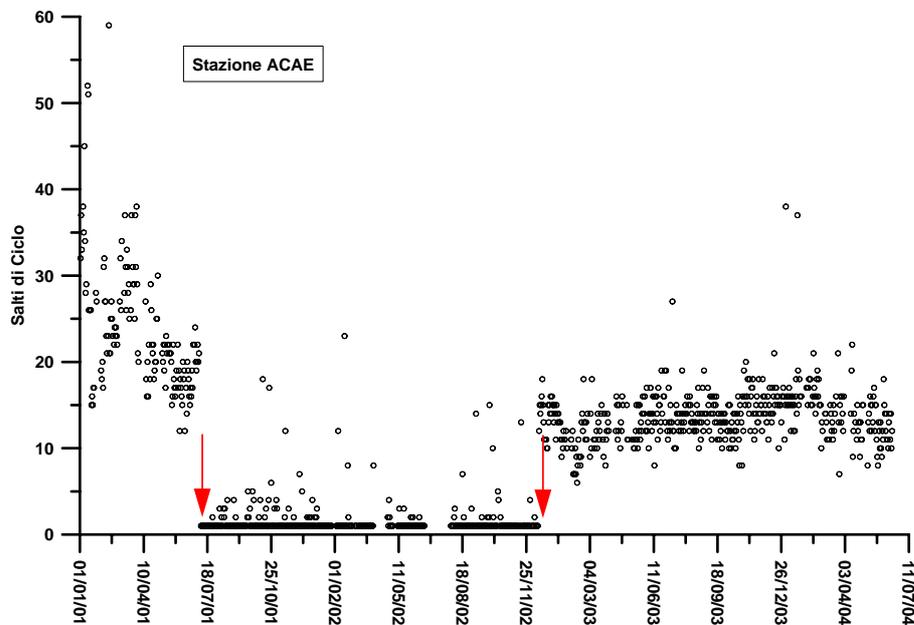


Fig. 14: Numero di salti di ciclo alla stazione ACAE dal 1 gennaio 2001 al 14 giugno 2004. Le due frecce rosse indicano l'intervallo di tempo in cui sul vertice era stato montato un Trimble 4700. Prima e dopo tale periodo, il sito è stato occupato con un Trimble 4000SSI, ricevitore di precedente generazione.

Nelle figg. 15 e 16, invece, è mostrato l'andamento del multipath relativo ad entrambe le frequenze. In esse è ancora evidente come l'impiego del ricevitore TR4700 migliori notevolmente la qualità del dato acquisito. Si evince anche un significativo miglioramento all'atto della rioccupazione del sito con un Trimble 4000SSI, dovuto essenzialmente all'impiego di una nuova versione del firmware.

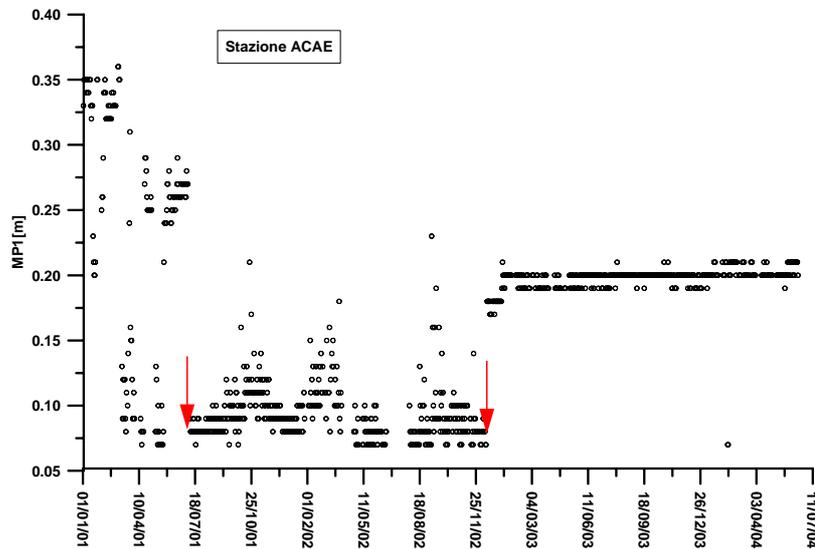


Fig. 15: *Multipath relativo alla frequenza L1 alla stazione ACAE dal 1 gennaio 2001 al 14 giugno 2004. Le due frecce rosse indicano l'intervallo di tempo in cui sul vertice era stato montato un Trimble 4700. Prima e dopo tale periodo, il sito è stato occupato con un Trimble 4000SSI, ricevitore di precedente generazione.*

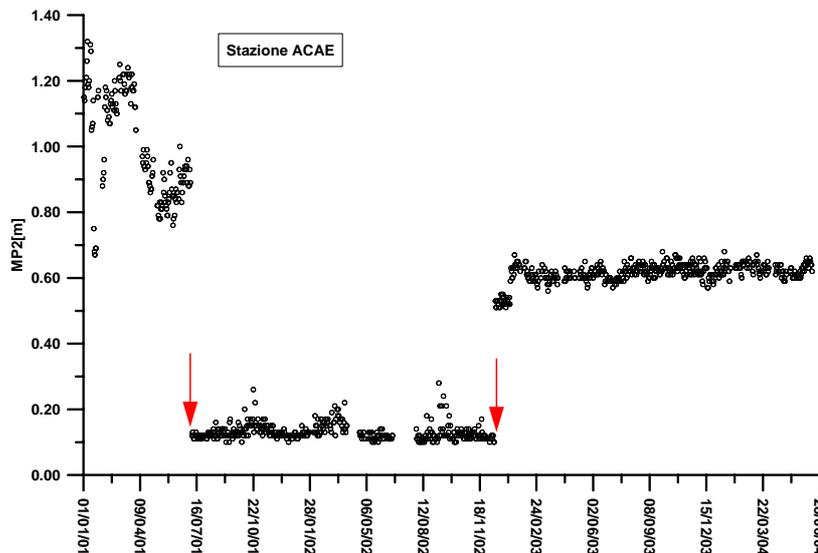


Fig. 16: *Multipath relativo alla frequenza L2 alla stazione ACAE dal 1 gennaio 2001 al 14 giugno 2004. Le due frecce rosse indicano l'intervallo di tempo in cui sul vertice era stato montato un Trimble 4700. Prima e dopo tale periodo, il sito è stato occupato con un Trimble 4000SSI, ricevitore di precedente generazione.*

Oggi tutti gli strumenti di nuova generazione, Leica RS500, di cui si è dotata l'Unità Funzionale Geodesia, sono installati sui siti della rete CGPS. Con l'obiettivo di garantire una più ampia copertura per l'intera area vulcanica napoletana si è provveduto ad occupare gli altri siti anche con apparecchiatura di precedente generazione. Comunque, l'installazione di nuovo firmware, prodotto dalle case madri, e l'implementazione delle stazioni con cavi a bassa dispersione, hanno di fatto migliorato sensibilmente la qualità dei dati acquisiti, anche su siti occupati con i sistemi Trimble 4000SSI.

8. Strategie di calcolo

Ogni satellite del sistema NAVSTAR GPS invia un segnale, piuttosto complesso, costituito da diverse componenti:

Due portanti, L1 ed L2, di lunghezza d'onda pari a circa 19 e 24 cm.

Due codici, C/A e P, pseudo-random, generati da una sequenza casuale. Il codice C/A, *Coarse Acquisition*, è specifico per ogni satellite, ha una frequenza pari ad un decimo di quella fondamentale e si ripete ogni millisecondo. Il codice P, *Precision*, è emesso alla frequenza fondamentale e si ripete ogni 267 giorni.

Il messaggio D, che contiene informazioni come ad esempio la posizione del satellite ed i parametri di correzione degli orologi atomici, è trasmesso ad una frequenza di 50 Hz.

L1 ed L2 sono modulate dai codici: L1 sfasata di 90° è modulata dal codice C/A, L1 ed L2 sono modulate entrambe da P. L1, L1 sfasata ed L2 trasportano tutte il messaggio D.

Il segnale completo è perciò dato dalla (7)

$$S = L_1 \text{ sfasata di } 90^\circ + L_1 + L_2 \quad (7)$$

La ricezione del segnale GPS consente di fare due diversi tipi di misure, le cosiddette misure di pseudorange e quelle di fase.

Noto il codice, nel ricevitore viene generata una sua replica nel momento della ricezione del segnale. Se il codice e la sua replica fossero sincronizzati, si otterrebbe la decodifica del segnale, ma nella realtà i due segnali non lo sono, perché quello inviato dal satellite deve coprire la distanza ricevitore satellite. L'intervallo di tempo, *time delay*, per ottenere il massimo di correlazione tra codice e la sua replica rappresenta la misura di pseudo-range. Il prodotto tra questa misura e la velocità della luce, velocità con cui si propaga il segnale, fornisce la distanza fra ricevitore e satellite, dimensionalmente $[t] * [L/t] = [L]$.

Una regola empirica stabilisce che la precisione di misure di pseudo-range è pari all'1% della lunghezza d'onda del segnale: 3 m per il codice C/A e 30 cm per quello P, che rappresentano gli errori intrinseci delle misure.

Le misure di fase si ottengono, una volta demodulato il segnale, facendo la differenza tra la fase generata dal ricevitore e quella della portante ricevuta. In termini analitici si ha

$$\varphi_i^K = \varphi_{geni}(T) - \varphi_{rici}^{genK}(t) \quad (8)$$

dove T indica il tempo di ricezione del ricevitore i e t quello di trasmissione del generico satellite K, perciò φ_i^K rappresenta l'osservabile, $\varphi_{rici}^{genK}(t)$ la fase della portante generata dal satellite K e ricevuta dal ricevitore i e $\varphi_{geni}(T)$ quella di una sua replica generata nel ricevitore.

Esprimendo $\varphi_{rici}^{genK}(t)$ in funzione di T con una linearizzazione mostrata nella (9) e considerando f costante in (T-t) si ottiene la (10)

$$\varphi_{rici}^{genK}(t) = \varphi_{rici}^{genK}(T) - f(T - t) \quad (9)$$

$$\varphi_i^K(T) = \varphi_{geni}(T) - \varphi_{rici}^{genK}(T) + f(T - t) \quad (10)$$

Se vi fosse sincronizzazione di tutti gli orologi con il tempo GPS, la fase generata da ogni oscillatore allo stesso tempo dovrebbe essere uguale e quindi la (10) si ridurrebbe solo all'ultimo termine del secondo membro. In realtà ci sono offset fra gli orologi e quindi sussistono le (11), dove S indica la distanza satellite-antenna e c la velocità della luce.

$$\begin{aligned} \varphi_{rici}^{genK}(T) &= \varphi(T)_{Rif} - fdt^K \\ \varphi_{geni}(T) &= \varphi(T)_{Rif} - fdT_i \\ (T - t) &= \frac{S}{c} + \frac{(d_{ion} + d_{trop})}{c} \end{aligned} \quad (11)$$

Sostituendo le (11) nella (10) si ha

$$\varphi_i^K(T) = \frac{f}{c}S + f(dt^K - dT_i) + \frac{f}{c}(d_{ion} + d_{trop}) \quad (12)$$

All'atto dell'accensione del ricevitore, al tempo T_0 , non è possibile misurare $\varphi_i^K(T_0)$, ma solo la sua parte fratta. Non si conosce il numero intero di cicli $N_i^K(T_0)$ fatti dal segnale nel coprire la distanza satellite ricevitore, perciò al tempo T_0 l'osservabile è rappresentata dalla (13) il termine $N_i^K(T_0)$ è detto ambiguità iniziale.

$$\varphi_i^K(T_0)_{Obs} = \frac{f}{c}S + f(dt^K - dT_i) + \frac{f}{c}(d_{ion} + d_{trop}) - N_i^K(T_0) \quad (13)$$

A partire da T_0 è noto il numero intero di cicli corrispondente alla variazione della distanza satellite ricevitore, quindi al tempo T è noto $N_i^K(T_0, T)$ e l'espressione dell'osservabile diviene

$$\varphi_i^K(T_0)_{obs} = \varphi_i^K(T) + N_i^K(T_0, T) = \frac{f}{c}S + f(dt^K - dT_i) + \frac{f}{c}(d_{ion} + d_{trop}) - N_i^K(T_0) \quad (14)$$

Anche per l'osservabile fase vale la regola empirica per calcolare l'errore intrinseco della misura, per cui, ricordando che λ_{L1} circa 19 cm e λ_{L2} circa 24 cm, si ottiene un errore di circa 2 mm, molto minore di quello che si ottiene da misure di pseudorange.

Oltre all'errore intrinseco delle misure ci sono altri errori sistematici che influenzano gli osservabili. Quelli per cui si è ritenuto sottolineare i richiami teorici alla base delle scelte operative per limitarli sono: la variazione del centro di fase dell'antenna, il ritardo causato dall'attraversamento della ionosfera e quello causato dall'attraversamento della troposfera.

9. Sistema di riferimento

Prima di passare alla descrizione dei parametri di calcolo, si è ritenuto opportuno rimarcare le caratteristiche del sistema di riferimento usato dal sistema GPS.

Nel sistema GPS, la posizione di un sito sulla superficie terrestre, viene calcolata considerando note le posizioni dei satelliti. Le effemeridi, sia broadcast sia precise, sono ricavate dalle equazioni di Newton e da un modello di gravità, perciò c'è la necessità di un sistema di riferimento geocentrico, con l'origine nel centro di massa della terra. Inoltre, per ottenere coordinate stabili, il sistema deve essere fisso rispetto ai moti terrestri. Il sistema di riferimento adottato è quello convenzionale terrestre denominato WGS84, dove WGS sta per World Geodetic System e 84 indica l'anno in cui Defence Mapping Agency lo definì. L'orientamento del WGS84 è descritto nella tab. 7, i parametri geometrici in tab. 8 e quelli dinamici in tab. 9.

Tab. 7: Parametri che descrivono l'orientamento del sistema WGS84.

Origine	Centro di massa terrestre
Asse z	Parallelo alla direzione del polo convenzionale terrestre
Asse x	Intersezione del piano meridiano di riferimento con il piano equatoriale del polo terrestre convenzionale
Asse y	Completa una terna ortogonale destrorsa ed è posta nel piano equatoriale a 90° ad est della x

Tab. 8: Parametri geometrici del sistema WGS84.

Semiassse equatoriale	a = 6378137 ± 2 [m]
Semiassse polare	b = 6356752.3142 [m]
Flattening = (a-b)/a	f = 1/298257223563

Tab. 9: Parametri dinamici del WGS84.

Costante gravitazionale geocentrica	GM = (3986005±0.6) 10 ⁸ [m ³ s ⁻²]
Velocità angolare	Ω = (7292115±0.15) 10 ⁻¹¹ rad s ⁻¹

10. Variazione del centro di fase dell'antenna

Il centro di fase di una antenna è il punto del quale calcoliamo la posizione. Per determinare le coordinate di un punto bisogna far coincidere il centro di fase con quel punto. Ciò lo si ottiene posizionando il centro geometrico dell'antenna sopra il punto e misurando l'altezza dal piano di campagna. Purtroppo, il centro di fase e quello geometrico non coincidono e l'offset dipende dall'elevazione, dall'azimut e dalla sua frequenza, L1 e L2.

In merito a questo problema, due aspetti devono essere distinti, l'offset fra centro di fase e centro geometrico e la stabilità del centro di fase.

Il primo problema viene risolto usando i file di antenna, mentre il secondo impiegando antenne choke ring, tale strumentazione viene descritta nel successivo paragrafo.

In tab. 10, a titolo di esempio, viene mostrato il file di antenna della LEIAT504 con Radome.

Tab. 10: File delle correzioni per l'antenna LEIAT504+R.

LEIAT504+R			LEIS D/M element, chokerings, +radome							NGS (2) 04/01/07	
[north]	[east]	[up]									L1
2.5	1.3	106.5									offset (mm)
[90]	[85]	[80]	[75]	[70]	[65]	[60]	[55]	[50]	[45]		Elevazione
.0	-.3	-.7	-1.0	-1.2	-1.4	-1.6	-1.8	-1.9	-1.9		Fase L1 (mm)
[40]	[35]	[30]	[25]	[20]	[15]	[10]	[5]	[0]			Elevazione
-1.9	-1.8	-1.6	-1.4	-1.1	-.8	-.3	.0	.0			Fase L1 (mm)
[north]	[east]	[up]									L2
-.7	1.3	125.4									offset (mm)
[90]	[85]	[80]	[75]	[70]	[65]	[60]	[55]	[50]	[45]		Elevazione
.0	.1	.2	.2	.2	.1	.1	.0	-.1	-.1		Fase L2 (mm)
[40]	[35]	[30]	[25]	[20]	[15]	[10]	[5]	[0]			Elevazione
-.2	-.2	-.1	.0	.2	.5	.8	.0	.0			Fase L2 (mm)

11. Antenna Choke Ring

L'antenna GPS per applicazioni di precisione, come il caso del rilevamento delle deformazioni del suolo in aree vulcaniche, è a centramento zero, ovvero non è un'antenna broad band: consente la ricezione solo dei segnali su L1 e L2, sopprimendo quelli compresi. L'antenna riduce il fuori banda, perché la sezione LNA (Low Noise Amplifier) è dotata di filtri di ottima qualità, separati per ciascuna delle frequenze. Questi filtri consentono la ricezione dei segnali GPS anche in condizioni di forti segnali fuori banda. Un'altra caratteristica importante dell'antenna è la capacità di eliminare il multipath, cioè, i segnali che sono riflessi dall'area ad essa sottostante. L'ottenimento di questo requisito impone che l'antenna sia montata su base choke ring, da cui il nome d'uso comune per indicare quella per stazioni fisse (fig. 14).

Una base choke ring consiste di una serie di anelli concentrici, con centro il luogo dove è posta l'antenna. L'area tra gli anelli crea dei solchi.

Il segnale ricevuto dall'antenna è composto da due componenti: segnale diretto e segnale riflesso. I solchi non hanno effetto sul segnale diretto a parte la diminuzione del gain dell'antenna a bassi angoli di elevazione dei satelliti. Per alti angoli di elevazione, invece, la base choke ring si comporta quasi come una base piatta. I solchi hanno, invece, molto effetto sui segnali riflessi dal disotto.



Fig. 14: Antenna Choke Ring, montata su 18 delle 20 stazioni GPS in continuo.

L'efficacia della choke ring rispetto agli altri tipi di antenne è evidente nella fig. 15, dove sono mostrati gli andamenti del multipath su L_1 (MP1), su L_2 (MP2) e del numero di salti di ciclo. Il cambio di antenna, da una SR399 ad una LEIAT504+R (choke ring), produce la riduzione del multipath e del numero dei salti di ciclo. In particolare, in tab. 11 sono presentati i valori della media e della deviazione standard per MP1, MP2 ed il numero di salti di ciclo, prima e dopo l'installazione della choke ring.

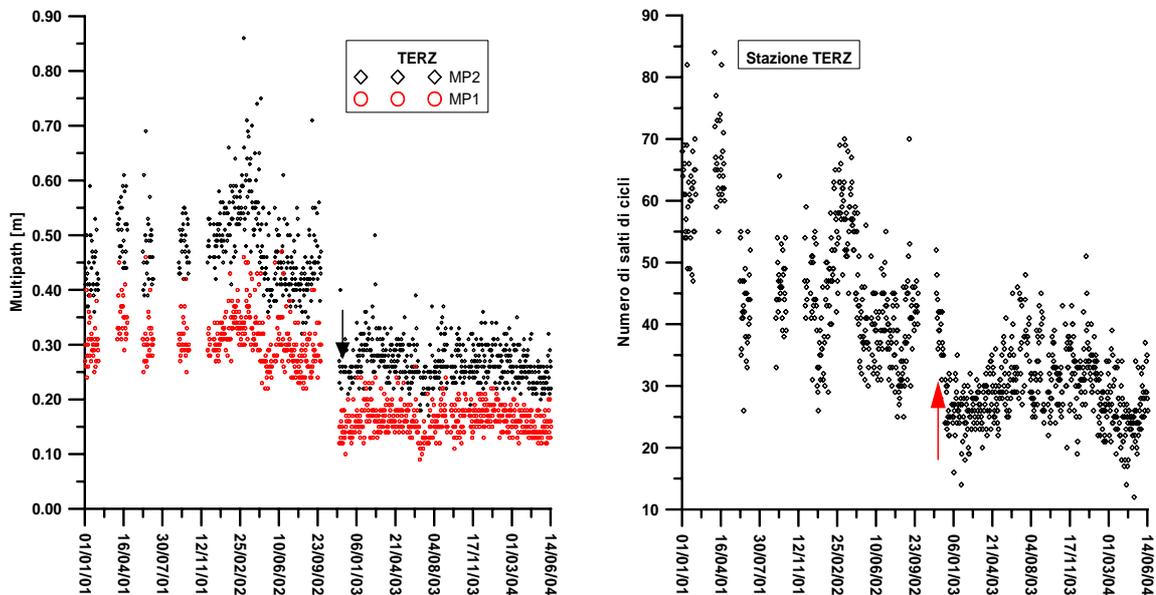


Fig. 15: Nel grafico a sinistra è mostrato l'andamento del multipath alla stazione TERZ. In rosso sono indicati i valori di MP1 ed in nero quelli di MP2. La freccia evidenzia il momento del cambio dell'antenna SR399 con la choke ring. Nel grafico a destra, invece, è rappresentato l'andamento del numero di salti di ciclo sempre alla stazione TERZ. La freccia rossa indica il momento di installazione dell'antenna choke ring.

Tab 11: *Media e deviazione standard di MP1, MP2 e del numero di salti di ciclo per la stazione TERZ, prima e dopo l'installazione dell'antenna choke ring.*

Antenna	Interna SR399	LEIAT504+R
Media MP1	0.310	0.165
Deviazione standard (MP1)	0,046	0,027
Media MP2	0,484	0,271
Deviazione standard (MP2)	0,076	0,038
Media numero salti di ciclo al giorno	47	31
Deviazione standard del numero di salti di ciclo/giorno	11	6

12. Ritardo ionosferico

L'interazione del segnale GPS con gli elettroni presenti nella ionosfera causa un ritardo, perciò la ionosfera, per il segnale GPS, rappresenta un mezzo dispersivo. Infatti, in tale tipo di mezzo, ogni componente di un treno d'onde si propaga con propria velocità, detta velocità di fase, mentre l'intero treno si muove con velocità chiamata velocità di gruppo.

La velocità di fase e quella di gruppo sono uguali in mezzi non dispersivi e corrispondono a quella della luce nel vuoto, invece nella ionosfera, la propagazione dipende dall'indice di rifrazione. Il segnale GPS, attraversando la ionosfera, subisce un ritardo di gruppo e un anticipo di fase, ovvero le misure di codice sono ritardate e quelle di fase sono anticipate. In altri termini, le pseudodistanze da codice sono più lunghe e quelle da fase sono più corte rispetto alla distanza geometrica tra satellite e ricevitore.

In base al principio di Fermat, la misura della distanza è definita dalla (15), dove l'integrale è esteso al percorso coperto dal segnale.

$$s = \int n ds \quad (15)$$

La distanza geometrica, s_0 , può essere ricavata ponendo l'indice di rifrazione $n = 1$, ovvero trascurando l'effetto della ionosfera.

$$s_0 = \int ds_0 \quad (16)$$

La differenza fra la distanza misurata e quella geometrica costituisce la rifrazione ionosferica, data dalla (17).

$$\Delta^{Ion} = \int n ds - \int ds_0 \quad (17)$$

Esplicitando, nella (17), gli indici di fase e di gruppo, eseguendo le semplificazioni del caso, si ottengono le (18).

$$\Delta_{ph}^{lon} = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 \qquad \Delta_{gr}^{lon} = \frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 \qquad (18)$$

Dove N_e rappresenta la densità degli elettroni ed f la frequenza. Si può definire con la (19) il contenuto totale di elettroni TEC.

$$TEC = \int N_e ds_0 \qquad (19)$$

Con questa posizione le (18) danno origine alle (20).

$$\Delta_{ph}^{lon} = -\frac{40.3}{f^2} TEC \qquad \Delta_{gr}^{lon} = \frac{40.3}{f^2} TEC \qquad (20)$$

Per eliminare l'errore ionosferico si può modellare il TVEC (Contenuto Totale Elettronico Verticale). Con questo approccio, il TEC va corretto per il cosiddetto fattore di obliquità $\cos(z)$. La relazione fra TVEC e TEC è data dalla (21), nella quale z rappresenta l'angolo zenitale del satellite.

$$TEC = \frac{TVEC}{\cos(z)} \qquad (21)$$

La modellazione del fattore TEC non è soddisfacente, perché esso è funzione, oltre che della frequenza, di molti fattori che dipendono dal tempo, come la densità degli elettroni, la quale dipende dall'attività solare e dall'alternarsi del giorno e della notte. Il metodo più efficace per ridurre fortemente l'effetto ionosferico è quello di impiegare due segnali con differenti frequenze, ed è proprio questo il motivo per cui il sistema GPS usa due portanti, L1 e L2. Quindi impiegando una opportuna combinazione lineare di misure di fase delle due frequenze è possibile considerare osservazioni con l'effetto della ionosfera ridotto, la cosiddetta ionofree. La combinazione lineare delle misure di fase che si usa, mostrata nella (22), è denominata combinazione Iono-Free L_3 , a cui corrisponde una lunghezza d'onda $\lambda_3 = \frac{c}{f_1 + f_2} \approx 11 \text{ cm}$.

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \qquad (22)$$

Analogamente, per le misure in codice, si usa la combinazione lineare espressa dalla (23)

$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2) \qquad (23)$$

Per quanto detto, la rete CGPS è composta esclusivamente da ricevitori a doppia frequenza. Trascurare l'effetto ionosferico comporta sulla baseline un errore dell'ordine di 1 ppm.

13. Ritardo troposferico

L'effetto della troposfera, che rappresenta la parte neutra dell'atmosfera interessata dal segnale GPS, è noto come rifrazione troposferica. Nell'attraversare tale strato, il segnale GPS subisce un ritardo. La troposfera rappresenta un mezzo non dispersivo per le onde radio fino a frequenze di 15 GHz (Bauersima, 1983; Hofmann-Wellenhof et al., 1997) e quindi anche per il segnale GPS.

Le strategie per tener in conto il ritardo troposferico sono due, stimarlo o modellarlo. Nell'elaborazione semiautomatica, la troposfera è modellata usando il modello di Hopfield modificato.

Nel 1969 Hopfield evidenziò la possibilità di separare l'effetto della troposfera dovuto alla parte secca da quello causato dalla parte umida, definendo la rifrattività come nella (24).

$$N^{Trop} = N_{Secca}^{Trop} + N_{Umida}^{Trop} \quad (24)$$

Dove N^{Trop} rappresenta la rifrattività totale, N_{Secca}^{Trop} quella relativa alla parte secca e N_{Umida}^{Trop} quella della umida.

Il ritardo troposferico è definito, perciò, dalla (25)

$$\Delta^{Trop} = \Delta_{Secca}^{Trop} + \Delta_{Umida}^{Trop} \quad (25)$$

Hopfield formulò la rifrattività sia della parte secca, sia di quella umida in funzione della quota, anche se il contributo dovuto alla zona umida è di difficile modellazione in quanto dipende fortemente dalla variazione spazio-temporale del vapor acqueo. La relazione proposta è quella della (26), dove la componente secca è funzione della pressione atmosferica e della temperatura, mentre quella umida della pressione parziale del vapor acqueo e della temperatura.

$$\Delta^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} [N_{Secca}^{Trop} h_{Secca} + N_{Umida}^{Trop} h_{Umida}] \quad \begin{aligned} N_{Secca}^{Trop} &= f(P, T) \\ N_{Umida}^{Trop} &= f(p, T) \end{aligned} \quad (26)$$

La (26) non tiene in conto l'angolo di incidenza del segnale GPS, perciò introducendo un fattore di obliquità la relazione diviene

$$\Delta^{Trop}(E) = \Delta_{Secca}^{Trop}(E) + \Delta_{umida}^{Trop}(E) \quad (27)$$

dove i termini a secondo membro dipendono, oltre che dalle grandezze precisate precedentemente anche da funzioni di mapping, che a loro volta sono funzione di E, la quale, espressa in gradi, rappresenta l'elevazione del satellite.

Le espressioni del ritardo troposferico per il modello Hopfield modificato sono quelle delle relazioni (28) e (29)

$$\Delta_{Secca}^{Trop}(z) = \frac{10^{-6} N_{Secca}^{Trop}}{(r_{Secca} - R_T)^4} \int_{r=R_T}^{r=r_{Secca}} \frac{r(r_{Secca} - r)^4}{\sqrt{r^2 - R_T^2 \sin^2 z_0}} dr \quad (28)$$

$$\Delta_{Umida}^{Trop}(z) = \frac{10^{-6} N_{Umida}^{Trop}}{(r_{Umida} - R_T)^4} \int_{r=R_T}^{r=r_{Umida}} \frac{r(r_{Umida} - r)^4}{\sqrt{r^2 - R_T^2 \sin^2 z_0}} dr \quad (29)$$

dove z_0 è l'angolo allo zenith dal punto di osservazione, R_T è il raggio della terra, r_{Secca} rappresenta il raggio della parte secca, r_{Umida} quello della parte umida e r il vettore posizione.

Janes et al., 1989, hanno stimato che il 90% della rifrazione è dovuta alla parte secca della troposfera e solo il 10% a quella umida.

Nella pratica, scelto il modello che descrive la rifrattività, si risolve la (27) per via numerica o analitica, dopo una opportuna espansione delle funzioni integrande (Hofmann-Wellenhof et al., 1997).

14. Elaborazione dei dati

I dati vengono elaborati con il software SKIPRO ed in tab. 12 sono mostrati i parametri di calcolo utilizzati. Ogni giorno vengono calcolate 19 linee considerando la stazione FRUL come quella di riferimento, in fig. 2 sono mostrate le baseline calcolate.

Tab. 12: Parametri di calcolo usati nell'elaborazione dei dati della rete CGPS.

Angolo di cut off	20°
Effemeridi	Broadcast
Modello ionosferico	Calcolato
Modello troposferico	Hopfield modificato
Tipo di soluzione	Iono free fixed
Uso del file di variazione del centro di fase delle antenne	

In fig. 16 sono mostrati, a titolo di esempio, gli andamenti di FRULACAE e FRULSANA per l'anno 2003. L'andamento generale non mostra variazioni statisticamente significative nell'arco dell'anno considerato.

L'affidabilità e la stabilità dell'intero sistema di monitoraggio sono andate migliorando dal 2001 al 2003. Un parametro che consente di valutare la bontà di tutta la filiera è la percentuale di dati elaborati e non quella dei dati raccolti, perché all'elaborazione vanno solo i dati che siano stati validati dal codice di verifica dei rinex e dal controllo di qualità del TEQC.

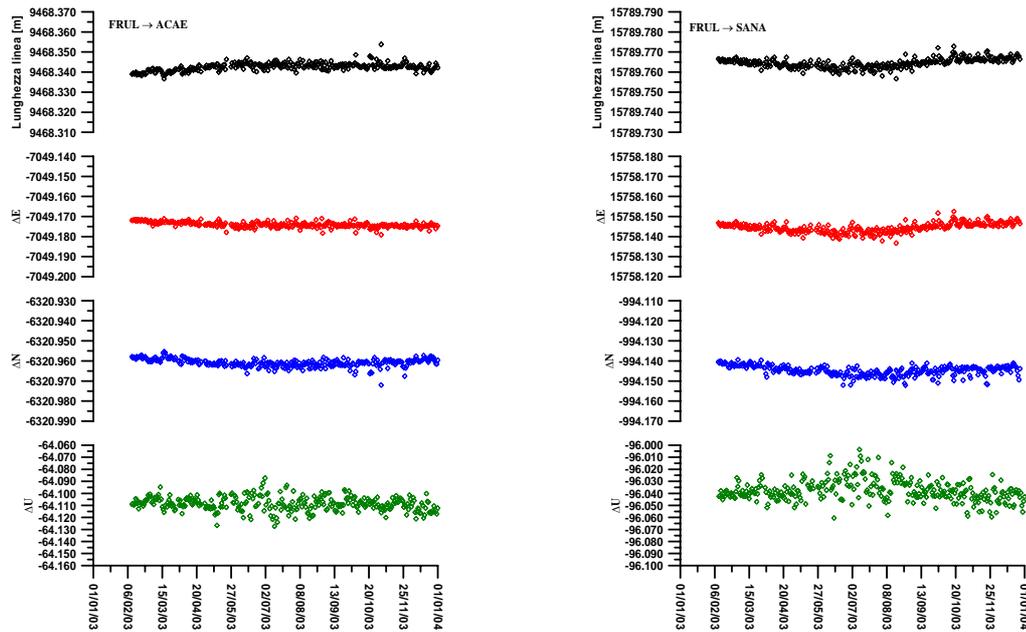


Fig. 16: Grafici raffiguranti la lunghezza della linea, ΔE , ΔN e ΔU per le linee base FRULACAE e FRULSANA.

In tab. 13 sono mostrate le percentuali dei dati elaborati dal 2001 al 2003 e per gli ultimi tre mesi del 2003. La prima colonna indica la linea calcolata, in essa è stata omessa l'indicazione della stazione di riferimento, in quanto cambiata nel corso del triennio. In tabella mancano i dati relativi alle linee BKES e ENAV, perché tali stazioni sono state installate alla fine del 2003.

Tab. 13: Percentuale di dati raccolti ed elaborati per l'intero anno 2003 e per gli ultimi tre mesi.

Linea	2001	2002	2003	Ottobre	Novembre	Dicembre
ACAE	81,10	81,92	96,31	96,77	100	100
AGRI			99,52	100	100	100
AQMO	84,88	98,36	94,46	100	100	100
ARFE	83,01	94,25	96,00	100	100	100
BAIA	87,40	97,81	96,61	100	100	100
FORI	83,55	95,89	93,23	100	96,67	100
IPPO	91,51	97,53	97,83	100	100	100
IPRO	-----	-----	98,75	93,55	100	100
LICO*	-----	-----	89,67*	100	100	100
MORU	86,03	92,88	96,00	100	83,33	100
ONPI	87,40	95,07	96,92	100	100	100
PRET	93,49	93,42	95,76	100	100	100
QUAR	83,84	96,99	97,85	100	100	100
RITE	88,77	92,33	94,15	100	100	100
SANA	90,41	94,52	96,61	100	100	100
SERR	84,95	95,07	83,08	100	100	100
TERZ	80,27	82,47	92,92	100	100	100
Totale	86,19	93,47	89,28	99,43	98,82	100

*Per LICO il calcolo della percentuale è stato effettuato trascurando il periodo di prova che andava dal DoY 66 al DoY 88.

15. Sistema informatico

L'Unità Funzionale di Geodesia si avvale di un sistema informatico che, interagendo con la banca dati, permette di concentrare, archiviare e pubblicare i dati provenienti sia dalla rete di monitoraggio GPS in continuo dell'area vulcanica napoletana sia quelli di campagne periodiche.

Il sistema si compone di 5 PC dedicati che, mediante collegamento telefonico con le stazioni GPS remote, assicurano giornalmente

- il controllo del funzionamento delle stazioni remote,
- lo scarico dei dati GPS,
- il riavvio delle sessioni di misura.

Tali PC client sono connessi al *fileserver* sulla rete intranet *geodesia* (sottorete privata) dove sono condivise le cartelle di archiviazione dei dati, organizzate con strutture ad albero, allo scopo di permettere il corretto reperimento delle informazioni sulla provenienza dei dati. Di seguito è mostrata la struttura ad albero per i dati GPS.

GPS → Continuo → Dati → Rawdata → Anno → Stazione

Un ulteriore server (il *database server*) archivia e distribuisce verso l'esterno le informazioni caratteristiche delle reti di monitoraggio, come, ad esempio, notizie sulla strumentazione e sulle tecniche. Tali informazioni sono organizzate secondo i modelli logici di un database di tipo relazionale (RDBMS). La presenza del database si è resa indispensabile al fine di associare ad ogni *dataset* (file di misura) contenuto nel *fileserver* il relativo contenuto informativo, necessario alla completa comprensione del dato, dal punto di vista sia qualitativo sia quantitativo. Il contenuto informativo spazia dalle caratteristiche del sito di misura, la monografia, alle sue modalità di acquisizione, come la strumentazione utilizzata e gli operatori di campagna.

L'esposizione diretta sia del *database-server* sia del *file-server* da e verso la rete internet esterna, ha inoltre reso indispensabile interfacciare tutti i processi di interrogazione e di download/upload dei dati. Di conseguenza è stato implementato, su piattaforma J2EE (java 2 Enterprise Edition), un software che utilizza JSP (Java Server Page) e Servlet per consentire, tramite protocollo http (Hyper Text Transfer Protocol), la gestione delle informazioni monografiche dei sensori distribuiti sul territorio e dei file dati attraverso pagine HTML dinamiche. Una maschera di accesso riservato permette, inoltre, di eseguire operazioni di upload e download di file dal server centrale, secondo opportuni criteri di filtro configurabili; il tutto, avvalendosi degli standard di sicurezza ACL (Access Control List) e degli algoritmi di hash (MD5) per ciò che concerne la crittografia.

Il sistema si pone, infine, come obiettivo l'utilizzo del formato XML (eXtended Markup Language) quale standard per la condivisione in rete delle informazioni monografiche dei siti di misura e delle caratteristiche di acquisizione dei dati geodetici.

16. Conclusioni

La ristrutturazione dell'INGV, avvenuta nel 2001, ha raggruppato in Unità Funzionali il personale delle singole sezioni. Questo tipo di organizzazione ha avuto l'indubbio vantaggio di incrementare la standardizzazione degli output ed aumentare l'efficienza dei singoli stadi lungo l'intera filiera produttiva. Nello specifico, per quanto riguarda la rete CGPS, dal punto di vista quantitativo, si è passati da una presenza del 20% ad una del 60% di strumenti di nuova generazione. I siti dotati di antenna choke ring sono passati da circa il 73% al 90% del totale. Nell'ultimo triennio sono state installate 5 nuove stazioni, aumentando, così, l'area coperta del distretto vulcanico napoletano. Dal punto di vista qualitativo, i miglioramenti nella monumentazione dei siti GPS (eliminazione dei pc, adozione di cavi a bassa dispersione, ricevitori di nuova generazione, antenne choke ring etc.) hanno permesso la ricezione di dati con un rapporto segnale rumore maggiore e un minore multipath, anche su stazioni dotate ancora di strumentazione di passata generazione. Lo sviluppo di un software di download dei dati ed in generale di gestione remota delle stazioni dotate di ricevitori Leica e Trimble ha costituito un notevole passo in avanti, perché ha reso possibile un trattamento omogeneo dei dati. Il passaggio dalla fase manuale a quella automatica di creazione dei rinex e la scrittura di un codice per il loro controllo ha quasi annullato le possibilità di errore che erano intrinsecamente legate alla fase di inizializzazione delle stazioni e alla metodologia di creazione manuale.

La funzionalità della rete CGPS è migliorata nel tempo e rappresenta oggi una ottima base per sviluppi futuri a carattere sia locale, monitoraggio dell'area vulcanica napoletana, sia nazionale.

Ringraziamenti

Desideriamo innanzitutto ringraziare il Direttore G. Macedonio per aver concesso la pubblicazione di questo open file report. Un sentito ringraziamento va a Folco Pingue, responsabile dell'Unità Funzionale, per lo stimolo ed i suggerimenti dati. Una particolare citazione a Paolo Capuano, Francesco Obrizzo e Vincenzo Sepe per la disponibilità dimostrata durante la stesura del lavoro. Uno speciale ringraziamento va ad Angelo Serio e Giulio D'Alessandro, che con la loro opera hanno reso possibile l'installazione di nuovi siti e l'implementazione di quelli già esistenti.

Desideriamo, infine, ricordare tutti coloro che, dall'interno e dal di fuori della nostra Unità, hanno in modo diverso contribuito alla buona riuscita del nostro lavoro.

Bibliografia

- Bauersima I. (1983), *NAVSTAR/Global Positioning System (GPS) II, Radiointerferometrische Satellitenbeobachtungen*. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, Berna, vol. 10.
- Berrino G., Borgstrom S. E. P., Capuano P., Cecere G., D'Alessandro A., De Martino P., Del Gaudio C., d'Errico V., La Rocca A., Malaspina S., Obrizzo F., Pinto S.,

- Ricciardi G. P., Ricco C., Russo A., Sepe V., Serio C., Siniscalchi V., Tammaro U., Aquino I., Tesauro M. (2002) *Sorveglianza geodetica nell'area vulcanica napoletana*. In Rendiconto sull'attività di sorveglianza, I.N.G.V., Osservatorio Vesuviano, I semestre (Gennaio-Giugno 2001), 22-69.
- Bonasia V., Ferri M., Montagna S. e Pingue F. (1974) *Le deformazioni del suolo quale mezzo d'indagine sulla dinamica vulcanica al Vesuvio ed a Vulcano*. Rivista Italiana di Geofisica: Bollettino dell'Associazione Geofisica Italiana, vol. XXIII, n. 3/4, 141-144.
- Bonasia V. e Pingue F. (1981) *Ground deformation on Mt. Vesuvius from 1977 to 1981*. Bulletin Volcanologique, 44-3, 513-520.
- Del Gaudio C., Borgstrom S., De Martino P. e Sepe V. (1999a), *Campi Flegrei: Rete GPS e stazioni in continuo*. In Rendiconto sull'attività di sorveglianza, Osservatorio Vesuviano, I semestre, 30-40.
- Del Gaudio C., Borgstrom S., De Martino P. e Sepe V. (1999b), *Ischia: Rete GPS*, in Rendiconto sull'attività di sorveglianza, Osservatorio Vesuviano, I semestre, 61-62.
- Del Gaudio C., Borgstrom S., De Martino P., D'Errico V., Ricciardi G.P., Ricco C., Sepe V. e Siniscalchi V. (2000), *Campi Flegrei: Stazioni in continuo*, in Rendiconto sull'attività di sorveglianza, Osservatorio Vesuviano, I semestre (Gennaio – Giugno 2000), 38-44.
- Esposito T., Grassi V., Malaspina S., Serio C. e Tammaro U. (2001), *Rilevamento dei movimenti del suolo al Somma-Vesuvio. Criteri di progettazione e prospettive di sviluppo delle reti esistenti*. Bollettino SIFET, n° 3, 31-46.
- Estey L. H., Meertens C. M. (1999), *TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS data*. GPS Solutions, vol. 3, No. 1, 42-49.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (1997), *GPS: Theory and Practice*. Springer, Wien.
- Imbò G., (1967), *Discorso del Prof. G. Imbò, Direttore dell'Osservatorio Vesuviano e Presidente dell'Associazione Geofisica Italiana*, in Annali dell'Osservatorio Vesuviano, sesta serie, a cura di G. Imbò. Volume VIII, supplemento celebrativo del 125° anniversario della istituzione dell'Osservatorio Vesuviano, 15-35.
- Pingue F., Obrizzo F., Tammaro U., Esposito T., Malaspina S. e Serio C. (2000a), *Vesuvio: Rete GPS in continuo*. In Rendiconto sull'Attività di Sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano, II Semestre (Luglio – Dicembre 2000), 18-21.
- Pingue F., Obrizzo F., Tammaro U., Esposito T., Malaspina S. e Serio C. (2000b), *Vesuvio: Rete GPS in continuo (CGPS)*. In Rendiconto sull'Attività di Sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano, I Semestre (Gennaio – Giugno 2000), 7-10.
- Janes H. W., Langley R. B., Newby S. P. (1989), *A comparasion of several models for the prediction of tropospheric propagation delay*. In Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Las Cruces, Nuovo Messico, Marzo 13-17, vol. 2, 777-788.