

STUDIO SPERIMENTALE SULLA RELAZIONE TRA VARIAZIONI DI VAPORE ACQUEO RILEVATE CON GNSS ED EVENTI DI PIOGGIA INTENSI E LOCALIZZATI

EXPERIMENTAL STUDY ON THE RELATION BETWEEN GNSS -DERIVED WATER VAPOR VARIATIONS AND EXTREME LOCALIZED RAIN EVENTS

Stefano Barindelli

DICA - Politecnico di Milano, 20133, Milano, stefano.barindelli@mail.polimi.it

PAROLE CHIAVE: GPS, vapore acqueo, troposfera, precipitazione intensa, PWV, ricevitori low cost

KEY WORDS: GPS, water vapor, troposphere, extreme rain events, PWV, low-cost receivers

RIASSUNTO

Uno studio sperimentale sull'impiego di osservazioni GNSS per il monitoraggio del vapore acqueo atmosferico è stato condotto su Piemonte e Lombardia, in corrispondenza di due fenomeni di pioggia intensa e localizzata.

I dati GNSS della rete SPIN e quelli meteorologici delle reti ARPA delle due regioni sono stati utilizzati per ricavare ritardi troposferici zenitali e da questi vapore acqueo precipitabile (PWV). Validati con dati indipendenti provenienti da radiosondaggi, le serie temporali di PWV sono state quindi confrontate con mappe radar di precipitazione del Centro Meteo Lombardo, per individuare la presenza di andamenti caratteristici in corrispondenza dei fenomeni di pioggia considerati. I risultati mostrano come una rete regionale di ricevitori GNSS sia in grado di rilevare eventi di pioggia intensi spazialmente estesi; mostrano altresì come le inter-distanze di tali ricevitori (40-50 km) siano troppo elevate rispetto a fenomeni molto localizzati, la cui estensione spaziale si limita a qualche km.

L'uso di ricevitori a basso costo, che renderebbe fattibile economicamente la densificazione delle reti geodetiche, è stato infine valutato. Malgrado i risultati ottenuti nel presente lavoro siano del tutto preliminari, essi confermano le potenzialità di tali ricevitori, anche se il loro uso richiede maggiori sforzi nell'elaborazione del dato, principalmente legato alla disponibilità di una sola frequenza.

ABSTRACT

An experimental study involving the use of GNSS observations for atmospheric water vapor monitoring was conducted in Piedmont and Lombardy regions in Italy, regarding two severe and localized rain events.

GNSS data of SPIN network and the meteorological ones from the two regional ARPA networks were used to obtain zenith tropospheric delays and from these the precipitable water vapor (PWV). Validated with independent radiosonde data, the PWV temporal series were compared with radar precipitation maps of Centro Meteo Lombardo, to identify the presence of characteristic trends in correspondence of the considered rain events. Results show that a regional network of GNSS receiver can detect spatially wide extreme rain events; they show also that the inter-distances of such receivers (40-50 km) are too long with respect to very localized phenomena, whose spatial extent is limited to some km.

The use of low-cost receivers, which would make the densification of geodetic networks economically feasible, was finally evaluated. Although the results obtained in this paper are quite preliminary, they confirm the potentiality of these receivers, despite their use requires more effort in data processing, mainly due to the availability of only one frequency.

1. INTRODUZIONE

I Sistemi di Navigazione Satellitare Globale (GNSS), che includono il Global Positioning System (GPS) realizzato dagli Stati Uniti, sono nati con lo scopo primario di consentire il posizionamento sulla superficie terrestre. Questi sistemi hanno attraversato un processo di miglioramento nella precisione massima raggiungibile durante il posizionamento. Oltre agli sviluppi tecnologici, questo obiettivo è stato raggiunto anche grazie alla modellizzazione e successiva rimozione dei ritardi nella trasmissione dei segnali. Uno di questi è il ritardo troposferico, causato dalla presenza di gas e vapore acqueo prevalentemente nella parte più bassa dell'atmosfera. Il suo effetto sulla propagazione del segnale può essere modellato e rimosso in termini di una quantità chiamata Zenith Total Delay (ZTD). Questo ritardo è da intendersi nella direzione zenitale della singola stazione GNSS ed è legato ai ritardi troposferici del segnale nella direzione di ciascuno dei satelliti in vista dal ricevitore, detti Slant Total Delay (STD). Se la temperatura e la

pressione in prossimità dei ricevitori GNSS considerati sono note, i valori di ZTD possono essere utilizzati per monitorare la presenza di vapore acqueo in atmosfera. Infatti, lo ZTD è dato dalla somma di due quantità: lo Zenith Hydrostatic Delay (ZHD) e lo Zenith Wet Delay (ZWD):

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1)$$

Lo ZHD rappresenta il ritardo nella propagazione del segnale GPS causato dai gas in equilibrio idrostatico nella troposfera ed ammonta a circa 1-2 metri nella distanza satellite ricevitore (Leick et al., 2015). Invece lo ZWD dipende principalmente dal vapore acqueo e provoca un ritardo nella trasmissione del segnale indicativamente di qualche decina di cm (Leick et al., 2015). Da quest'ultimo è possibile risalire al vapore acqueo precipitabile o Precipitable Water Vapour (PWV), che rappresenta l'altezza della colonna d'acqua equivalente alla massa di vapore per unità di area sopra il singolo ricevitore GNSS considerato.

Il PWV è un'importante variabile meteorologica di difficile modellazione e previsione. Essa può essere ricavata da stime GNSS di ZTD e da misure di pressione e temperatura superficiale in corrispondenza della stazione GNSS considerata. Si ricordi che la meteorologia GNSS in senso stretto nasce negli anni '90 (Bevis et al., 1992) quando per la prima volta sono state ricavate delle serie temporali di PWV a partire dai ritardi troposferici dei segnali GNSS.

Il presente lavoro riguarda la possibilità di utilizzare serie temporali di PWV ottenute tramite GNSS nel monitoraggio di fenomeni di piogge estreme e localizzate. A tale scopo sono stati presi in esame due eventi meteorologici, uno più localizzato ed uno più esteso, che hanno investito le regioni Piemonte e Lombardia il 22 e il 26 luglio del 2016, per valutare come questi si riflettono nelle stime GNSS di vapore acqueo. Studi precedenti hanno evidenziato una relazione tra le variazioni spaziali e temporali del PWV ed eventi di precipitazione intensa (Shoji et al. 2013, Realini et al., 2014)

Le osservazioni GNSS del periodo che va dal 17 al 30 luglio 2016 registrate dalla rete permanente di Piemonte e Lombardia (progetto SPIN, gestito dalla regione Piemonte) sono state elaborate per ricavare serie temporali di ZTD con risoluzione ai 30 secondi su ognuna delle 30 stazioni della rete. I valori di pressione e temperatura, necessari per ricavare serie temporali di PWV, sono stati messi a disposizione dalle agenzie ARPA Lombardia ed ARPA Piemonte.

L'esperienza ha confermato che è possibile rilevare fronti di pioggia estesi mediante una rete permanente, ma che per i fenomeni più locali occorre impiegare una rete più densa (qualche chilometro tra i ricevitori).

Inoltre l'esperienza ha valutato la possibilità di densificare la rete regionale sfruttando ricevitori GNSS a basso costo, che potrebbero garantire la fattibilità economica di questa idea. La principale problematica di tali ricevitori risiede nella qualità del segnale, che oltre a essere più rumoroso rispetto a quello dei ricevitori geodetici tradizionali, è limitato alla sola frequenza L1. Per ovviare a tali mancanze rispetto ai ricevitori geodetici tradizionali, l'elaborazione dei dati provenienti da questi ricevitori deve essere supportata dall'implementazione di tecniche ad hoc. Un esempio è la necessità di rimuovere il ritardo ionosferico dalle osservazioni L1. Per fare ciò, in questo lavoro si applica il modello Satellite-specific Epoch-differenced Ionospheric Delay (SEID) sviluppato dal German Research Centre for Geosciences (GFZ - Deng et al., 2009). Osservazioni sulla seconda frequenza che nel ricevitore a basso costo non sono disponibili e che sono utili a generare osservazioni iono-free (BH-Wellenhof et al., 1997), vengono ricavate a partire da quelle di stazioni in doppia frequenza poste nelle vicinanze.

Le serie temporali di ZTD sono state ottenute mediante il software open source goGPS (Realini et al., 2013; Herrera et al., 2016), gestito e sviluppato dal Politecnico di Milano e dal suo spin-off GReD. La stima è stata ottenuta elaborando i dati delle singole stazioni tramite la tecnica del Precise Point Positioning (PPP) con filtro di Kalman (Zumberge et al., 1997; Yang et al., 2006; Bisnath et al., 2008). Le serie temporali sono state sottoposte a validazione esterna mediante il confronto con valori di PVW ottenuti da due stazioni di radiosondaggio situate nell'area d'interesse: Milano-Linate e Cuneo-Levaldigi. Un ulteriore confronto è stato condotto, solo sul primo dei due eventi, con i risultati ottenuti dall'elaborazione degli stessi dati in PPP effettuata con il software scientifico Bernese V5.2 (Dach et al., 2015).

Dopo una presentazione dei modelli utilizzati nelle applicazioni meteorologiche del GNSS nel paragrafo 2, nel paragrafo 3 viene presentato in dettaglio il caso studio incentrato su due eventi di pioggia intensa che hanno interessato le regioni Piemonte e Lombardia. Le conclusioni seguono nel paragrafo 4.

2. PRINCIPI TEORICI

Come riportato nel Paragrafo 1, il calcolo delle serie temporali di PWV in corrispondenza delle stazioni GNSS è possibile a partire dalle stime GNSS di ZTD.

Dapprima si ricavano i valori di ZHD di ciascuna stazione mediante il modello di Saastamoinen (Saastamoinen et al., 1972):

$$ZHD = 0.0022768 P (1 + 0.00266 \cos 2\varphi + 0.00028 H) \quad (2)$$

dove P è la pressione superficiale nella posizione di interesse; φ è la latitudine dell'antenna GPS; H è l'altezza ortometrica della stazione espressa in chilometri.

Quindi si ottengono gli ZWD sottraendo gli ZHD dagli ZTD.

I valori di PWV sono legati agli ZWD attraverso un fattore moltiplicativo Q:

$$PWV = Q \cdot ZWD \quad (3)$$

Il fattore di conversione Q nel caso in esame è stato ricavato mediante la seguente formula (Askne e Nordius, 1987):

$$Q = \frac{10^8}{\rho R_w \cdot ((k_3 / T_m) + k_2')} \quad (4)$$

con $\rho = 1,000$ [kg m⁻³] che è la densità dell'acqua liquida; $R_w = 461,5$ [J kg⁻¹] che è la costante specifica dei gas per il vapore acqueo; $k_3 = 3,739 \cdot 10^5$ [K² mbar⁻¹] che è una costante di rifrattività atmosferica (Bevis et al., 1994); T_m che è la temperatura pesata media dell'atmosfera espressa in [K]; $k_2' = k_2 - mk_1$, con $m = M_w/M_d = 0,622$ che è dato dal rapporto tra la massa molare del vapore acqueo e quella dell'aria secca.

Una valida alternativa è il cosiddetto modello annuale (Evardson et al., 2000), ottenuto dall'analisi di più di 120000 profili di radiosondaggio in Europa:

$$Q = a_0 + a_1\varphi + a_2\sin\left(2\pi\frac{t_D}{365}\right) + a_3\cos\left(2\pi\frac{t_D}{365}\right) \quad (5)$$

dove t_D è il giorno dell'anno considerato; φ è la latitudine e $a_0 = 5,882$, $a_1 = 0,01113$, $a_2 = 0,064$, $a_3 = 0,127$ sono quattro parametri. Come è possibile osservare dall'equazione (4), Q è legato da un legame di proporzionalità inversa a T_m , la quale a sua volta dipende dalla temperatura superficiale mediante diverse relazioni di regressione riportate in letteratura. La più utilizzata è quella riportata in Bevis et al., 1992, che è stata ottenuta dopo un'analisi statistica di due anni di osservazioni di 13 stazioni di radiosondaggio situate negli Stati Uniti:

$$T_m = 70,2 + 0,2 \cdot T_s \quad (6)$$

Le reti regionali permanenti GNSS non sono dotate di sensori di pressione e temperatura, quindi i valori di queste due quantità in corrispondenza dei ricevitori considerati devono essere ricavati interpolando spazialmente i dati rilevati dalle reti meteorologiche ARPA Piemonte e Lombardia. Durante questo procedimento, occorre tenere conto delle variazioni spaziali delle due variabili meteorologiche in questione. Poiché le variazioni planimetriche di pressione e temperatura sono molto contenute, si è deciso di attribuire ad ogni stazione GNSS i valori della stazione meteo più vicina (nearest neighbour planar interpolation). La variazione di pressione e temperatura con le quote invece non può essere trascurata. Generalmente ad un incremento di quota corrisponde un abbassamento sia dei valori di pressione che di temperatura.

Per la pressione sono stati ottenuti applicando la seguente correzione:

$$P_{unk} = P_{know} \cdot \exp\left(-\frac{gM_d(H_{unk} - H_{know})}{R \cdot T_{ISA}}\right) \quad (7)$$

dove P_{unk} è la pressione in corrispondenza della stazione GNSS; P_{know} è la pressione nel luogo dove è situato il sensore; h_{unk} è l'altezza ortometrica nel luogo dove la pressione è incognita; h_{know} è l'altezza ortometrica nel luogo in cui è situato il sensore; $M_d = 0,022896$ [kg mol⁻¹] è la massa molare dell'aria secca; $T_{ISA} = 288,15$ [K] rappresenta la temperatura standard internazionale a livello del livello del mare; $R = 8,31432$ [J mol⁻¹ K⁻¹] è la costante dei gas per l'aria.

Per la temperatura invece è stata usata la seguente formula:

$$T_{unk} = T_{know} + 0,0065 \cdot (H_{know} - H_{unk}) \quad (8)$$

con 0,0065 che è il gradiente verticale della temperatura atmosferica nella troposfera; T_{unk} che è la temperatura nel luogo dove è incognita; T_{know} che è la temperatura nel luogo dove è situato il sensore; h_{unk} che è l'altezza ortometrica nel luogo dove la pressione è incognita; h_{know} che è l'altezza ortometrica nel luogo in cui è situato il sensore.

3. CASO STUDIO SPERIMENTALE

Il caso studio riguarda due diversi eventi di pioggia intensi che si sono verificati rispettivamente il 22 luglio (Fig. 9) e il 26 luglio (Fig. 10) 2016 su parte del Nord Italia. Il primo è caratterizzato da un esteso fronte di pioggia intensa che si è spostato da Ovest verso Nord-Est coprendo le regioni di Piemonte e Lombardia nell'arco di 6 ore. Il secondo evento è molto diverso da quello appena descritto: celle sparse di precipitazione si sono sviluppate su buona parte del territorio considerato, in un processo di continua formazione e dissipazione durato, anche in questo caso, all'incirca 6 ore. In particolare, come riportato in seguito, per l'evento del 26 luglio, l'attenzione è stata focalizzata sulla cella convettiva evidenziata in rosso nell'ultima immagine radar di Figura 10.

I dati GNSS della rete SPIN (Fig. 1), gestita dalla regione Piemonte, e quelli di pressione e temperatura provenienti dalle stazioni meteorologiche di ARPA Piemonte ed ARPA Lombardia (Fig. 2) sono stati analizzati per ricavare delle serie temporali di PWV. Cinque delle trenta stazioni SPIN, e in particolare ALSN, DEMN, GOZZ, SERR e VIGE, non sono state considerate in questo elaborato per la presenza di un alto numero di outlier e di prolungate discontinuità delle osservazioni di codice e fase. Un totale di 25 stazioni sono quindi state effettivamente utilizzate in questo lavoro. Mentre i dati forniti da queste 25 stazioni sono omogenei sia in termini di risoluzione temporale (1 dato ogni 30 secondi) che di formato, quelli di temperatura e pressione delle 34 stazioni meteorologiche considerate sono stati interpolati temporalmente, raggiungendo una risoluzione di 30 secondi. Dopo aver interpolato anche orizzontalmente (nearest neighbour) i valori di pressione e temperatura, ed averli corretti secondo le equazioni (7) ed (8), si sono ottenute delle serie temporali di queste due grandezze fisiche in corrispondenza dei ricevitori GNSS. È stato dunque possibile ottenere delle serie di PWV caratterizzate da una risoluzione temporale di 30 secondi.

In Figura 3 è riportata la posizione delle due stazioni di radiosondaggio considerate, una in Lombardia (16080, Milano-

Linate) e una in Piemonte (16113, Cuneo-Levaldigi), utilizzate per la validazione dei dati GNSS (validazione esterna).

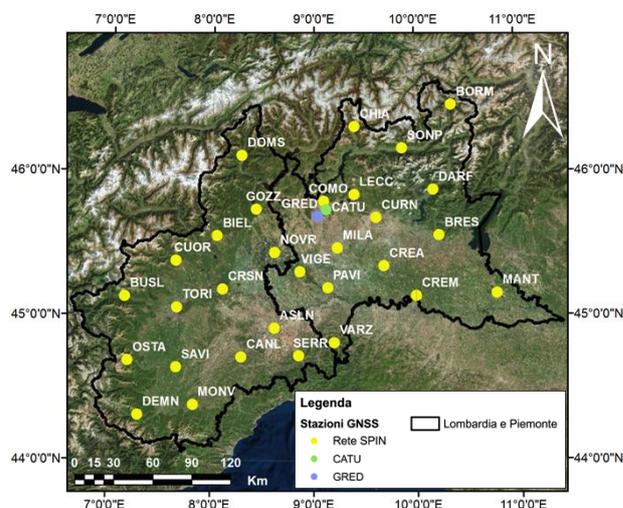


Figura 1. Ricevitori GNSS considerati: tutti fanno parte di SPIN a parte CATU (rete NetGEO) e GRED (ricevitore low-cost)

I dati di PWV delle stazioni GNSS di MILA e SAVI (Fig. 1), le due stazioni più vicine a quelle di radiosondaggio, sono stati messi a confronto con quelli ottenuti tramite i radiosondaggi stessi. Le statistiche delle differenze effettuate su 28 valori di PWV simultaneamente stimati da GNSS e dal radiosondaggio sono riportati in Tabella 1, per i due eventi in esame. In entrambi i casi, le stime di PWV ottenute a partire dal software goGPS tendono ad essere maggiori rispetto a quelle ottenute tramite i radiosondaggi, con una deviazione standard che si attesta al di sotto dei 2 mm, valore che coincide con l'errore di misura strumentale delle radiosonde.

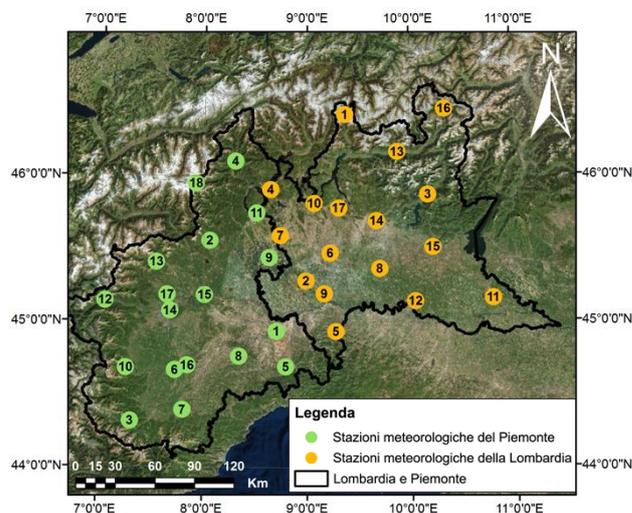


Figura 2. Stazioni meteorologiche rese disponibili da ARPA Piemonte ed ARPA Lombardia; le stazioni rappresentate sono un sottoinsieme delle reti complete, selezionato per il presente lavoro

PWV _{goGPS} - PWV _{radiosonde}	media [mm]	sqm [mm]
SAVI - Cuneo	1,37	1,55
MILA - Linate	1,78	1,84

Tabella 1. Media e scarto quadratico medio delle differenze tra i valori di PWV ottenuti con goGPS per le stazioni di SAVI e MILA e quelli dei radiosondaggi

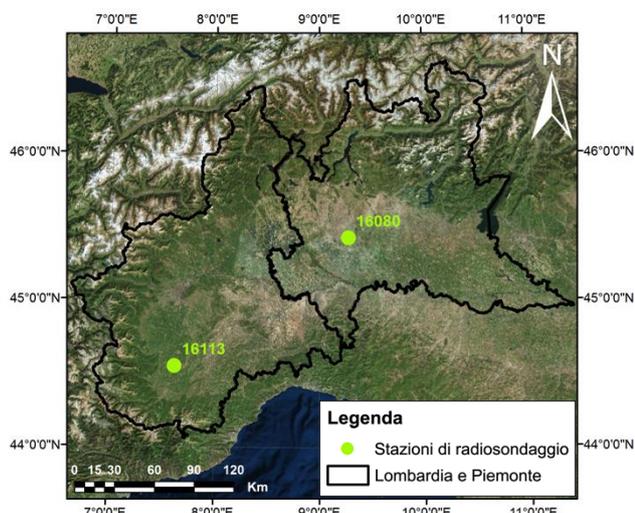


Figura 3. Stazioni di radiosondaggio disponibili nell'area di interesse

Un comportamento analogo si è riscontrato nel confronto con i risultati del Bernese, dove si conferma per ciascun ricevitore GNSS la presenza di una leggera sovrastima nei valori di PWV ottenuti da goGPS, con uno scarto quadratico medio intorno ai 2 mm (Tab. 2). In questo caso il raffronto è stato possibile per l'evento del 22 luglio 2016, includendo anche i due giorni a cavallo dello stesso, per un totale per stazione GNSS di 430 valori di differenze tra i valori di PWV ottenuti con goGPS e quelli ottenuti con il Bernese.

Stazione GNSS	PWV _{goGPS} – PWV _{Bernese}	
	Media [mm]	Sqm [mm]
BIEL	1,0	2,2
BORM	1,5	2,0
BRES	1,2	1,7
BUSL	1,7	2,1
CANL	0,9	1,6
CHIA	2,4	2,1
COMO	1,1	2,0
CREA	0,9	1,9
CREM	0,9	1,8
CRSN	0,6	1,9
CUOR	0,5	2,1
CURN	1,2	1,8
DARF	1,4	2,3
DOMS	1,6	2,2
LECC	1,4	2,0
MANT	1,2	1,6
MILA	0,9	1,7
MONV	0,4	2,0
NOVR	0,9	1,8
OSTA	1,4	2,3
PAVI	0,9	1,7
SAVI	0,8	1,6
SONP	1,5	1,8
TORI	0,9	2,0
VARZ	1,1	1,6

Tabella 2. Media e deviazione standard delle differenze tra i valori di PWV ottenuti con goGPS e con il Bernese

È importante ricordare che il Bernese e goGPS applicano l'algoritmo del PPP in modo differente: il primo infatti implementa in post-processamento una compensazione ai minimi

quadrati di tutte le osservazioni raccolte nella sessione considerata (in questo caso giornaliera); goGPS invece stima i valori di ZWD ad una data epoca basandosi sulle osservazioni delle epoche precedenti e adottando un filtro di Kalman esteso (Sansò, 2006). La sovrastima nei valori di PWV potrebbe essere dovuta da come il filtro di Kalman è stato implementato all'interno del software goGPS. La serie temporale di PWV della stazione GNSS di COMO inerente all'evento del 22 luglio con le relative immagini radar sono riportate in Figura 4.

Si è scelto arbitrariamente di presentare i risultati relativi alla stazione GNSS di COMO per una questione di chiarezza espositiva. Tutte le considerazioni restano valide per la totalità dei ricevitori GNSS interessati dal fenomeno. Dal raffronto tra la serie di PWV e le immagini radar, emerge chiaramente come il passaggio del fronte porti al raggiungimento di un picco massimo di PWV in corrispondenza del momento centrale, che è quello in cui il fronte circonda le stazioni in esame. Successivamente si verifica un crollo netto che si arresta una volta che il fronte è completamente passato.

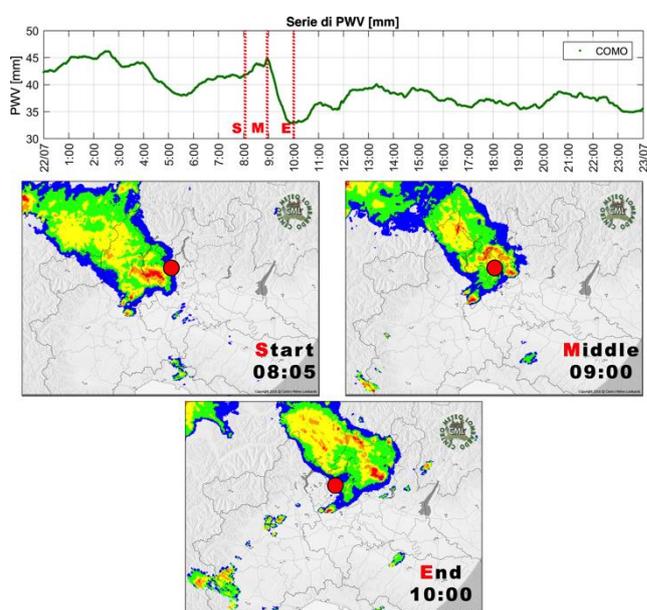


Figura 4. PWV della stazione di Como comparato con tre immagini radar, che mostrano l'arrivo (S), il momento centrale (M) e la fine (E) dell'evento di pioggia del 22 luglio sulla stazione stessa. L'orario è espresso in UTC

Il comportamento prima dell'evento di pioggia non è chiaramente identificabile in quanto cambia di stazione in stazione. Questo può essere causato dalla natura stessa dello ZWD, che pesa i ritardi di tutti i satelliti in vista senza considerare la direzione di arrivo del fronte. In ogni caso va sottolineato che, pur essendo molto importante per lo sviluppo di temporali e piogge intense, il PWV non è la sola variabile meteorologica che influenza questo tipo di eventi. Dai risultati relativi al primo evento di pioggia considerato si può concludere che eventi meteorologici estesi possano essere efficacemente monitorato mediante l'impiego di una rete regionale di ricevitori GNSS.

Invece l'evento di pioggia del 26 luglio, di estensioni minori e nessun trasporto, richiede invece una rete con risoluzione spaziale maggiore.

In figura 5 sono rappresentati gli andamenti temporali di PWV per le stazioni di MILA, COMO e CATU. Le prime due appartengono al network SPIN mentre CATU è stata aggiunta con lo scopo di densificare la rete stessa.

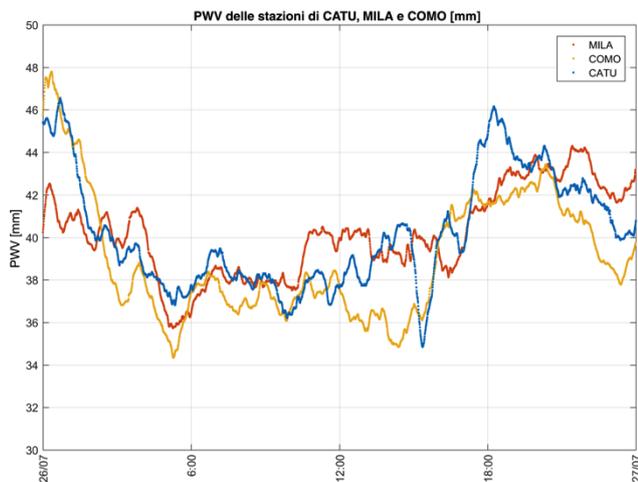


Figura 5. Andamenti di PWV delle stazioni di MILA (arancione), COMO (giallo) e CATU (azzurro) interessate dall'evento del 26 luglio. L'orario è espresso in UTC

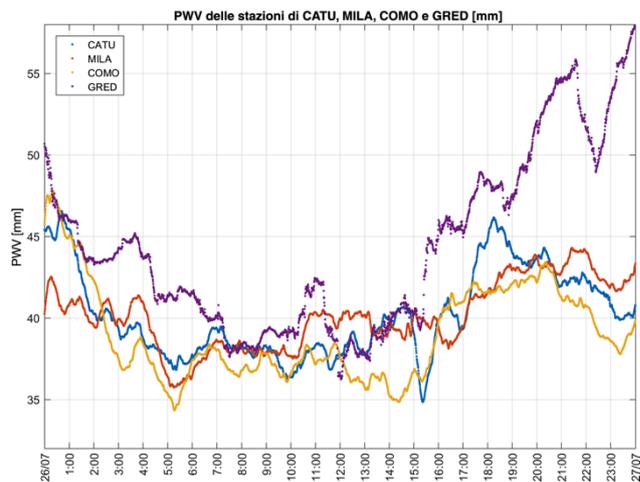


Figura 6. Raffronto tra i valori di PWV della stazione di GRED (viola) e quelli di MILA (arancione), COMO (giallo) e CATU (azzurro). L'orario è espresso in UTC.

Dagli andamenti emerge che, senza la presenza della stazione di CATU, i soli ricevitori appartenenti al network SPIN non sarebbero stati in grado di rilevare la cella di pioggia considerata. L'unico crollo nell'andamento di PWV, indice del passaggio del fronte piovoso di interesse, si riscontra infatti in corrispondenza della stazione geodetica di CATU attorno alle 16:30 UTC, orario di arrivo del temporale.

Siccome questo evento si è sviluppato sovrastando completamente il ricevitore GRED a basso costo situato a Lomazzo (in provincia di Como), anch'esso aggiunto per densificare maggiormente la rete di ricevitori, è stato possibile paragonare le serie di PWV ottenute con quest'ultimo con quelle delle tre stazioni precedenti (Fig. 6).

Dal paragone emerge che, soprattutto precedentemente all'evento considerato, le stazioni di CATU e GRED, poste ad una distanza reciproca di circa 8 km, mostrano un comportamento simile. Ulteriori analisi devono però essere condotte per capire la crescita anomala nei valori di PWV della stazione di GRED, che inizia intorno alle 15:00 UTC. Questa crescita avviene proprio in corrispondenza del momento in cui ci si aspetterebbe una diminuzione dei valori di PWV per via del passaggio del fronte di pioggia, in linea con le considerazioni fino ad ora fatte.

Ulteriori sviluppi delle tecniche software impiegate per elaborare i dati provenienti da ricevitori low cost dovranno essere previste sia per migliorare l'affidabilità delle serie temporali di PWV ottenibili, sia per evitare comportamenti anomali come quello visibile in Figura 6.

Per concludere, un rapido raffronto è stato fatto tra gli ZTD ufficiali attualmente disponibili per l'assimilazione in modelli meteorologici sul territorio italiano, fornite dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), ed i valori ottenuti con goGPS e il Bernese.

In particolare è stato possibile effettuare questo confronto per le stazioni GNSS di COMO (Fig. 7) e di TORI (Fig. 8), che appartengono anche alla rete ASI e che sono state interessate entrambe dal primo evento di pioggia.

Questo confronto, oltre a voler dimostrare che l'informazione attualmente disponibile tramite la rete ASI è insufficiente per il monitoraggio di eventi di precipitazione intensa e breve, è da intendersi anche come un'ulteriore validazione della procedura, con stime di ZTD ricavate in modo sostanzialmente diverso da quanto visto fino ad ora.

La prima differenza che emerge risiede nella risoluzione temporale. ASI fornisce una stima di ZTD ogni 30 minuti, mentre è possibile raggiungere una risoluzione temporale di 30 secondi (utilizzando orbite e clock satellitare adatti può essere anche minore). Nel caso di monitoraggio di eventi di pioggia estremi che accadono in un periodo di tempo relativamente breve, una bassa risoluzione temporale può portare ad una perdita di informazione inerente all'evento stesso. Infatti può essere visto in Figura 7 che, attorno alle 9:00 UTC, sia il Bernese che goGPS presentano una decrescita negli ZTD di intensità maggiore rispetto alle stime fornite da ASI. Questo si traduce in una sottostima del valore di picco e una sovrastima di quello di minimo causati dal passaggio del fronte.

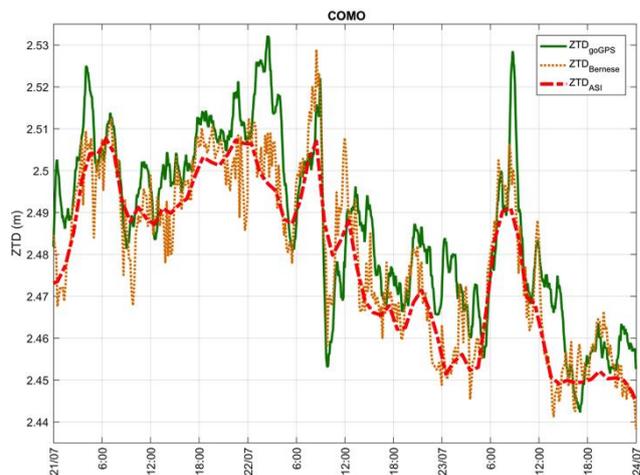


Figura 7. Paragone tra i valori di ZTD forniti da ASI (rosso) con quelli ottenuti con goGPS (verde) ed il Bernese (arancione) per la stazione di COMO, relativi al primo evento di pioggia. Il tempo è espresso in UTC.

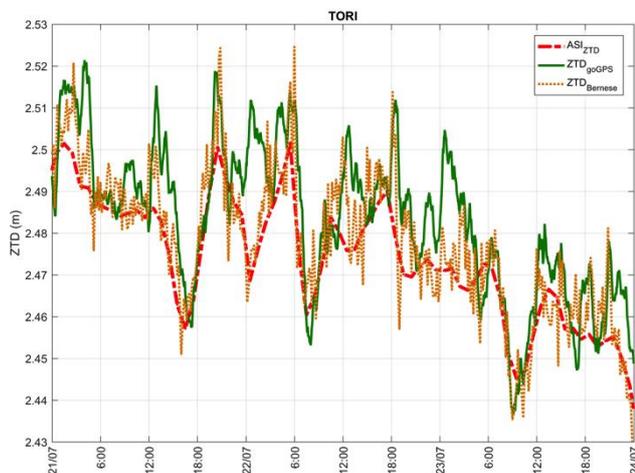


Figura 8. Confronto tra i valori di ZTD forniti da ASI (rosso) con quelli ottenuti con goGPS (verde) ed il Bernese (arancione) per la stazione di TORI, relativi al primo evento di pioggia. Il tempo è espresso in UTC.

4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato affrontato il problema del monitoraggio di eventi di pioggia intensi e localizzati, valutando il contributo dato dalle osservazioni di vapore acqueo ottenibili con il GNSS. A partire da due eventi di pioggia verificatisi sulle regioni Piemonte e Lombardia nel luglio 2016, un'analisi a posteriori del PWV ricavato tramite GNSS è stata svolta per cercare possibili precursori dei due eventi stessi. Gli ZTD sono stati ricavati dall'analisi di osservazioni GNSS di fase combinate secondo il modello iono-free e raccolte dalla rete SPIN nell'arco delle due settimane in cui i due eventi si sono verificati. Per questo scopo è stato usato il software open source goGPS, in grado di eseguire una stima dei valori di ZTD basandosi sull'algoritmo del PPP con filtro di Kalman esteso. I valori di pressione e temperatura necessari per ricavare i PWV dagli ZTD sono stati ottenuti dai dati delle stazioni di ARPA Lombardia e ARPA Piemonte, usando tecniche di interpolazione temporale e spaziale appropriate. Le serie temporali di PWV così ottenute sono state validate con i valori di PWV forniti dai radiosondaggi: le stime sono tra loro concordi, con differenze di 1-2 mm di deviazione standard. Inoltre, le performance di goGPS sono state valutate tramite un confronto con i valori di PWV ricavati mediante il Bernese. Le differenze tra le stime ottenute con i due software sono giustificabili dal differente approccio di implementazione: il filtro di Kalman per goGPS ed i minimi quadrati per il Bernese. Un comportamento comune è stato individuato nelle serie temporali di PWV corrispondenti al passaggio del primo evento di pioggia, caratterizzato da un fronte esteso in movimento da Ovest verso Nord-Est: una forte decrescita dopo il passaggio del fronte di pioggia sui ricevitori GNSS interessati. Lo stesso comportamento non è sempre trovato nelle serie ufficiali di PWV ricavabili dai dati ufficiali di ASI, a causa principalmente del loro andamento più liscio e della loro più bassa risoluzione temporale. Dall'analisi del secondo evento di pioggia, caratterizzato dallo sviluppo di celle sparse che interessano solo aree di pochi km quadrati, emerge il bisogno di una risoluzione spaziale maggiore. Reti più dense di ricevitori GNSS potrebbero fornire le osservazioni necessarie. Questo è stato verificato sperimentalmente comparando le serie di PWV ottenute da 4 diversi ricevitori GNSS: eventi di pioggia intensa non hanno influenza sui valori di PWV ricavati dai ricevitori vicini al fenomeno. Solo nei ricevitori direttamente interessati dal fenomeno vi si trova traccia nelle serie temporali di PWV.

Infine, sempre per il secondo evento di pioggia, i valori di PWV ottenuti da un ricevitore GNSS in singola frequenza sono stati usati e confrontati con quelli di CATU, la stazione geodetica più vicina. Il comportamento generale della serie temporale di PWV ricavata dal ricevitore a basso costo è simile a quello della stazione di CATU, ma in corrispondenza dell'evento di interesse il trend delle due serie si differenzia molto, richiedendo una indagine più approfondita. Anche se i ricevitori a basso costo sono una soluzione promettente per una densificazione delle reti esistenti, essi presentano ancora dei limiti tecnologici per cui sono richieste ulteriori calibrazioni.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare la Prof.ssa Giovanna Venuti, che mi ha dato la possibilità di realizzare questo elaborato. I suoi consigli sono stati indispensabili, così come quelli del Dott. Eugenio Realini, che mi ha sempre guidato con passione ed abilità. Vorrei anche ringraziare il Dott. Andrea Gatti per non aver mai fatto mancare il suo supporto. Altri ringraziamenti vanno al Dott. Alessandro Fermi per aver reso fruibili i risultati processati con il software Bernese e ad ARPA Piemonte ed ARPA Lombardia per aver fornito i dati meteorologici impiegati. Infine si ringrazia il Servizio di Posizionamento Interregionale SPIN per aver reso disponibili i dati GNSS.

Bibliografia

- Askne J., & Nordius H., 1987. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, 22(03), 379-386.
- Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A., & Ware R. H., 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15787-15801.
- Bevis M., Businger S., Chiswell S., Herring T. A., Anthes R. A., Rocken C., & Ware R. H. (1994). GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of applied meteorology*, 33(3), 379-386.
- BH-Wellen Hof H. L., & Collins J., 1997. *Global Positioning System: theory and practice*.
- Bisnath S., & Gao Y., 2008. Current state of precise point positioning and future prospects and limitations. *Observing our changing earth*, 615-623.
- Dach R., Lutz S., Walser P., & Fridez P., 2015. Bernese GNSS software version 5.2.
- Deng Z., Bender M., Dick G., Ge M., Wickert J., Ramatschi M., & Zou X., 2009. Retrieving tropospheric delays from GPS networks densified with single frequency receivers. *Geophysical Research Letters*, 36(19).
- Emardson T. R., & Derks H. J. 2000. On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere. *Meteorological Applications*, 7(1), 61-68.
- Herrera A. M., Suhandri H. F., Realini E., Reguzzoni M., & de Lacy M. C., 2016. goGPS: open-source MATLAB software. *GPS solutions*, 20(3), 595-603.

Leick A., Rapoport L., & Tatarnikov D., 2015. *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons.

Realini E., Sato K., Tsuda T., & Manik T., 2014. An observation campaign of precipitable water vapor with multiple GPS receivers in western Java, Indonesia. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(1), 17.

Realini E., & Reguzzoni M., 2013. goGPS: open source software for enhancing the accuracy of low-cost receivers by single-frequency relative kinematic positioning. *Measurement Science and technology*, 24(11), 115010.

Saastamoinen J., 1972. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *The use of artificial satellites for geodesy*, 247-251.

Sansò F., 2006. Navigazione geodetica e rilevamento cinematico. Polipress.

Shoji Y., 2013. Retrieval of water vapor inhomogeneity using the Japanese nationwide GPS array and its potential for prediction of convective precipitation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 91(1), 43-62.

Yang, Yuanxi, & Gao, W., 2006. An optimal adaptive Kalman filter. *Journal of Geodesy*, 80(4), 177-183.

Zumberge J., Heflin M., Jefferson D., Watkins M., Webb F., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. B3 102:5005-5017

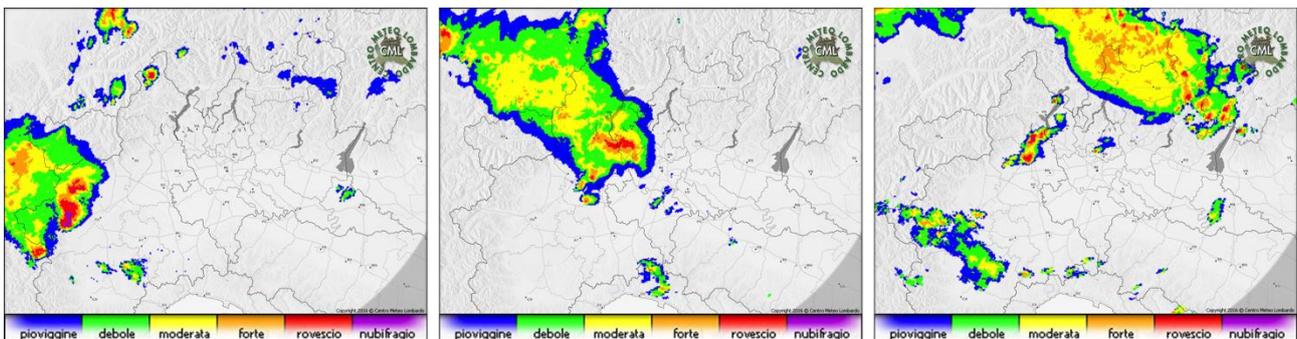


Figura 9. Progressione temporale dell'evento di pioggia del 22 luglio visibile tramite una successione di immagini radar. La prima immagine si riferisce alle 05:00; quella centrale alle 08:00; la terza alle 11:00. Il tempo è espresso in UTC.

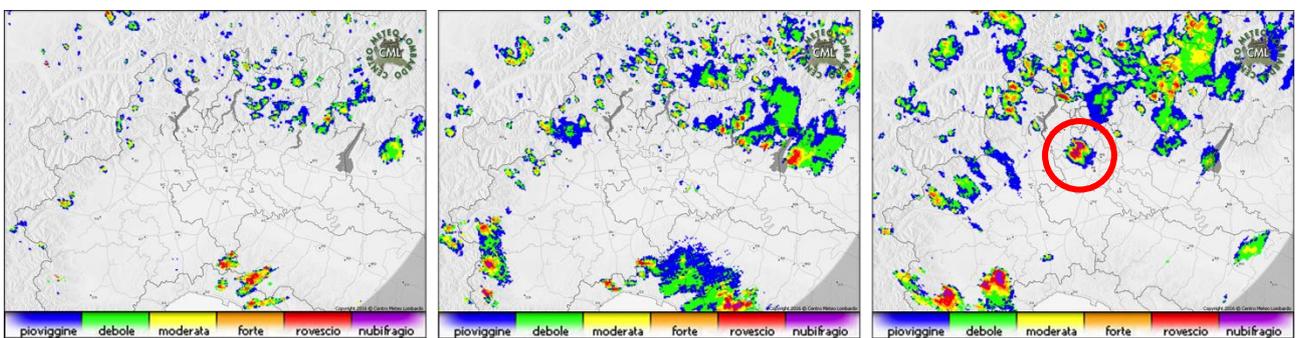


Figura 10. Progressione temporale dell'evento di pioggia del 26 luglio visibile tramite una successione di immagini radar. La prima immagine si riferisce alle 09:00; quella centrale alle 13:00; la terza alle 16:00. Il tempo è espresso in UTC. Il cerchio rosso nell'ultima immagine identifica la cella oggetto di analisi mediante una rete più densa.