

Precisioni ottenibili dall'approccio PPP per finestre di osservazioni ridotte

Stefano Gandolfi, Luca Poluzzi, Luca Tavasci

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 401236 Bologna. Tel.0512093102, Fax 0516448073

Riassunto

L'approccio al posizionamento assoluto di precisione PPP (Precise Point Positioning) si sta rivelando una tecnica sempre più affidabile e consente di ottenere precisioni paragonabili a quelle del posizionamento differenziato, almeno considerando osservazioni di 24 ore. I vantaggi derivanti da tale approccio sono dovuti alla possibilità di ottenere coordinate assolute precise grazie ad un singolo ricevitore geodetico e senza l'ausilio di alcun tipo infrastruttura geodetica presente sul territorio. Per questo sono nati ormai diversi siti WEB che offrono gratuitamente, o a pagamento, servizi di elaborazione automatica del dato in PPP. Molte delle applicazioni per cui i vantaggi di questa tecnica potrebbero essere sfruttati necessitano però di tempi di stazionamento ben inferiori alle 24h. Proprio il tempo di acquisizione del dato è l'unico parametro fortemente impattante sulle soluzioni che l'utente possa gestire in questo caso. È stato quindi fatto uno studio con l'intento di definire le precisioni ottenibili da un calcolo PPP al variare della finestra di acquisizione dei dati GNSS. Il dataset utilizzato consiste in un anno di file giornalieri provenienti da 14 stazioni permanenti della rete EPN, ciascuno suddiviso in file di diversa durata al fine di simulare sessioni di misura via via più brevi: 12, 6, 3, 1 ora e mezzora. I risultati mostrano precisioni sub-centimetriche per osservazioni di 24 ore, che aumentano entro i 2 cm per tempi di 12, 6 e 3 ore. Per stazionamenti di 1 ora e mezzora si hanno precisioni rispettivamente entro e 5 e 10 cm. In termini di coerenza col frame di riferimento nessuna delle soluzioni presenta *bias* rilevanti in relazione alla precisione delle stesse.

Abstract

Precise Point Positioning is increasingly being used in geodetic applications, that, in many cases, are based on static 24-hour RINEX files. The obtainable accuracies are very close to the ones usual for the classic differenced approach. The PPP allows to have a precise absolute positioning by means of a single double frequency receiver and without any geodetic infrastructure in the survey area. Thus, several online services which allow automated PPP processing were published in the last years. In many technical applications that may take advantage by a PPP processing, the time of observing session must be much shorter than the 24 hours. Nevertheless, the observation time is the only impacting parameter on which a surveyor can act. For that reason in this test we evaluated the precisions obtainable by means of the PPP approach for different observing time spans. Dataset derives from one year of daily data acquired by 14 EPN permanent stations. Each files was split in several shorter ones, simulating independent observing sessions. The considered time spans are: 24,

12, 6, 3 hours and 1, ½ hour. The test shows that PPP precision for the 24 hour files is below 5 mm, but decreases slightly for the 12h, 6h and 3h observation sets. For the 1h and the ½h RINEX files, precision is within 5 cm and 10 cm, respectively. Moreover, all the solutions seems not to be biased with respect to the reference frames.

Introduzione

Nella moderna topografia la tecnica di rilievo GNSS è ormai nota e consolidata, sia in contesti scientifici che in contesti tecnici. La più comune e consolidata tecnica di trattamento dei dati si basa su un approccio differenziato per cui l'accuratezza delle soluzioni dipende fortemente da due parametri principali: la lunghezza della *baseline* ed il tempo di osservazione. L'accuratezza migliora al diminuire della distanza tra i punti contemporaneamente misurati ed all'aumentare dei tempi di osservazione. Come dimostrato da Soler et al. (2006) il secondo aspetto ha un'importanza molto maggiore del primo, in particolare se si considerano *baseline* di lunghezze comprese entro i circa 26 km e orbite precise come quelle ricalcolate dall'IGS. Per *baseline* di pochi km è possibile ottenere delle precisioni di ordine centimetrico anche con tempi di osservazione inferiori ad un'ora. Per questo motivo l'approccio relativo, in particolare se implementato con tecniche RTK o NRTK, viene diffusamente utilizzato per rilievi di natura tecnica.

L'approccio differenziato non è però l'unico che consente di raggiungere accuratze di ordine centimetrico (o sub-centimetrico). Negli ultimi decenni è stato sviluppato un approccio di calcolo denominato PPP (*Precise Point Positioning*) (Zumberge and Heflin 1997), che consente la stima delle coordinate geocentriche di un singolo ricevitore GNSS in acquisizione autonoma con grande precisione. Il PPP si sta affermando in particolare in ambito geodetico e geodinamico per via della grande flessibilità e rapidità di calcolo che esso consente, rispetto all'approccio differenziato, qualora si debbano processare reti di stazioni permanenti molto numerose ed estese nel tempo e/o nello spazio. In queste applicazioni vengono tipicamente elaborati file RINEX (*Receiver Independent Exchange format*) di 24 ore, ottenendo accuratze e ripetibilità delle coordinate paragonabili, se non migliori, di quelle che si hanno con l'approccio di calcolo relativo (Gandolfi et al. 2016).

Nelle applicazioni di natura tecnica il più delle volte non sono richiesti livelli di precisione altrettanto elevati, e un'accuratezza delle coordinate di livello sub-decimetrico può essere considerata soddisfacente. In questi contesti diventa invece fondamentale la riduzione dei costi, specialmente in termini di tempo necessario per eseguire il rilievo, ma anche in termini di strumentazione necessaria. Ci sono contesti in cui il PPP indiscutibili rispetto ai classici approcci relativi. Si pensi ad esempio ad aree remote in cui non esistano infrastrutture geodetiche passive sulle quali inquadrare un rilievo statico, non esistano servizi di posizionamento per il posizionamento di precisione in tempo reale ne stazioni permanenti o sia impossibile stabilire comunicazione radio/internet con una stazione *master*. Oppure, si pensi al vantaggio di svolgere un rilievo con un singolo "semplice" ricevitore geodetico, senza la necessità di radiotrasmettenti, modem o abbonamenti a servizi a pagamento (internet, NRTK, monografie ufficiali...).

Sulla base di queste considerazioni ci si è posti il problema di capire quali performance offre il PPP a fronte dei suddetti vantaggi operativi. Nel PPP le distanze relative tra i punti misurati non influenzano le precisioni ottenibili, per cui l'unico parametro fortemente impattante sui risultati è il tempo di osservazione. Ricerche su questo argomento sono già state svolte da vari autori (Héroux et al. 2004; Gandolfi et al. 2005; Ghoddousi-Fard e Dare 2006; Soykan et al. 2011), considerando vari

software di calcolo PPP e differenti dataset. A differenza di questi, nel lavoro qui presentato sono stati elaborati una quantità molto maggiore di dati ed è stato utilizzato il codice di calcolo PPP GIPSY (Webb e Zumberge 1997) nella versione 6.3, che consente la risoluzione delle ambiguità iniziali di fase. Nel test sono stati simulati tempi di acquisizione di diverse durate andando a dividere i RINEX giornalieri a disposizione, un anno di dati per 14 stazioni, considerando sessioni di 12, 6, 3, 1 ora e mezz'ora. I risultati ottenuti sono discussi in termini di ripetibilità delle soluzioni, coerenza con il frame di riferimento, probabilità di avere *outliers* ed infine in termini di rappresentatività dell'errore formale prodotto dal software di calcolo.

Dataset e calcolo geodetico

Al fine di avere un campione consistente si è deciso di analizzare un anno di dati, il 2013, prodotti da 14 stazioni permanenti della rete EPN situate in Italia e nelle aree limitrofe (Fig. 1). Per simulare sessioni di misura con tempi di osservazione inferiori alle 24 ore i file RINEX giornalieri contenenti dati a 30 secondi sono stati suddivisi, mediante TEQC, in sotto-file di diversa lunghezza. In particolare per ciascun file giornaliero sono stati generati:

- 2 file contenenti 12 ore di osservazioni;
- 4 file contenenti 6 ore di osservazioni;
- 8 file contenenti 3 ore di osservazioni;
- 24 file contenenti 1 ora di osservazioni;
- 48 file contenenti 30 minuti di osservazioni.

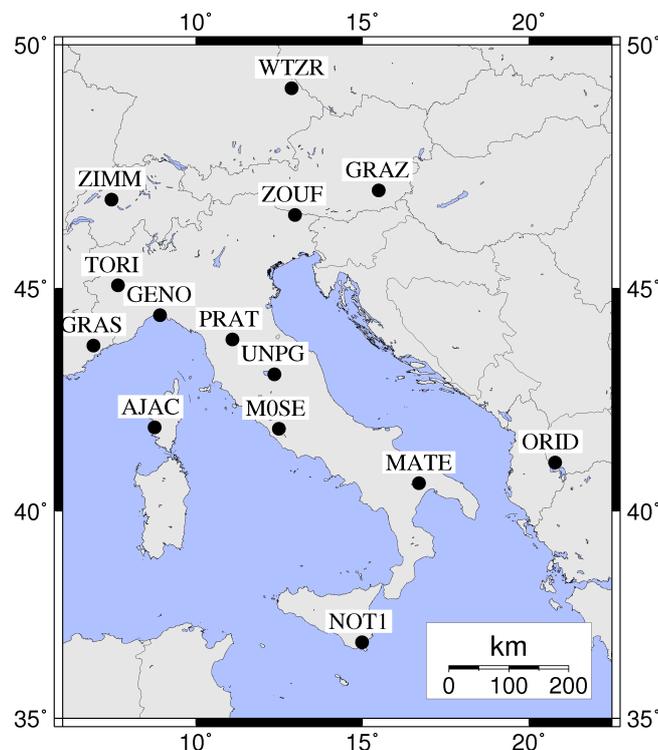


Figura 1 – Ubicazione delle 14 stazioni permanenti GNSS, appartenenti alla rete EPN, considerate per questo test.

Al termine di questa operazione il numero di file RINEX pronti l'elaborazione è arrivato a circa 445000, suddivisi come riportato in Tabella 1.

Ciascun file è stato calcolato autonomamente mediante approccio PPP utilizzando il software GIPSY-OASIS II nella versione 6.3. L'elaborazione è stata eseguita impostando i parametri standard consigliati dal JPL per le elaborazioni statiche, ad eccezione della funziona mappante della troposfera per cui è stata usata la VMF1 (Kouba 2008). Le soluzioni sono state ottenute fissando le ambiguità iniziali di fase grazie all'algoritmo WLPB (Bertiger et al. 2010) implementato in GIPSY.

Per ogni stazione GNSS	
Tempo di osservazione	n. di file RINEX
24 ore	365
12 ore	730
6 ore	1460
3 ore	2920
1 ora	8760
½ ora	17520

Tabella 1 – Riassunto del numero di file RINEX generati per ciascuna delle 14 stazioni GNSS analizzate a seguito del processo di divisione dei dati giornalieri.

Grazie all'utilizzo dei prodotti post-elaborati (orbite e parametri di trasformazione) messi a disposizione dal JPL stesso, queste soluzioni sono inquadrare nel frame di riferimento IGB08, ovvero la release più aggiornata dell'ITRS89 disponibile nell'anno 2013 al quale i dati si riferiscono.

Analisi delle soluzioni

Per valutare la consistenza rispetto al frame di riferimento delle soluzioni PPP, sono stati calcolati i residui rispetto alle soluzioni formali indicate nel file EPN_A_IGb08.SNX. Al fine invece di valutare la ripetibilità delle misure, si è usato come riferimento un modello della posizione di ciascun punto. Questo è stato stimato considerando sia il trend lineare sia i movimenti periodici, in modo che questi ultimi non inficiassero la stima della dispersione delle misure.

Il modello di spostamento di ciascun punto è stato calcolato considerando esclusivamente le soluzioni più accurate, ovvero quelle relative a file RINEX di 24 ore, per un periodo di tre anni, dal 2012 al 2014 compresi, in modo da stimare meglio le periodicità. Per questo è stato utilizzato il periodogramma di Lomb-Scargle (Lomb 1976; Scargle 1982), che ha la peculiarità di funzionare anche su serie di dati discontinue, determinando così le prime 5 frequenze in termini di potenza spettrale massima. Sulla base di queste, per mezzo di un processo iterativo ai minimi quadrati, è stato possibile stimare un modello di spostamento per ciascuna serie temporale caratterizzato da forme anche più complesse della semplice senoide.

Sono quindi stati calcolati i valori residui di ciascuna soluzione rispetto a tali modelli, di seguito v , i quali verranno qui considerati come il "valore vero" dell'errore commesso in ciascuna singola

misura e saranno l'oggetto principale dell'analisi dei risultati. A questi valori verranno confrontati quelli dell'errore formale che GIPSY stima per ciascuna soluzione, di seguito σ_{ppp} , che è l'unica informazione disponibile relativa all'accuratezza di un calcolo PPP nei casi in cui non si disponga di una serie temporale di dati che costituisca una statistica.

Risultati e discussione

Il primo aspetto che si è voluto valutare è se la riduzione del tempo di osservazione introduca o no un *bias* nell'allineamento delle soluzioni rispetto al frame di riferimento formale IGb08. Sono quindi state calcolate le medie dei residui rispetto alle soluzioni IGb08 per ogni stazione ed in ogni componente. Tali valori, mediati sulle 14 stazioni in modo da ottenere una statistica generale, sono riportati in Tabella 2.

Tempo di osservazione	Media dei residui rispetto alle soluzioni formali IGb08. (mm)		
	N	E	U
½ ora	2,7	13,0	6,7
1 ora	2,4	3,7	5,6
3 ore	2,5	1,0	4,8
6 ore	2,5	0,8	4,9
12 ore	2,7	0,9	4,7
24 ore	2,8	0,9	4,6

Tabella 2 – Valori medi dei bias tra le soluzioni PPP calcolate per i diversi tempi di osservazione e le soluzioni formali del frame IGb08.

Osservando i residui per i tempi di osservazione più lunghi, dalle 3 ore in su, si può dire che questi siano del tutto in linea rispetto a quelli riportati in (Gandolfi et al. 2016) e relativi ad osservazioni di 24 ore. Osservando i valori dei *bias* relativi ai tempi di osservazione inferiori, un ora e mezzora, si vede come questi siano leggermente superiori, se pur di ordine centimetrico, ma questo dato va analizzato anche in relazione alla maggiore dispersione di tali soluzioni. Per definire "accurate" le soluzioni è infatti necessario che la deviazione standard della media campionaria sia compatibile col *bias* rispetto al valore di riferimento.

Spostiamo ora l'attenzione sulla dispersione delle soluzioni attorno ai valori delle coordinate supposti "veri", quelli dei modelli stimati. Analizzando i residui v delle coordinate ottenute appare che, in particolare per le soluzioni relative ai RINEX di mezzora, ne esistano un certo numero che hanno un residuo vicino al mezzo metro o anche più. Ci si è chiesti per prima cosa se è possibile individuare tali soluzioni osservando l'errore formale fornito dal software, valutando poi quante siano percentualmente questi "outliers". Per definire quale sia il valore di soglia oltre il quale una soluzione possa essere definita un *outlier* è necessario definire un valore oltre al quale le soluzioni si debbano considerare "sbagliate" e quindi da rigettare, e questo dipenderà ovviamente dall'applicazione che si vuole fare delle misure svolte. Per questo test è stata fatta la scelta, del tutto arbitraria, di assumere come "sbagliate" tutte le soluzioni con un residuo superiore ai 30 centimetri. Fatto questo assunto, un tecnico che dispone dell'errore formale σ_{ppp} per essere "certo" che la sua soluzione cada all'interno dei 30 cm di errore, dovrebbe assicurarsi che il valore di σ_{ppp} della sua soluzione sia inferiore ai 10 cm. Questo in quanto, statisticamente, quasi il 100% dei valori di una

distribuzione normale (supponiamo tale la distribuzione dei residui v) cadono nell'intervallo di più o meno tre volte lo scarto quadratico medio della distribuzione stessa.

Tempo di oss.	AJAC	GENO	GRAS	GRAZ	M0SE	MATE	NOT1	ORID	PRAT	TORI	UNPG	WTZR	ZIMM	ZOUF	Valori medi
24 ore	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12 ore	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
6 ore	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1
3 ore	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2
1 ora	0.0	2.3	0.0	0.1	0.2	1.0	13.5	0.0	0.1	0.9	0.1	0.1	0.0	0.1	1.3
½ ora	41.3	86.0	45.3	33.8	39.0	73.0	88.7	43.7	65.6	76.4	55.8	28.7	44.5	55.8	55.5

Tabella 3 – Percentuali di outliers identificabili osservando gli errori formali σ_{ppp} , avendo considerato errori le soluzioni con tale valore superiore ai 10 cm.

Osservando la Tabella 3 si vede come la percentuale di *outliers* sia praticamente nulla per tempi di osservazione superiori alle 3 ore, mentre per i RINEX di un ora questa raggiunga l'1%. La percentuale di soluzioni sbagliate, secondo il criterio arbitrario assunto in questo test, diventa invece importante per i RINEX di mezzora, che solo nella metà circa dei casi forniscono errori accettabili. Si può inoltre notare che la stazione di NOT1 sia caratterizzata da soluzioni di peggiore qualità, identificabili però attraverso l'errore formale. Gli *outliers* così individuati per mezzo dell'errore formale sono stati rimossi dalle serie temporali dei residui v .

Ci si è poi chiesti se tra le soluzioni restanti, che si sarebbe portati a ritenere affidabili, ce ne fossero ancora alcune affette da un errore superiore ai 30 cm, non evidenziato statisticamente dall'errore formale. Sono stati quindi conteggiati i residui v , cioè “veri errori” di ciascuna soluzione, rimanenti ed in Tabella 4 vengono riportate le percentuali di questi che hanno un valore superiore ai 30 cm.

Obs. time	AJAC	GENO	GRAS	GRAZ	M0SE	MATE	NOT1	ORID	PRAT	TORI	UNPG	WTZR	ZIMM	ZOUF	Mean Value
1 ora	0.2	1.0	0.1	0.1	0.2	0.6	1.2	0.1	0.5	0.4	0.3	0.0	0.2	0.3	0.4
½ ora	0.4	0.8	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.8	0.7	0.3	0.4	0.2	0.9	0.4

Tabella 4 – Percentuali di outliers non identificabili attraverso l'errore formale, ovvero che presentano un residuo superiore ai 30 cm nonostante un errore formale inferiore o uguale ai 10 cm.

Sono stati riportati solamente i valori relativi ai file RINEX di un ora e di mezzora, in quanto per i tempi di osservazione più lunghi le percentuali sono nulle per tutte le stazioni. Anche in questo caso la stazione più problematica è quella di NOT1, mentre mediamente solo nello 0,4% dei casi l'errore formale σ_{ppp} non si è rivelato sufficiente per l'individuazione degli *outliers*.

Anche le soluzioni così individuate come sbagliate sono state quindi eliminate dalle serie temporali dei residui v , che sono quindi stati analizzati con maggior dettaglio per determinare quali siano le precisioni del PPP per le soluzioni ritenute accettabili.

Per ogni serie temporale dei residui “puliti” dagli *outlier* è stato quindi calcolato lo scarto quadratico medio di questi, ed i risultati sono riportati in Tabella 5. La precisione delle soluzioni PPP si confermano su valori millimetrici per i tempi di osservazione più lunghi, mentre cominciano a calare sensibilmente considerando file RINEX inferiori alle 3 ore. Per file di un’ora le precisioni rimangono comunque contenute entro i 5 cm, almeno in planimetria, mentre per quelli di mezzora le precisioni sono di ordine sub-decimetrico.

SITO	24 ore			12 ore			6 ore			3 ore			1 ora			1/2 ora		
	σ_N	σ_E	σ_U															
AJAC	2	2	6	4	3	7	4	3	10	5	7	15	17	39	48	28	57	60
GENO	2	2	6	4	3	8	5	4	12	7	8	19	24	49	68	31	69	75
GRAS	3	2	5	4	4	6	5	6	10	7	10	16	16	35	44	27	55	61
GRAZ	2	2	5	3	2	6	4	4	9	5	6	12	16	33	40	33	66	67
M0SE	2	2	5	4	4	8	4	5	11	5	8	15	16	36	42	31	60	64
MATE	2	2	5	3	2	7	4	3	9	5	8	16	17	38	55	26	53	66
NOT1	2	3	8	4	5	11	6	8	18	8	13	26	21	49	70	24	61	65
ORID	2	2	6	5	5	11	5	5	12	6	10	16	14	32	41	22	50	54
PRAT	2	2	5	4	3	7	4	3	10	6	7	15	22	48	61	34	67	76
TORI	2	2	6	3	3	8	4	4	11	6	8	17	20	40	56	32	67	75
UNPG	2	2	5	4	11	11	4	4	10	6	6	14	18	37	49	29	60	66
WTZR	3	2	5	4	3	8	5	4	11	6	6	16	18	37	41	41	71	75
ZIMM	4	3	5	5	4	6	5	5	9	6	6	12	15	30	37	27	53	57
ZOUF	3	2	6	4	3	7	5	4	10	7	9	17	24	43	57	40	74	80
Valori medi (mm)	2	2	5	4	4	8	5	4	11	6	8	16	18	39	51	30	62	67

Tabella 5 – Scarti quadratici medi delle serie temporali dei residui v , relativi alle soluzioni PPP ritenute accettabili a seguito della fase di individuazione degli outliers. Tutti i valori riportati sono espressi in mm.

Bisogna però ricordare che le soluzioni relative ai file di mezzora qui valutate sono solamente la metà circa di quelle totali. Come si può notare osservando i valori medi riportati in Tabella 5, la componente Est risulta essere meno precisa di quella Nord, in particolare per quanto riguarda le soluzioni relative ai file più corti.

È stato mostrato come l’errore formale σ_{ppp} possa in effetti essere considerato come uno strumento affidabile nell’individuazione degli outliers. Ci si è quindi chiesti se lo si possa ritenere anche uno strumento rappresentativo della reale precisione delle soluzioni PPP ottenute. Per valutare questo aspetto sono stati messi in relazione gli errori formali delle soluzioni “pulite” dagli outliers con i rispettivi residui v . In Fig. 2 sono riportati entrambe i valori in scala semi-logaritmica. Come si può notare una buona parte delle soluzioni giacciono all’esterno delle linee nere, che rappresentano i valori di $3\sigma_{ppp}$, ovvero quella soglia all’interno della quale si dovrebbero trovare il 99,9 % delle soluzioni nel caso in cui l’errore formale rappresentasse perfettamente la reale precisione delle soluzioni. Nell’immagine non è percepibile la densità di punti rappresentati, per cui sono state calcolate le percentuali delle soluzioni che giacciono all’esterno delle linee nere, ovvero quelle per le quali l’errore reale viene sottostimato dall’errore formale fornito da GIPSY. Tali percentuali sono riportate in Tabella 6 e tendono ad essere maggiori per le soluzioni più precise, ovvero quelle relative ai tempi di osservazione maggiori. Anche in questo caso i valori relativi ai RINEX di mezzora vanno osservati tenendo a mente che la metà delle soluzioni sono state precedentemente rigettate.

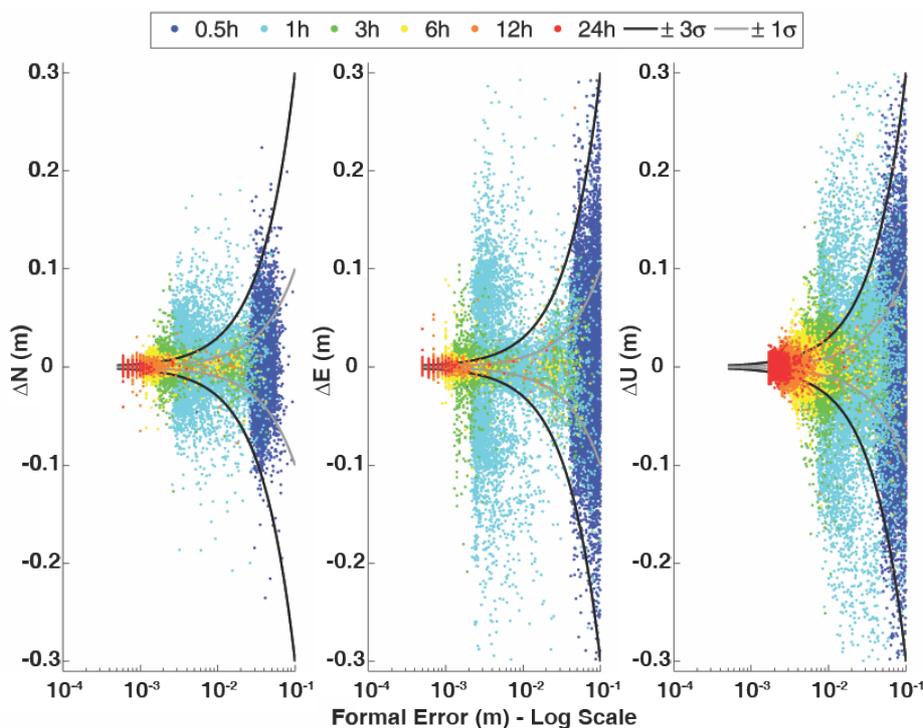


Figura 2 – Rappresentazione dei residui v , in ascissa, in funzione degli errori formali σ_{ppp} , in ordinata logaritmica. Le linee grigie rappresentano i valori di ascissa pari a σ_{ppp} , mentre quelle nere rappresentano i valori di $3\sigma_{ppp}$.

In generale si può dire che GIPSY, probabilmente a causa della maggiore ridondanza delle osservabili contenute nei file più lunghi, tenda a sovrastimare la precisione di queste soluzioni, che in realtà non risulta così direttamente correlata col numero di epoche calcolate.

Tempo di oss. (ore)	Soluzioni con un residuo v_{kj} maggiore di $3\sigma_{ppp}$		
	N	E	U
0.5	1%	1%	1%
1	22%	24%	19%
3	31%	28%	24%
6	41%	35%	28%
12	51%	40%	31%
24	47%	44%	36%

Tabella 6 – Percentuali delle soluzioni per cui l'errore formale fornito da GIPSY sovrastima la reale precisione.

Se da un lato l'errore formale si è rivelato un buono strumento per individuare le soluzioni largamente sbagliate, questo non sembra essere uno strumento altrettanto affidabile per stimare il reale errore delle soluzioni. In particolare dalla Fig. 2 si vede che ci sono casi in cui il punto giace anche a distanze di 6-8 volte l'errore formale

Conclusioni

In questo lavoro è stato analizzato l'approccio di calcolo Precise Point Positioning, con l'intento di valutare le prestazioni che questo può offrire nel caso in cui si operi con tempi di osservazione inferiori alle 24 ore. Dal punto di vista delle precisioni (SQM degli errori) sono stati confermati per i file di 24 ore i valori millimetrici già riscontrati in altre pubblicazioni. Considerando file RINEX della durata di 6 e 12 ore le precisioni rimangono di ordine sub-centimetrico, mentre per tempi di osservazione di 3 ore si raggiungono valori intorno al centimetro in planimetria ed 1,5 cm in quota. Per RINEX della durata di un'ora le precisioni sono rispettivamente di circa 2, 4, e 5 cm nelle componenti Nord, Est ed Up. Le soluzioni relative a tempi di acquisizione di mezzora forniscono precisioni sub-decimetriche, almeno in planimetria, a fronte però di una elevata percentuale di *outliers* che rende sconsigliabili stazionamenti così brevi.

Dal punto di vista dell'accuratezza, intesa come vicinanza del valore medio delle soluzioni calcolate rispetto a quello di riferimento IGB08, si può dire che le soluzioni PPP rimangano consistenti col frame ufficiale a livello millimetrico o comunque statisticamente compatibile con le precisioni che le caratterizzano.

Dal momento che un tempo di acquisizione di poche ore è tipico di rilievi che non vengono ripetuti se non a distanza di molto tempo, si è considerato il fatto che chi si trovasse a calcolare file RINEX come quelli qui analizzati disporrebbe esclusivamente della stima dell'errore commesso fornita automaticamente dal software di calcolo. È quindi fondamentale in primis che questo indicatore permetta di individuare con la massima affidabilità almeno gli errori più grossolani. Assumendo arbitrariamente i 30 centimetri come soglia di errore oltre la quale si vuole considerare la soluzione da rigettare, si è visto che l'errore formale permette di individuare con affidabilità quasi assoluta questi casi. Analizzando invece la capacità dell'errore formale fornito da GIPSY di stimare la reale precisione delle soluzioni, si è visto che in quasi il 20-40% dei casi questa viene sovrastimata, talvolta anche di molto.

Bibliografia

- ❖ Bertiger W, Desai SD, Haines B, Harvey M, Moore AW, Owen S, Weiss JO (2010) Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. *J Geod* 84(5):327–337
- ❖ Gandolfi S, Gusella L, Milano M (2005) Precise point positioning: studio sulle accuratze e precisioni ottenibili. *Boll di Geod e Sci Affin* 64:227–253.
- ❖ Gandolfi S, Tavasci L, Poluzzi L (2016) Improved PPP performance in regional networks. *GPS Solut* . 20: 485. doi:10.1007/s10291-015-0459-z
- ❖ Ghoddousi-Fard R, Dare P (2006) Online GPS processing services: An initial study. *GPS Solut* 10:12–20. doi: 10.1007/s10291-005-0147-5
- ❖ Héroux P, Gao Y, Kouba J, Lahaye F (2001) Products and applications for Precise Point Positioning-Moving towards real-time. *Proc. ION GNSS 2004*, Institute of Navigation, Long Beach, CA, September 21-24: 1832–1843
- ❖ Kouba J (2008) Implementation and testing of the gridded Vienna mapping function 1 (VMF1). *J Geod* 82(4–5):193–205
- ❖ Lomb NR (1976) Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys Space Sci* 39(2):447–462
- ❖ Scargle JD (1982) Studies in astronomical time series analysis. II- Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys J* 263:835–853

- ❖ Soycan M, Alta E (2011) Precise point positioning versus traditional solution for GNSS networks. *Sci Res Essays* 6:799–808. doi: 10.5897/SRE10.799
- ❖ Soler T, Michalak P, Weston ND, et al (2006) Accuracy of OPUS solutions for 1- to 4-h observing sessions. *GPS Solut* 10:45–55. doi: 10.1007/s10291-005-0007-3
- ❖ Webb FH, Zumberge JF (1997) An introduction to GIPSY/OASIS II. JPL Publication D-11088, Jet Propulsion Lab, Pasadena
- ❖ Zumberge J, Heflin M (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, 102(B3), 5005–5017, doi:10.1029/96JB03860