

VARION, UN NUOVO APPROCCIO PER LA STIMA IN TEMPO REALE DI ANOMALIE IONOSFERICHE INDOTTE DAI TERREMOTI: APPLICAZIONI, BENEFICI E PROBLEMI APERTI

VARION, A NEW APPROACH FOR REAL-TIME DETECTION OF EARTHQUAKE INDUCED IONOSPHERIC DISTURBANCES: APPLICATIONS, BENEFITS AND OPEN ISSUES

Michela Ravanelli

Sapienza Università di Roma, DICEA, Area di Geodesia e Geomatica, via Eudossiana 18, 00184

PAROLE CHIAVE: Terremoti, anomalie ionosferiche, GNSS, VARION

KEY WORDS: Earthquakes, ionospheric disturbances, GNSS, VARION

RIASSUNTO

È ormai noto che i terremoti possano provocare onde atmosferiche capaci di propagarsi fino alla ionosfera sotto forma di Coseismic Ionospheric Disturbances (CIDs). Esse sono causate dalle onde acustiche prodotte sia in prossimità dell'epicentro (entro 500 km) sia da quelle innescate dalle onde di Rayleigh, onde di superficie che si propagano lontano da esso. Tale fenomeno può essere evidenziato attraverso l'utilizzo delle osservazioni del segnale GNSS, in particolare attraverso la determinazione del contenuto di elettroni liberi presenti nella ionosfera (Total Electron Content, TEC). In questo contesto, l'Area di Geodesia e Geomatica (AGG) dell'Università "Sapienza" di Roma, in collaborazione con il Jet Propulsion Laboratory della NASA, ha sviluppato un nuovo algoritmo per la determinazione del valore di TEC in tempo reale: il VARION (Variometric Approach for Real-Time Ionosphere Observation). L'obiettivo del presente lavoro è illustrare brevemente l'algoritmo e mostrarne la sua validazione sui dati registrati durante il terremoto di magnitudo 8.3 avvenuto il 16 settembre del 2015 in Cile. Nelle serie temporali, i valori dello sTEC (slant TEC, ovvero TEC sulla linea di vista), stimati tramite il VARION, presentano dei picchi riconducibili al terremoto. Ciò è evidente anche nelle cosiddette "odocrone", che rappresentano lo sTEC in funzione del tempo e della distanza dall'epicentro del terremoto, nelle quali il ben definito pattern obliquo è imputabile ancora una volta al terremoto. Tale variazione risulta palese soprattutto nei quadranti posti a nord dell'epicentro. Si è dimostrato inoltre come tale asimmetria nord-sud, ben evidenziata anche nei grafici delle variazioni spazio-temporali di sTEC, sia dovuta alla diversa energia rilasciata dal terremoto nelle due direzioni. I risultati illustrati, sebbene ottenuti a posteriori, dimostrano che il VARION può ben identificare le perturbazioni ionosferiche indotte dai terremoti ed è adatto ad applicazioni in tempo reale.

ABSTRACT

It is widely acknowledged that earthquakes can trigger atmospheric waves that can propagate to the ionosphere as Coseismic Ionospheric Disturbances (CIDs). They are due to the acoustic waves both produced in the proximity of the epicenter (within 500 km) and by those triggered by Rayleigh waves propagating far from it. Several studies demonstrated that GNSS is a mean to detect ionosphere alterations through computing total electron content (TEC) value. In this background, the Geodesy and Geomatics division (AGG) of Sapienza University, in collaboration with the NASA Jet Propulsion Laboratory, developed a new method to compute TEC value in real-time: the VARION (Variometric Approach for Real-Time Ionosphere Observation) algorithm. The aim of this work is to briefly illustrate the algorithm and show its validation on the data recorded during a 8.3 magnitude earthquake that occurred in Chile on September 16, 2015. In the time series, the sTEC (slant TEC, TEC on the satellite-receiver line of sight) values, computed through VARION algorithm, have peaks due to the earthquake. This is also evident in the so-called "hodochrons", representing sTEC variations in distance from the epicenter vs time plot, in which the well-defined oblique pattern is attributable again to the earthquake. This variation is evident especially in the regions located north of the epicenter. It has also been shown that such north-south asymmetry, also well-highlighted in space-time sTEC variations, is due to the different energy released by the earthquake in both directions. The results discussed here, even if obtained after the event took place, show that VARION is able to well identify the earthquake-induced ionospheric variations and is suitable for real-time applications.

1. INTRODUZIONE

Sin dalla loro nascita, i sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System) come il GPS (Global Positioning System) hanno evidenziato molteplici potenzialità. Al giorno d'oggi le notevoli funzionalità di tali sistemi vengono applicate in diversi ambiti, tra cui particolarmente rilevante è la *GNSS seismology*. Questa disciplina si occupa della stima di rilevanti parametri relativi ai terremoti, come ad esempio la determinazione della magnitudo, tramite l'osservazione del segnale GNSS. Il

presente lavoro si inserisce in questo contesto, ma allo stesso tempo ne amplia i campi di applicazione.

È ormai ampiamente riconosciuto che diversi tipi di fenomeni di origine terrestre o spaziale, quali ad esempio eruzioni vulcaniche, tempeste solari, terremoti e tsunami, sono in grado di provocare perturbazioni ionosferiche (Calais et al, 1995). In particolar modo, il presente lavoro si è concentrato sulle perturbazioni ionosferiche dovute ai terremoti. Questi ultimi infatti generano sia onde sismiche che onde atmosferiche, le quali possono dare inizio al movimento del plasma ionosferico causato dall'interazione fra particelle cariche (ioni) e particelle

neutre e, dunque, produrre perturbazioni del contenuto di elettroni liberi della ionosfera. Tali perturbazioni prendono il nome di Coseismic Ionospheric Disturbances (CIDs) (Tsugawa, Saito et al., 2011). In particolare tali onde sono onde acustiche generate in prossimità dell'epicentro (entro 500 km) ed onde acustiche secondarie generate dalle onde di Rayleigh (onde di superficie che si propagano lontano dall'epicentro). Le onde acustiche viaggiano alla velocità del suono, che è variabile con la quota e che all'altezza del singolo e sottile strato con cui si approssima la ionosfera (di solito posto intorno ai 300-350 km di altezza) è di circa 800 m/s; sono necessari 10-15 minuti affinché tali onde, a partire dalla superficie terrestre, raggiungano la ionosfera. È importante ricordare che solamente le onde acustiche che hanno frequenza maggiore della frequenza di cut-off si propagano nella ionosfera (Ducic et al, 2003). Tale frequenza è data dal rapporto fra la velocità del suono e il doppio dell'altezza di scala:

$$\omega_a = \frac{c_s}{2H} \quad (1)$$

dove:

c_s = velocità del suono

H = altezza di scala, ossia $H = c_s^2/\gamma g$ (γ e g sono rispettivamente il coefficiente di dilatazione adiabatica e l'accelerazione di gravità).

In letteratura, il valore di cut-off è compreso nell'intervallo 3.3-3.7 mHz. Infatti le onde acustiche aventi frequenza maggiore di quella di cut-off si propagano nell'atmosfera fino alla ionosfera e la loro ampiezza cresce di un fattore $10^4 - 10^5$ a causa della diminuzione della densità atmosferica con l'altitudine. Tale aumento è dovuto alla conservazione dell'energia cinetica. Per frequenze minori l'ampiezza delle onde diminuisce con l'altitudine e le onde diventano evanescenti (Tanimoto et al, 2007).

I CIDs possono essere rilevati attraverso diverse tecniche: *incoherent scatter radars*, sonde ionosferiche, misure Doppler ad alta frequenza e misure del valore di sTEC (parametro di seguito descritto) tramite ricevitori GNSS a doppia frequenza (Calais et al, 1995). Tuttavia, fino ad ora tali variazioni sono state stimate in post-processing (Savastano et al, 2017). L'algoritmo di seguito presentato, denominato VARION, si propone al contrario di individuare tali perturbazioni ionosferiche in tempo reale. Lo scopo del presente lavoro è, quindi, validare VARION in uno scenario real-time (sebbene le elaborazioni, anche in questo caso, siano state eseguite off-line), a partire dai soli dati effettivamente disponibili in tempo reale, dati relativi al terremoto di magnitudo 8.3 avvenuto in Cile il 16 settembre 2015 (USGS, 2017).

Prima di passare alla presentazione dell'algoritmo, si forniscono alcune informazioni generali sulla ionosfera e sui suoi parametri maggiormente significativi.

La ionosfera è quello strato dell'atmosfera terrestre compreso fra i 50 e i 1000 km, i cui gas componenti sono ionizzati dall'azione delle radiazioni solari e in misura minore dalle radiazioni cosmiche provenienti dallo spazio. La ionosfera agisce come un mezzo dispersivo nei confronti del segnale GNSS, in quanto la velocità del segnale dipende dalla frequenza: la velocità di gruppo (codice) diminuisce, mentre la velocità di fase (portante) aumenta. Il disturbo ionosferico è dato (disturbo positivo, ovvero con aumento del tempo di volo del segnale all'interno della ionosfera, se la velocità diminuisce) da:

$$I_R^S = \pm A \frac{TEC}{f^2} \quad (2)$$

dove:

$A = 40.3 \text{ m}^3/\text{s}^2$

f = frequenza del segnale in Hz

TEC^S_R = Total Electron Content, ossia la densità di elettroni liberi lungo il segnale (per unità di superficie, ossia in numero al m^2).

Così come è definito, il TEC è il contenuto totale di elettroni lungo il percorso fra satellite e ricevitore, pertanto in maniera più esatta si parla di slant TEC (sTEC). Di solito il TEC si misura in TEC units (TECu): per convenzione 1 TECu = 10^{16} elettroni/ m^2 . L'intersezione fra la linea di vista satellite-ricevitore con il singolo e sottile strato con cui si approssima la ionosfera (assumendo che tutti gli elettroni liberi si concentrino in tale strato) prende il nome di Ionospheric Pierce Point (IPP), la cui proiezione sull'ellissoide di riferimento è il Subionospheric Pierce Point (SIP). Ogni satellite in tal senso è un sistema indipendente, in quanto si otterrà un unico valore di sTEC relativo ad ogni satellite per una determinata epoca.

2. L'ALGORITMO VARION

VARION (Variometric Approach for Real-Time Ionosphere Observation) è un algoritmo implementato in un software open source completamente scritto in Python. L'idea è nata presso l'Area di Geodesia e Geomatica (AGG) della Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università "Sapienza" di Roma ed è stata poi sviluppata e validata al Jet Propulsion Laboratory della NASA. VARION deriva da un altro algoritmo di successo sviluppato sempre presso AGG della "Sapienza": VADASE (Variometric Approach for Displacements Analysis Standalone Engine), in grado di stimare in tempo reale le velocità al suolo e gli spostamenti causati dai terremoti.

Al fine di stimare le variazioni di sTEC, l'algoritmo VADASE è stato quindi modificato e applicato alla combinazione geometry-free delle osservazioni GPS di fase e di codice. VARION, dunque, si basa sulla differenza nel tempo della combinazione geometry-free delle misure di fase/codice utilizzando solamente un ricevitore GPS (allo stato attuale è stato implementato solo per questa costellazione GNSS) e le orbite broadcast, entrambi disponibili in tempo reale (Savastano et al, 2017). L'equazione di osservazione alle misure di fase in unità di lunghezza, come noto, risulta (Equazione 2):

$$L_{iR}^S(t) = \rho_R^S(t) + c(\delta_R - \delta^S) + T_R^S(t) - I_{iR}^S(t) + \lambda_i N_{iR}^S(t) + p_R^S + m_{iR}^S(t) + \epsilon_R^S(t) \quad (3)$$

dove:

$i, R, S = i$ è l'indice della frequenza, R si riferisce al ricevitore e S al satellite

λ = lunghezza d'onda della frequenza portante

ρ_R^S = distanza geometrica satellite-ricevitore

c = velocità della luce

δ_R e δ^S = rispettivamente errore di orologio del ricevitore e del satellite

T_R^S e I_R^S = rispettivamente il ritardo troposferico e il ritardo ionosferico

N_{iR}^S = ambiguità di fase

p_R^S = somma di altri effetti tra i quali effetti relativistici, variazioni del centro di fase e *phase wind-up* dovuto alla polarizzazione del segnale

m_{iR}^S e v_{iR}^S = rispettivamente errore di multipath e rumore

Se non si verifica alcun cycle slip, l'ambiguità di fase è costante fra due epoche consecutive. Quindi, andando a calcolare la differenza fra due epoche consecutive (t e t+1) e applicando la combinazione geometry-free, si ottiene l'equazione di osservazione geometry-free differenziata nel tempo (Equazione 4):

$$L_{4R}^S(t+1) - L_{4R}^S(t) = \frac{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}{f_{L2}^2} [I_{1R}^S(t+1) - I_{1R}^S(t)] \quad (4)$$

dove:

L_4 = combinazione geometry-free

f_{L1} e f_{L2} = rispettivamente le frequenze L1(1575.42 Hz) e L2 (1227.60 Hz) del segnale

L'approccio variometrico supera pertanto il problema della stima della ambiguità iniziale di fase e dell'IFB (Inter-Frequency Bias)¹, essendo pertanto ideale per applicazioni real-time. Considerando il ritardo ionosferico lungo il percorso geometrico (sTEC), la variazione di sTEC fra due epoche consecutive è, sulla base dell'equazione (3):

$$\delta TEC(t+1, t) = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{A (f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} [L_{4R}^S(t+1) - L_{4R}^S(t)] \quad (5)$$

Integrando la variazione nell'intervallo di tempo della nostra perturbazione ionosferica (Equazione 5), si ha:

$$\Delta TEC(t_f, t_0) = \int_{t_0}^{t_f} \delta TEC(t) \quad (6)$$

Infine, con l'obiettivo di rimuovere le variazioni di lungo periodo dal nostro segnale (ad esempio le variazioni giorno-notte del TEC), in modo da evidenziare quelle di breve periodo correlate alle perturbazioni ionosferiche, si è utilizzato un polinomio di ottavo grado per approssimare le serie temporali del sTEC, cosicché i residui ottenuti sottraendo tale polinomio ai valori di sTEC osservati contengono l'informazione relativa alla perturbazione ionosferica (Savastano et al, 2017).

3. APPLICAZIONE AL TERREMOTO DEL CILE DEL 16 SETTEMBRE 2015 (M=8.3)

Il 16 settembre del 2015 alle 22:54:32 UTC un terremoto di magnitudo 8.3 è stato registrato a 46 km dalla città cilena di Illapel (31.570°S, 71.654°W, profondità di 25.0 km). Tale terremoto ha causato uno tsunami osservato in tutta la regione pacifica che ha provocato numerosi danni lungo le coste. In occasione di tale evento sono stati raccolti molti dati, tra i quali le osservazioni di diverse stazioni permanenti GPS risultate utili per validare l'algoritmo VARION.

Sono stati pertanto utilizzati dati provenienti da circa 90 stazioni GPS distribuite su tutto il territorio sudamericano (Figura 1).

In particolare, si può notare che la maggior parte delle stazioni è situata in Cile, i cui dati sono stati gentilmente forniti dal Centro Sismologico Nacional, Universidad de Chile, mentre i dati relativi alle altre stazioni sono stati ottenuti sia dalle stazioni appartenenti alla rete dell'International GNSS Service (IGS) o alla rete de Système d'Observation du Niveau des Eaux

Littorales (SONEL), le cui stazioni raccolgono dati GPS a 15 e 30 secondi.

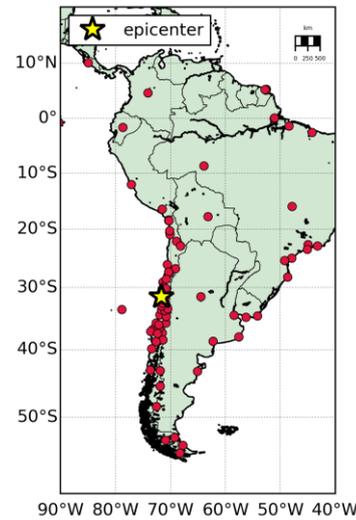


Figura 1. Dataset di stazioni GPS utilizzato

Innanzitutto, per validare VARION, sono analizzate le serie temporali dei valori di sTEC, riportate in Figura 2, in cui la linea nera verticale rappresenta l'istante in cui è avvenuto il terremoto. Come si può osservare dai picchi nei valori di sTEC dopo l'occorrenza del terremoto stesso, tali stazioni GPS ben tracciano il terremoto.

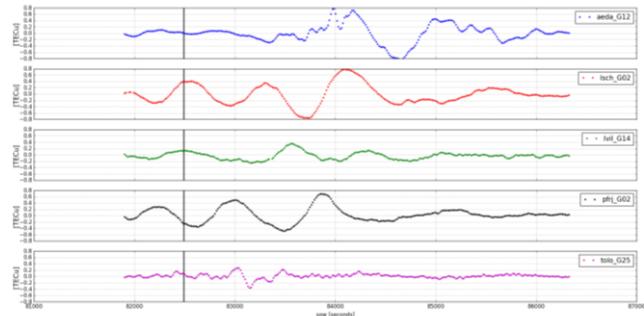


Figura 2. sTEC time series per diverse stazioni GPS

Allo scopo di studiare meglio la perturbazione ionosferica dovuta al terremoto, l'area di studio è stata suddivisa in sei quadranti centrati sull'epicentro, di cui due (occidentali) situati principalmente su mare e quattro (orientali) principalmente su terra (Figura 3).

Una volta effettuata questa suddivisione, sono state realizzate le "odocrone", un particolare tipo di grafico in cui la variazione di sTEC relativamente all'IPP è rappresentata riportando sulle ascisse il tempo e sulle ordinate la distanza dall'epicentro. Nel nostro caso, la distanza dall'epicentro è stata calcolata con la formula di Vincenty (Vincenty, 1975) e l'intervallo di tempo scelto è compreso fra le 22:45:00 e le 23:59:59 UTC. Satelliti con elevazione minore di 20° sono stati esclusi dall'analisi, a causa dell'elevata rumorosità dei relativi dati (angolo di cut-off posto a 20°).

¹ L'IFB è un errore presente in tutte le combinazioni tra misure di fase e di codice dovuto ritardi elettronici diversi tra segnali diversi.

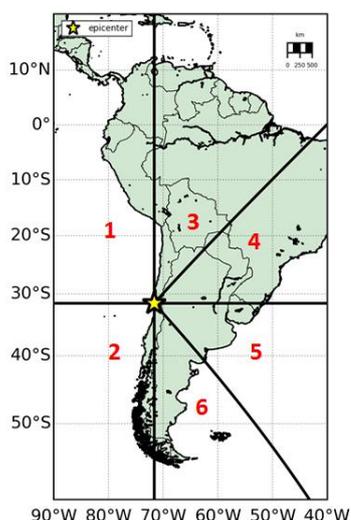


Figura 3. Divisione in quadranti dell'area di studio

In particolare le odocrone relative ad ogni quadrante sono mostrate in Figura 4, ove la linea nera verticale rappresenta l'istante in cui è avvenuto il terremoto.

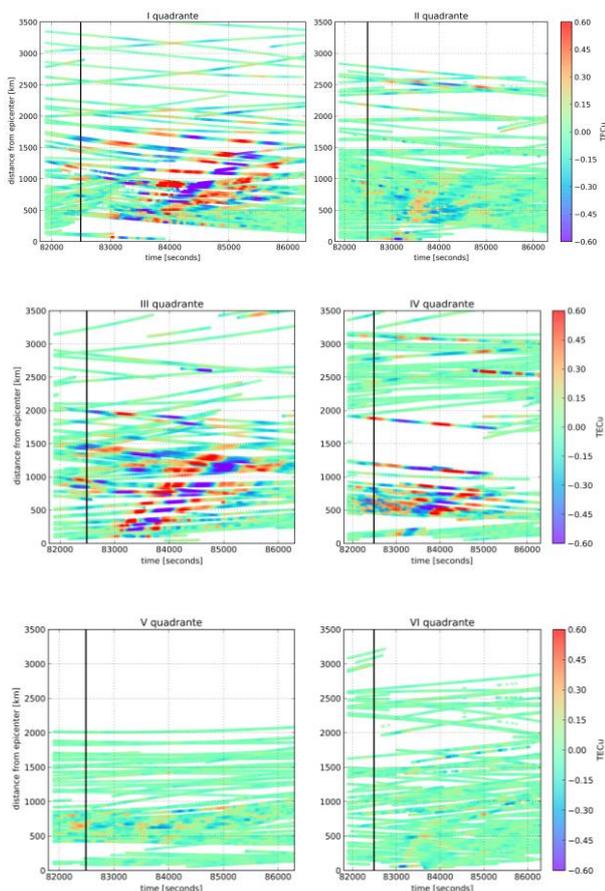


Figura 4. Odocrone relative a tutti i sei quadranti

In tal modo è possibile notare che le odocrone dei quadranti settentrionali (il primo, il terzo ed il quarto) dell'epicentro evidenziano meglio la perturbazione ionosferica rispetto a quelle dei quadranti meridionali (il secondo, il quinto ed il sesto). Infatti nei quadranti posti a nord dell'epicentro la variazione di sTEC è caratterizzata da un pattern obliquo ben

definito che coinvolge sia valori massimi (in rosso) che valori minimi (in blu). Interpolando tale pattern con una retta, la cui pendenza rappresenta la velocità della perturbazione, si è notato che i valori sono consistenti con il fenomeno fisico. Tali velocità sono, infatti, comprese in un intervallo fra i 600 e i 760 m/s. Tale asimmetria nord-sud nei valori di sTEC è ben evidenziata anche nel grafico delle variazioni spazio-temporali di sTEC mostrato in Figura 5.

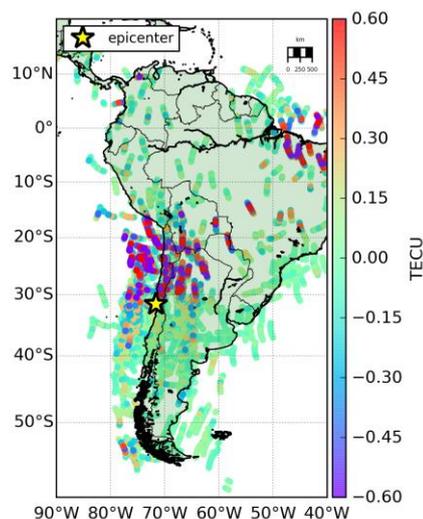


Figura 5. Variazioni spazio-temporali di sTEC dalle ore 22:54:32 alle 23:59:59 UTC

Nella Figura viene infatti raffigurata una mappa della regione di nostro interesse nella quale le tracce colorate rappresentano le variazioni di sTEC relativamente al SIP (uguale al corrispondente IPP, se visto sulla mappa). In Figura 6 sono rappresentate le variazioni di sTEC dalle 22:54:32 (ora del terremoto) alle 23:59:59 UTC.

Si può osservare che la variazione maggiore è localizzata nella parte a nord dell'epicentro. Pertanto, al fine di visualizzare meglio tale fenomeno, le variazioni spatio-temporali di sTEC sono state graficate a partire da circa dieci minuti prima del terremoto fino alle 23:59:59 UTC (21:59:59 ora cilena) ad intervalli di dieci minuti e dalle 23:59:59 fino alle 04:00:00 UTC (01:00:00 ora cilena) ad intervalli di mezz'ora. Nelle mappe in Figura è stata riportata l'ora locale (UTC-3) in quanto si è voluto evidenziare il fatto che il terremoto sia avvenuto nel pomeriggio, momento della giornata in cui lo strato ionosferico risulta più sottile, influenzando di conseguenza i valori di sTEC. In tal modo è possibile vedere come la perturbazione ionosferica sia sempre concentrata nelle zone a nord dell'epicentro, per poi sparire completamente dopo quattro ore dal terremoto.

Infine, si può affermare che sia i grafici delle variazioni spatio-temporali di sTEC che le odocrone evidenziano una sorta di *direzionalità della perturbazione ionosferica*. Secondo (Heki et Ping, 2005), tale direzionalità può essere dovuta all'interazione del campo gravitazionale terrestre o alla differenza in termini di energia emessa dalle onde sismiche.

Il presente lavoro si è concentrato sullo studio della seconda possibile causa, attraverso la procedura di seguito illustrata che ha consentito di calcolare l'energia rilasciata dal terremoto.

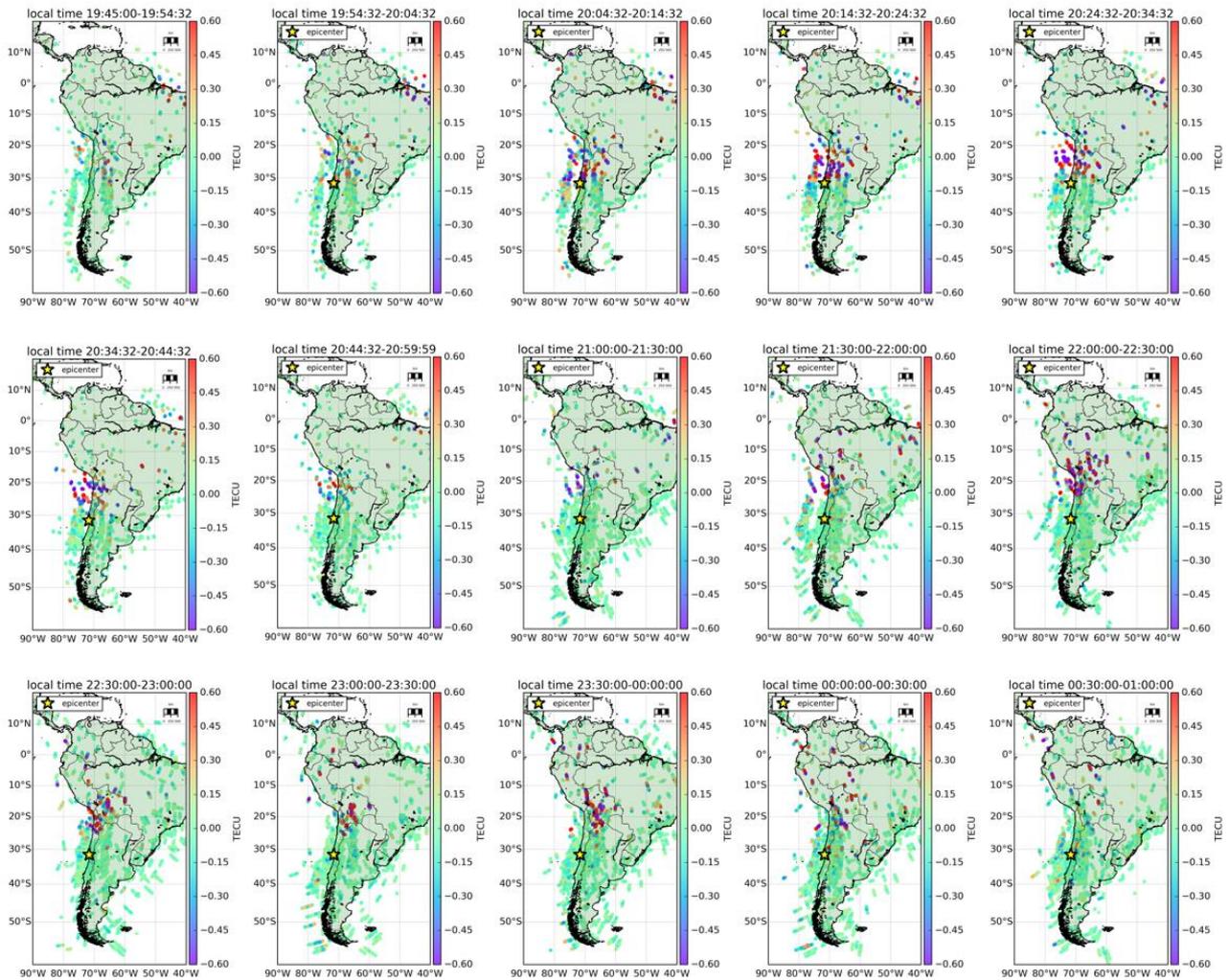


Figura 6. Variazioni spatio-temporali di sTEC per circa sei ore (22:45:00-04:00:00 UTC)

3.1 Determinazione dell'energia rilasciata dal terremoto

Per determinare l'energia rilasciata dal terremoto è stato necessario considerare un altro set di dati GPS: le osservazioni di fase da stazioni GPS ad alta frequenza (1 Hz), idonee a stimare lo scuotimento del suolo dovuto al terremoto; ancora una volta tali dati sono stati gentilmente forniti dal Centro Sismologico Nacional, Universidad de Chile. Come si può notare dalla Figura 7, il numero delle stazioni (42) è decisamente minore, poiché sono ancora relativamente poche le stazioni permanenti in grado di acquisire osservazioni ad alta frequenza.

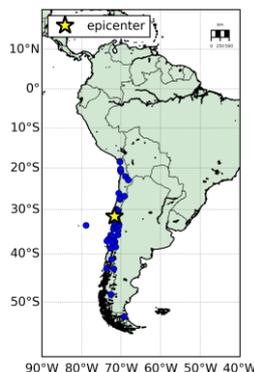


Figura 7. Dataset stazioni GPS a 1 Hz

Queste osservazioni sono state utilizzate come input per l'algoritmo VADASE, che stima le velocità del ricevitore per le componenti Est, Nord e Up (sul principio di funzionamento del VADASE si rimanda a (Colosimo, 2012)). Nel nostro caso, la componente planimetrica della velocità è stata calcolata applicando il teorema di Pitagora alle componenti Est e Nord; in Figura 8 sono illustrate le serie temporali delle velocità relativamente alla componente Up e alla componente planimetrica.

Innanzitutto, si è stimata la durata del terremoto sulla base delle sole serie temporali delle velocità, considerando la sola componente planimetrica, come ben noto meno rumorosa; tale durata è stata poi applicata anche alla componente Up. Tale obiettivo è stato realizzato attraverso il *test F per il confronto di due varianze*. Il test F è un test di ipotesi basato sulla distribuzione F di Fisher-Snedecor, il cui scopo è verificare l'ipotesi che i campioni provenienti da popolazioni, ipotizzate entrambe normali e indipendenti fra loro, posseggano la stessa varianza. Ciò è conseguito calcolando il rapporto fra le due varianze campionarie:

$$F = \frac{S_X^2}{S_Y^2} \quad (7)$$

con:

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (8)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=0}^m (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (9)$$

dove:

S_x^2 e S_y^2 sono le varianze campionarie rispettivamente di X_1, X_2, X_n e Y_1, Y_2, Y_m , campioni indipendenti identicamente distribuiti di due popolazioni aventi distribuzione normale.

Se l'ipotesi nulla di uguaglianza fra le due varianze è soddisfatta, il test F segue la distribuzione F con n-1 e m-1 gradi di libertà, altrimenti segue una distribuzione non centrale. Nel nostro caso il test F è rappresentato dal rapporto fra le varianze delle velocità della componente planimetrica relative a prima e dopo il terremoto, nell'ipotesi che la rumorosità della serie temporale rimanga costante prima e dopo il terremoto. In particolare è stato calcolato il rapporto fra la varianza relativa ad una finestra continua e mobile (dall'epoca del terremoto fino ad un quarto d'ora dopo) di 60 valori di velocità planimetrica e la varianza relativa ai 60 valori di velocità planimetrica precedenti l'epoca del terremoto. Considerando la frequenza di campionamento di 1 Hz, la scelta di 60 valori corrisponde a un intervallo di 1 minuto. Scegliendo un livello di significatività dell'1% ($\alpha=0.01\%$), la statistica di test (7) deve essere minore 1.84 affinché sia accettata l'ipotesi di uguaglianza delle varianze.

$$F = \frac{S_{dopo}^2}{S_{prima}^2} < 1.84 \quad (10)$$

Nel nostro caso, è stata formulata l'ipotesi che le varianze prima e dopo il terremoto siano uguali. Pertanto, laddove tale condizione non sia verificata, si ipotizza sia ancora significativo lo scuotimento del terreno dovuto al terremoto e che tale scuotimento sia cessato appena l'ipotesi di uguaglianza delle varianze torni ad essere nuovamente verificata. In questo modo è stato possibile valutare la durata del terremoto. Nelle serie temporali delle velocità, la parte in rosso rappresenta la durata del terremoto. In Figura 8, si nota che la durata del terremoto, così calcolata, ben riflette l'andamento delle serie temporali delle velocità.

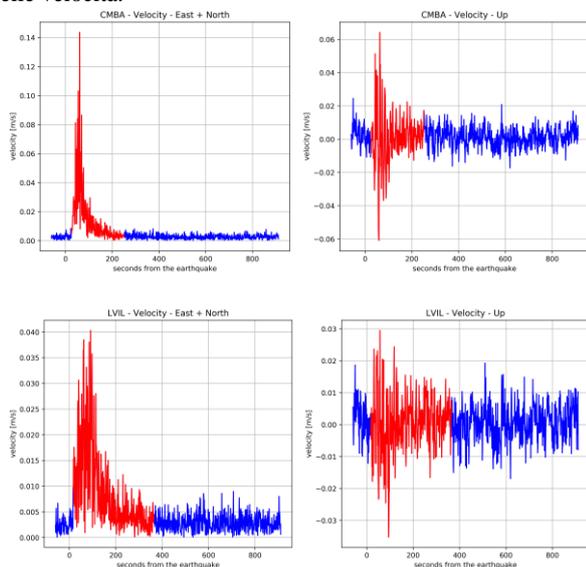


Figura 8. Serie temporali delle velocità nelle quali è evidenziata la durata del terremoto rispettivamente per la stazione CMBA (nord dell'epicentro) e per la stazione LVIL (sud dell'epicentro).

Successivamente è stato calcolato lo spettro di potenza delle velocità per la componente Up, relativamente a tale durata. Lo spettro di potenza rappresenta la distribuzione della potenza del segnale alle varie frequenze. In particolare lo spettro di potenza è stato calcolato usando il metodo di Welch, in quanto riduce il rumore negli spettri di potenza stimati, a prezzo di una minore risoluzione in frequenza, che però, in questo caso, non è necessaria. I grafici di tali spettri sono riportati in Figura 9. La parte evidenziata in rosso rappresenta le frequenze maggiori di quella di cut-off.

Infine, integrando lo spettro di potenza entro uno specifico intervallo di frequenza (frequenze maggiore della frequenza di cut-off delle onde acustiche) si è ottenuta l'energia meccanica associata alla componente Up dello scuotimento dovuto al terremoto relativamente ad ogni stazione.

In Figura 10 è mostrato lo spettro di energia per le stazioni CMBA e LVIL rispettivamente poste a nord e a sud dell'epicentro. In tali grafici si nota come l'energia rilasciata a nord sia maggiore di quella rilasciata a sud e tale caratteristica è ancora più evidente dalla seguente tabella (Tabella 1).

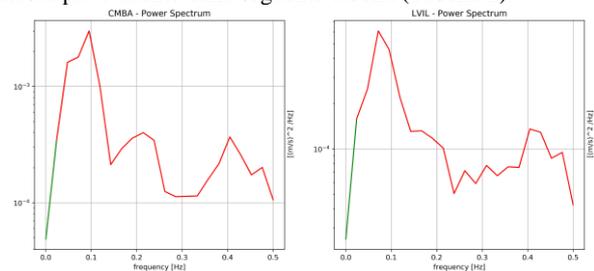


Figura 9. Spettri di potenza rispettivamente per le stazioni CMBA e LVIL

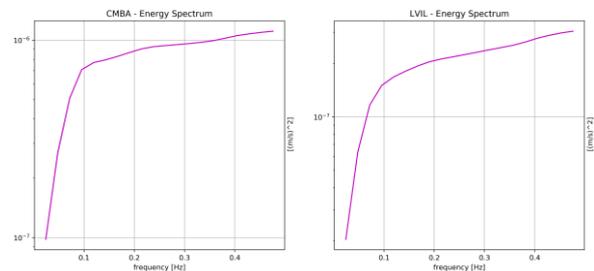


Figura 10. Spettri di energia rispettivamente per le stazioni CMBA e LVIL

	Stazione	Distanza dall'epicentro	Energia
	-	km	J/kg
NORD	CMBA	76.91	1.11 e-6
	PFRJ	99.33	1.78 e-6
	TOLO	252.98	1.26 e-6
SUD	LVIL	40.56	3.04e-7
	ZAPA	110.74	2.36e-7
	VALN	161.71	1.70 e-7

Tabella 1. Energia rilasciata dal terremoto nelle varie stazioni

Inoltre, in Figura 11 è riportata una mappa in cui la dimensione del marker di ogni stazione è proporzionale all'energia rilasciata dal terremoto in quel punto, in modo da rendere tale differenza più visibile.

Tale particolarità è evidente nelle stazioni poste in prossimità dell'epicentro (entro 250 km), in quanto oltre tale distanza lo scuotimento del terremoto non è più percepibile, pertanto tale differenza diminuisce, come si può notare in Figura 12. Si può quindi ipotizzare che la sensibile differenza nei valori di sTEC a nord e a sud dell'epicentro possa essere dovuta alla differenza di energia meccanica associata alla componente Up dello scuotimento dovuto al terremoto nelle due direzioni. È infatti questa energia meccanica che si trasmette alla ionosfera causandone la perturbazione.

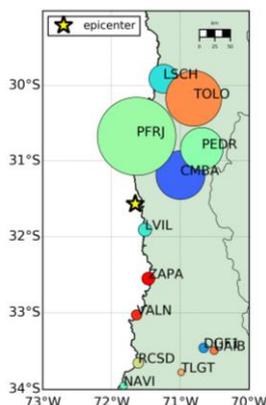


Figura 11. Mappa delle stazioni in cui la dimensione del marker è proporzionale all'energia rilasciata dal terremoto

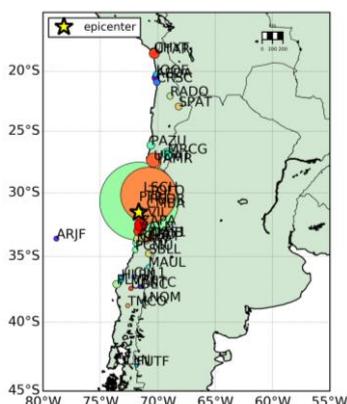


Figura 12. Mappa delle stazioni in cui la dimensione del marker è proporzionale all'energia rilasciata dal terremoto

4. CONCLUSIONI

VARION, un nuovo algoritmo per la determinazione del valore di sTEC in tempo reale, è stato validato in uno scenario real-time associato al terremoto avvenuto in Cile, il 16 settembre 2015. I risultati ottenuti dimostrano come l'algoritmo riesca a rilevare efficacemente le variazioni di sTEC indotte dal terremoto. Nelle serie temporali, infatti, i valori del sTEC stimati tramite VARION presentano dei picchi riconducibili al terremoto. Ciò è evidente anche nelle odocrone, nelle quali il ben definito pattern obliquo è imputabile ancora una volta al terremoto. Tale variazione risulta palese soprattutto nei quadranti posti a nord dell'epicentro. Si è inoltre mostrato come tale asimmetria nord-sud, ben evidenziata anche nei grafici delle variazioni spazio-temporali di sTEC, possa essere dovuta alla diversa energia meccanica rilasciata dalla componente Up dello scuotimento dovuto al terremoto nelle due direzioni nord e sud. Tuttavia, in vista di applicazioni in tempo reale di VARION, è necessario sostituire il filtraggio dei fenomeni di bassa frequenza, ottenuti attualmente con un polinomio di ottavo

grado, con una procedura effettivamente implementabile in tempo reale. Per questo scopo si è pensato all'utilizzo di un filtro passa alto FIR (finite duration impulse response); tale strategia è già in fase di studio e validazione. Inoltre come futuro obiettivo si pensa all'integrazione di altre osservazioni GNSS, quali quelle provenienti ad esempio da Galileo e Beidou, al fine di andare a densificare la rete di monitoraggio dei valori di sTEC. Ciononostante, è importante sottolineare che futuri lavori dovranno concentrarsi sulla migliore distinzione dei disturbi ionosferici indotti dai terremoti da perturbazioni ionosferiche di altro genere e sull'individuazione di tali disturbi anche di notte, quando lo spessore dello strato ionosferico è minore rispetto alle ore diurne.

RINGRAZIAMENTI

L'autrice è sinceramente grata al Prof. Mattia Crespi e all'Ing. Giorgio Savastano per il sostegno, gli incoraggiamenti ed i consigli ricevuti durante la stesura di questo lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- Calais, E., e Minster, J. B. Gps detection of ionospheric perturbations following. *Geophysical Research Letters* 22, 9 (1995), pp. 1045-1048.
- Calais, E., Minster, J. B., Hofton, M., e Hedlin, M., Ionospheric signature of surface mine blasts from global positioning system measurements. *Geophysical Journal International* 132, 1 (1998), pp. 191-202.
- Colosimo, G. Vadase: Variometric approach for displacement analysis stand-alone engine.
- Ducic, V., Artru, J., e Lognonn_e, P. Ionospheric remote sensing of the denali earthquake rayleigh surface waves. *Geophysical research letters* 30, 18 (2003).
- Heki, K., e Ping, J. Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense gps array. *Earth and Planetary Science Letters* 236, 3 (2005), pp. 845-855.
- Savastano, G., Komjathy, A., Verkhoglyadova, O., Mazzoni, A., Crespi, M., Wei, Y., e Mannucci, A. J. Real-Time Detection of Tsunami Ionospheric Disturbances with a Stand-Alone GNSS Receiver: A Preliminary Feasibility Demonstration. *Scientific Reports* 7 (2017).
- Tanimoto, T., e Artru-Lambin, J. Interaction of solid earth, atmosphere, and ionosphere. *Treatise on Geophysics* 4 (2007), pp. 421-444.
- Tsugawa, T., Saito, A., Otsuka, Y., Nishioka, M., Maruyama, T., Kato, H., Nagatsuma, T., e Murata, K. Ionospheric disturbances detected by gps total electron content observation after the 2011 off the pacific coast of tohoku earthquake. *Earth, planets and space* 63, 7 (2011), pp. 875-879.
- United States Geological Survey (USGS), Earthquake report <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a#executive> (consultato a gennaio 2017).
- Vincenty, Thaddeus. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. *Survey review* 23.176 (1975), pp. 88-93.