

## **Disturbi indotti da attività ionosferica eccezionale sulle soluzioni GNSS**

Angelo Galeandro (\*), Francesco Mancini (\*\*)

(\*) Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali, Università di Bologna, agaleandro@gmail.com

(\*\*) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica, Politecnico di Bari,  
0805963399, f.mancini@poliba.it

### **Riassunto**

La ionosfera rappresenta una fonte di disturbo che, se non ben modellizzata, può introdurre errori di entità non trascurabile nel posizionamento GNSS. L'attività ionosferica è fortemente influenzata dall'attività solare, che presenta diverse ciclicità, tra cui quella principale con periodicità undecennale, misurabile attraverso il numero di macchie solari (*sunspot number*). In base a tali informazioni è possibile apprezzare il repentino incremento dell'attività solare che si sta verificando a partire dal 2010, con picchi massimi attesi nel corso del 2013. Anche se i più accurati metodi di posizionamento satellitare, relativi e NRTK, modellizzano gli effetti ionosferici sulle osservabili, gli effetti indotti da eventi di entità eccezionale o corrispondenti alla massima attività solare, non sono del tutto quantificati. Ad esempio, i servizi del tipo NTRK non hanno mai lavorato in tali condizioni e le prestazioni di tali infrastrutture per i normali scopi topografici non sono del tutto note.

Il presente lavoro introduce e quantifica i fenomeni ionosferici ciclici e descrive l'effetto sulle prestazioni del posizionamento tramite GNSS nei casi in cui vengono impiegate le tecniche NRTK e statico-relativa per reti di limitata estensione geografica.

### **Abstract**

Hundreds of years of sun observation by the researcher in eliophysics, recognized as the Sun is now entering in a period of maximum activity within a well-defined periodicity. The mentioned solar activity has been initially observed by counting the number of sunspots on the Sun's surface, solar flares and coronal mass ejection. Such phenomena are able to create anomalies in the magnetic field that could stream towards the Earth. The terrestrial magnetic field may be influenced by the "solar wind" and the ionized upper layer of the atmosphere, called ionosphere, could be affected by scintillation and induced delays of the travelling radio-signals. Several critical infrastructures would be influenced by such a disturbance. The 11-years long cycle of solar activity is expected to reach the peak by the end of the year 2013 and possible consequences on the GNSS (Global Navigation Satellite System) services have to be accounted for. This is because of the properties by the ionospheric layers to delay the GNSS signals depending on the electron density within the ionospheric strata. This study briefly introduces the way the ionospheric activity could be monitored and, successively, focuses on the effects of the ionospheric disturbance on the NRTK (Networked Real Time Kinematic) services and GNSS post-processing procedure in reality. To achieve such aim the performances achieved by the users of a local NRTK positioning service during the year 2011 and results provided by the processing of 5-year long time series of GNSS data belonging to local networks were analyzed. Results highlighted a relationship between ionospheric activity and performance of NRTK positioning whereas the post processing of static data seems to be free from such disturbances.

## 1. L'attività ionosferica: introduzione

Come noto la ionosfera costituisce la parte superiore dell'atmosfera, compresa tra 50 e 1000 km di quota rispetto alla superficie terrestre. Essa è caratterizzata dalla presenza di molecole ionizzate principalmente dalle radiazioni con cui il Sole investe la Terra (vento solare) e, in misura assai minore, da altri agenti ionizzanti di origine extraterrestre (radiazioni cosmiche) e terrestre (radiazioni da isotopi radioattivi presenti nell'ecosfera). L'intensità della radiazione elettromagnetica di origine solare si riduce al diminuire della quota a causa del progressivo assorbimento dovuto all'attraversamento dell'atmosfera; d'altra parte, all'aumentare della quota corrisponde la diminuzione della pressione e, quindi, del numero di molecole ionizzabili per unità di volume. Si deduce, pertanto, come la concentrazione delle particelle cariche sia massima a una quota intermedia tra il limite dell'atmosfera e la superficie terrestre.

Tale andamento è ben descritto dal profilo di *Chapman* (figura 1), dal quale si evince come l'attività di ionizzazione si concentri principalmente nell'intervallo di quote compreso fra 400 e 450 km.

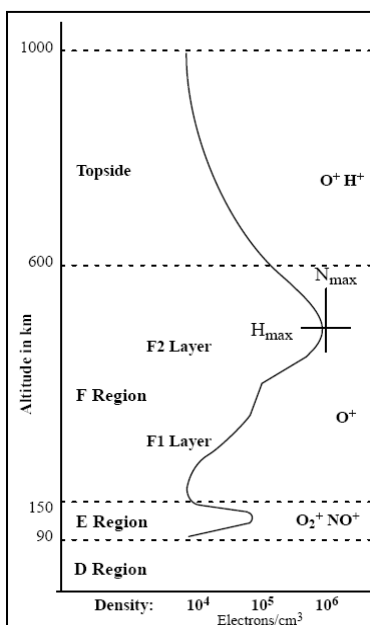


Figura 1. Profilo di Chapman (fonte <http://www.sel.noaa.gov>).

L'attività solare mostra delle periodicità secolari, tuttavia risulta particolarmente interessante analizzare il ciclo undecennale (figura 2), quantificato attraverso il cosiddetto *sunspot number* (numero di macchie solari). Tali macchie rappresentano delle zone della superficie solare caratterizzate da una temperatura minore (circa 5000 K) di quella degli ambienti circostanti (circa 6000 K) e da una rilevante attività magnetica. Dopo i minimi registrati nel 2008-2009, dal 2010 è evidente un veloce incremento del SSN mensile al quale si associa un'accentuata variabilità giornaliera del parametro.

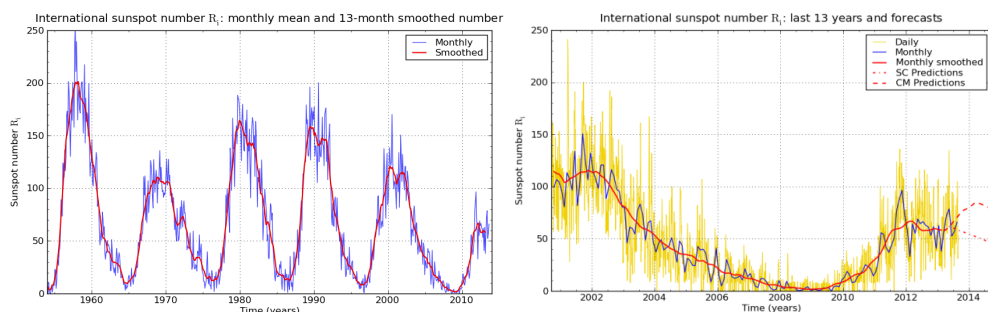


Figura 2. Andamento decennale del sunspot number (SSN) e modelli previsionali formulati dal Solar Influence Data Analysis Centre (fonte <http://sidc.oma.be>) relativi all'attuale ciclo [ipotesi previsionali formulate secondo i modelli SM, Standard curves Method e CM, Combined Method].

In base ai modelli previsionali, i valori di SSN che saranno raggiunti durante il prossimo picco di attività solare non dovrebbero raggiungere quelli degli ultimi cicli, tuttavia si deve tenere in considerazione anche il fattore di incertezza associata a tali previsioni ed una conoscenza dei fenomeni ciclici dell'attività solare in fase di definizione.

## 2. Influenza sul posizionamento GNSS

La presenza di molecole ionizzate attribuisce alla ionosfera le caratteristiche di mezzo "dispersivo", in grado cioè di produrre fenomeni di rifrazione selettiva sui segnali che la attraversano. L'attività ionosferica può variare temporalmente su base giornaliera, stagionale o, come accennato, in relazione all'attività solare che si manifesta con una ciclicità ben precisa. Tale variabilità influenza fortemente la propagazione delle onde radio, tra le quali vi sono le portanti che compongono il segnale emesso dai satelliti GNSS. Le irregolarità nella distribuzione della densità elettronica possono anche provocare variazioni repentine delle proprietà fondamentali dell'onda (fase e ampiezza). Questo fenomeno prende il nome di scintillazione e, nel posizionamento satellitare, tale instabilità può compromettere il corretto tracciamento del segnale da parte dei ricevitori GNSS con conseguenze nella corretta ricostruzione delle osservabili di codice e fase.

Il parametro fondamentale che consente di quantificare l'entità dell'attività ionosferica è il Contenuto Elettronico Totale (*Total Electron Content*, TEC), definito come il numero di elettroni liberi incluso in un cilindro a sezione circolare di area pari ad un metro quadro, che si sviluppa lungo il percorso seguito dal segnale. Il TEC si misura quindi in Unità TEC (TECU), essendo 1 TECU uguale a  $10^{16}$  elettroni/m<sup>2</sup>. La stima del TEC può essere quindi effettuata dall'analisi delle stesse osservabili GNSS, anche se, con le tecniche comunemente impiegate per scopi geodetici, non è possibile ottenere informazioni sulla distribuzione spaziale delle cariche libere nei vari livelli ionosferici. Per questo il valore del TEC è, a tutti gli effetti, un valore cumulativo. Deve essere tenuta in considerazione anche l'elevazione dei satelliti che forniscono i dati, a causa del maggiore strato di ionosfera attraversato dal segnale nel caso di satelliti bassi sull'orizzonte. Per questo motivo il valore del TEC deve essere ricondotto alla direzione zenitale (VTEC, *Vertical TEC*).

La valutazione degli effetti ionosferici è di fondamentale importanza per ottenere un posizionamento di buona qualità, in quanto, come riportato da (Biagi, 2009), nelle condizioni più critiche, l'errore introdotto dalla ionosfera può raggiungere l'ordine di grandezza delle decine di metri nella determinazione dello *pseudorange* (grandezza alla base della stima delle coordinate nei vari metodi di posizionamento).

Esistono diverse strategie per contrastare l'effetto ionosferico. Per il posizionamento in tempo reale può essere utilizzato il modello di *Klobuchar* (Klobuchar, 1987) che, con la previsione del valore del VTEC per una data epoca in funzione della posizione, consente la correzione di circa il 50% del

disturbo ionosferico. Per le tecniche che richiedono la post-elaborazione dei dati acquisiti con ricevitori in doppia frequenza, è possibile ridurre gli effetti della ionosfera attraverso l'uso di una particolare combinazione lineare delle osservabili L1 e L2, chiamata *Ionosphere Free* (L3). In alternativa, si possono utilizzare dei modelli ottenuti con l'utilizzo di armoniche sferiche (Schaer et al, 1998) che, utilizzando una particolare combinazione lineare delle osservabili chiamata *Geometry Free* (L4), determinano l'effetto ionosferico attraverso la stima del TEC ottenuta dall'analisi dei dati acquisiti dalle reti internazionali di stazioni permanenti GNSS gestite dall'IGS (*International GPS Services for Geodynamics*).

Tali modelli sono alla base delle Mappe Ionosferiche Globali (*Global Ionospheric Maps, GIMs*), prodotte da diversi enti di ricerca internazionali quali CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*) dell'Università di Berna e JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) della NASA, che consentono di visualizzare l'andamento geografico del TEC (figura 3) tramite interpolazione dei valori su griglie aventi passo di 2,5° in latitudine e 5° in longitudine.

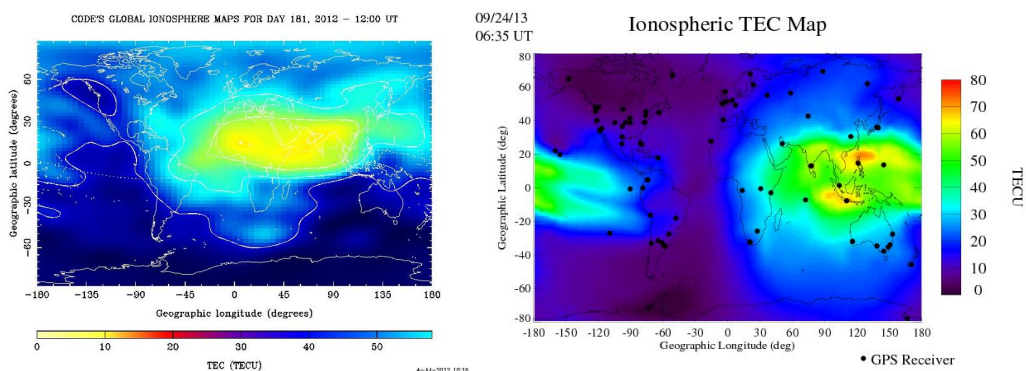


Figura 3. Mappe Ionosferiche Globali prodotte dal CODE (sinistra, fonte <http://www.aiub.unibe.ch>) e JPL (destra, fonte <http://iono.jpl.nasa.gov>).

È evidente come, essendo l'attività ionosferica legata all'azione della radiazione solare, i maggiori valori di TEC siano concentrati attorno alle aree equatoriali e alle longitudini caratterizzate da condizioni diurne.

L'analisi del valore medio globale del VTEC (figura 4), inoltre, permette di verificare le ciclicità già discusse, evidenziando fluttuazioni di breve periodo che si sovrappongono al ciclo undecennale.

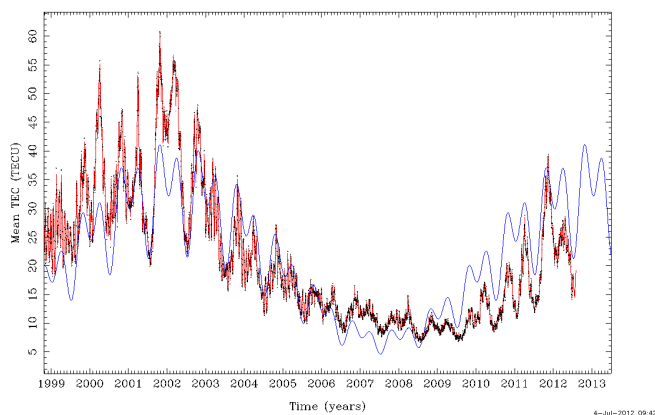


Figura 4. Andamento del VTEC medio globale nel periodo 1995-2012 (fonte <http://www.aiub.unibe.ch>).

### 3. Effetti dell'attività ionosferica sui servizi GNSS di piccola estensione

Le reti GNSS per la fornitura di servizi di posizionamento in tempo reale, sono state sviluppate in Italia a partire dal 2003-2004 circa, periodo nel quale l'attività ionosferica era in fase calante. È noto che il posizionamento RTK tradizionale presenta il limite di un'accuratezza legata alla distanza *master-rover*, per la relazione spaziale esistente tra alcuni *bias* (effemeridi e disturbi atmosferici). Nel posizionamento NRTK, invece, le correzioni sono calcolate da un Centro di Controllo in cui convergono i dati di più stazioni GNSS permanenti sincronizzate tra loro. È evidente quindi che, in presenza di un fenomeno perturbativo di forte intensità, la modellizzazione dei *bias* e delle informazioni sul ritardo ionosferico potrebbero risultare difficoltose, con ripercussioni sulla qualità del posizionamento degli utenti connessi a tale servizio. Sorge quindi la necessità di capire quale sia la sensibilità di reti di piccola estensione ai fenomeni perturbativi ionosferici su scala globale.

A tale proposito, seguendo le indicazioni di (Schaer, 1999), utilizzando il Bernese GNSS Software, sono state generate le mappe orarie del TEC a maggiore risoluzione spaziale (passo della griglia di 0,1° in longitudine e latitudine), a partire dai dati provenienti dalle reti di stazioni GNSS permanenti della Regione Abruzzo per il periodo 2008-2013. Il valore medio del TEC di tali mappe può essere considerato rappresentativo dell'intera regione coperta in quanto, vista la limitata estensione geografica, i valori del TEC presentano una variabilità massima spaziale di solo qualche decimo di unità TEC. Sono state successivamente generate delle mappe orarie del TEC di uguale risoluzione, ma di più grande estensione geografica (35-50° in latitudine, 0-25° in longitudine), utilizzando dati di 50 stazioni appartenenti alla EPN (*EUropean REFerence Permanent Network*), distribuite sul bacino del Mediterraneo, per lo stesso periodo. La sovrapposizione delle due serie del TEC (figura 5), oltre a mostrare l'aumento del TEC (e quindi dell'attività ionosferica) dal 2010, evidenzia come la sensibilità ai fenomeni ionosferici globali prescindano dall'estensione geografica della rete GNSS.

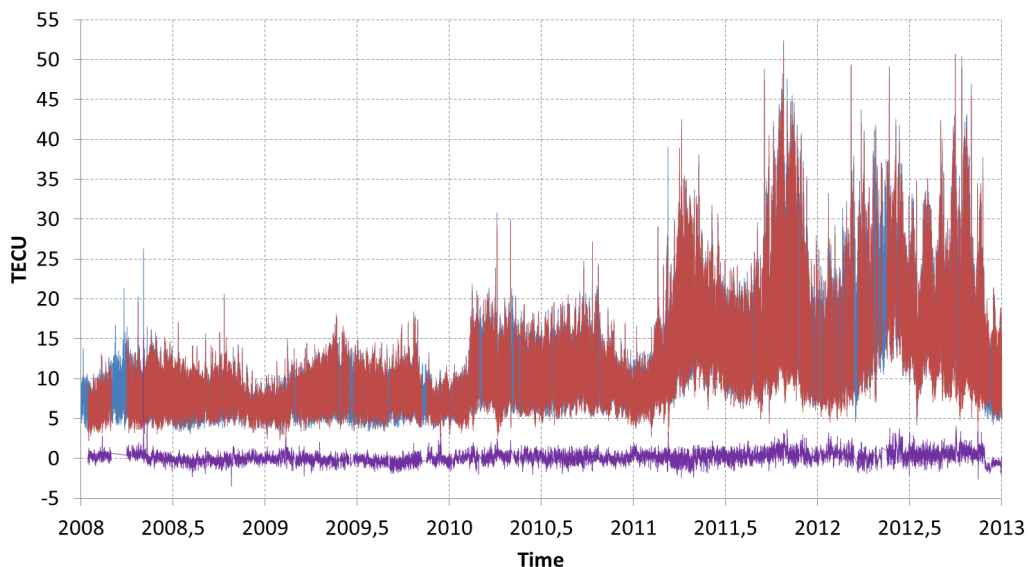


Figura 5. Andamenti del valore medio del TEC sulla regione Abruzzo rilevato dalla rete GNSS regionale (rosso) e da una rete di maggiore estensione geografica costituita da stazioni appartenenti ad EPN (blu).

Si nota, infatti, come le due serie siano sovrapponibili con un valore medio delle differenze (viola) inferiore ad 1 TECU. È quindi plausibile l'eventualità che periodi di intensa attività ionosferica possano ripercuotersi sui servizi di posizionamento in tempo reale a causa di una non buona modellizzazione dei *bias*. Tale eventualità è rimarcata anche in (Mancini et al., 2012) in cui, per quantificare a posteriori la qualità e l'affidabilità complessive del posizionamento NRTK della rete

Fo.G.E.R. (Fondazione Geometri Emilia Romagna), viene considerato, per un campione rappresentativo di utilizzatori, il rapporto tra il numero di epoche con soluzione SPS (*Standard Positioning Service*) ed il numero di epoche totali. Si evidenzia la riduzione di tale rapporto in corrispondenza di un picco di attività ionosferica avvenuto nel novembre 2011 (figura 6).

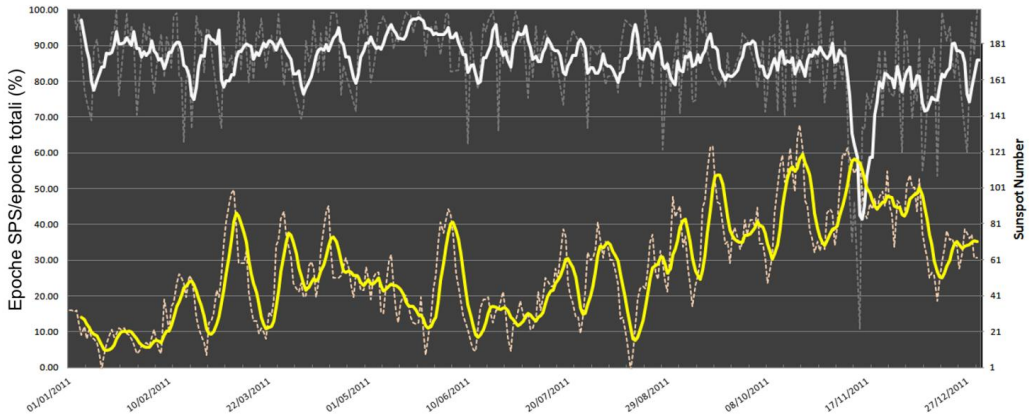
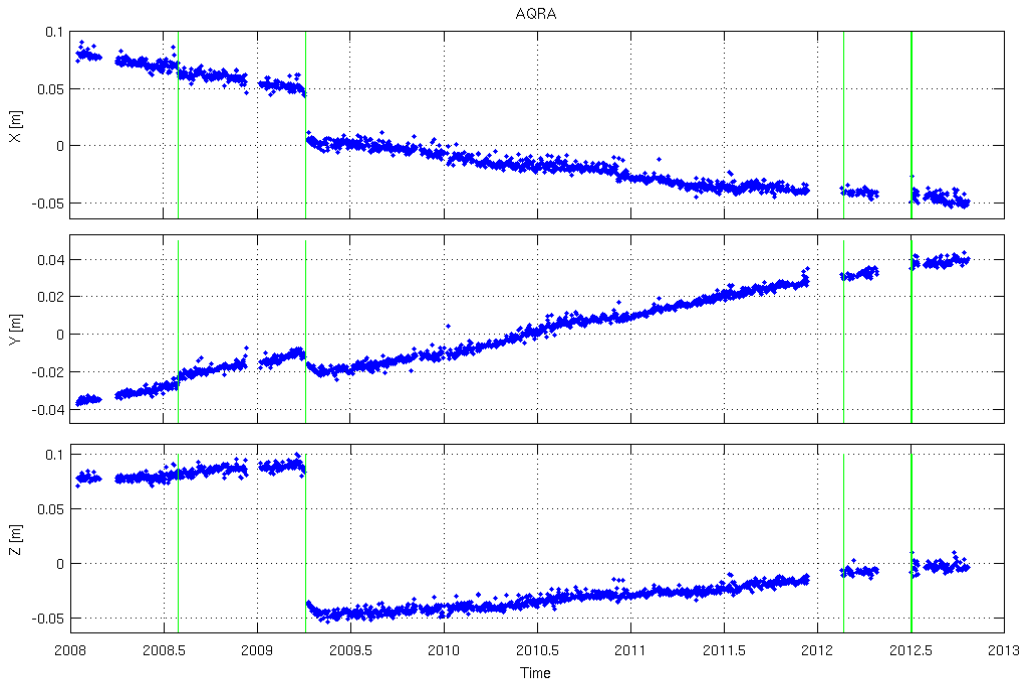


Figura 6. Relazione fra prestazione del servizio NRTK come valore medio della percentuale di epoche SPS/epoche totali (linea bianca) e SunSpot Number (linea gialla) nell'anno 2011.

Per valutare le eventuali influenze dell'attività ionosferica sui prodotti finali dei metodi che prevedono la post elaborazione del dato, sono state ricavate le serie temporali di stazioni facenti parte delle reti regionali dell'Abruzzo e della Puglia. Al solo titolo esemplificativo si riportano alcune serie temporali relative alle coordinate X,Y, Z (figura 7).



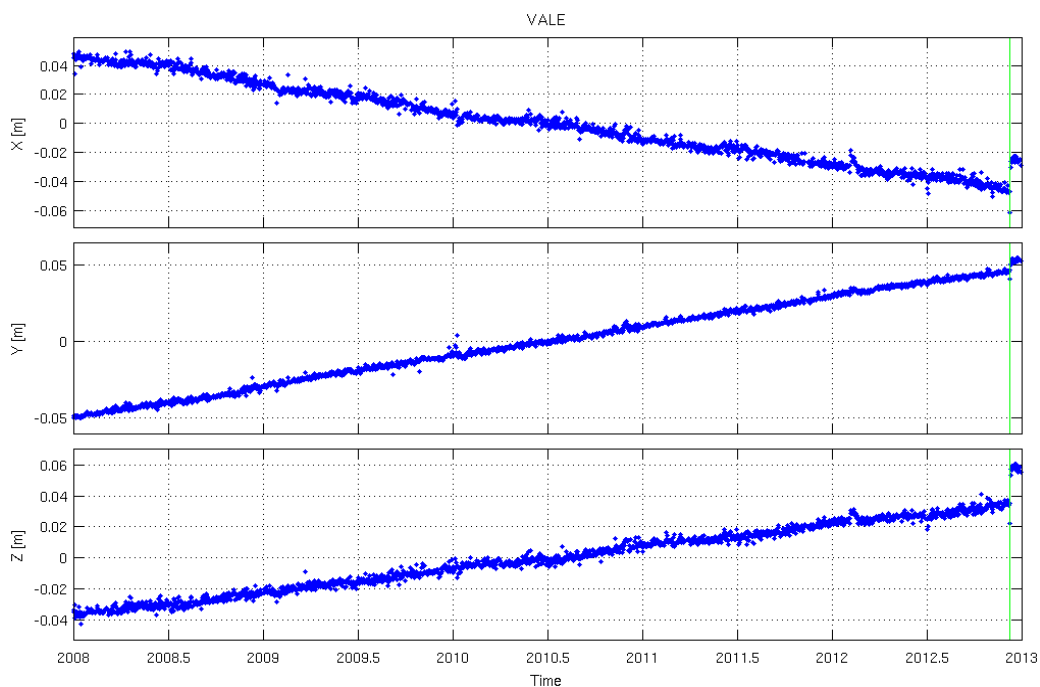


Figura 7. Serie temporali di due stazioni, AQRA (L'Aquila) della rete Abruzzo e VALE (Valenzano) della rete Puglia. Le linee verdi sono in corrispondenza di epoche in cui si verificati eventi significativi (cambio antenna o sismici).

Come si evince dall'analisi delle serie, anche nei periodi caratterizzati da intensa attività ionosferica, le soluzioni giornaliere non risentono di particolari effetti, presentando una distribuzione in linea con i periodi di "normale" attività.

## Conclusioni

L'attività ionosferica è una delle maggiori fonti di disturbo per il posizionamento GNSS. Essa è fortemente influenzata dall'attività solare, che presenta diverse ciclicità tra cui quella undecennale. Il periodo attuale è caratterizzato da una fase di massimo di tale ciclicità e ciò può riflettersi sul comportamento delle reti di limitata estensione che forniscono servizi di posizionamento in tempo reale (NRTK), nate e sviluppatesi in un periodo in cui l'attività ionosferica era in fase decrescente. Si è visto, attraverso l'analisi della serie temporale del TEC, parametro che quantifica l'attività ionosferica, che tali reti sono sensibili al fenomeno e che, in situazioni critiche possono presentare anomalie del calcolo dei parametri correttivi caratteristici del posizionamento in tempo reale. D'altra parte, le tecniche di posizionamento che richiedono la post elaborazione del dato, intrinsecamente più robuste e qualitativamente più affidabili, non sembrano essere influenzate da fenomeni di intensa attività ionosferica.

### **Ringraziamenti**

Si ringraziano la Regione Abruzzo e la Regione Puglia (per quest'ultima, in particolare, la dott.ssa Tina Caroppo e l'ing. Antonio Bellanova), per aver messo a disposizione i dati dalle rispettive reti GNSS.

### **Bibliografia**

Biagi L. (2009), *I fondamentali del GPS*. Geomatics Workbooks, vol. 8.

Mancini F., Dubbini M., Stecchi F. (2012), *Attività solare, effetti ionosferici e servizi NRTK: quali connessioni?*, Geomedia 2/2012, pp. 12-16.

Klobuchar J. (1987), *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 325-331.

Schaer S. (1999), *Mapping and predicting the Earth's Ionosphere using the Global Positioning System*, Ph.D. dissertation, University of Bern.

Schaer S., Gurtner W., Feltens J. (1998), *IONEX: The IONosphere map eXchange format version 1*, Proceedings of the 1998 IGS Analysis Center Workshop, ESOC, pp. 233-247.

### **Siti web consultati**

University of Bern ([www.aiub.unibe.ch](http://www.aiub.unibe.ch)).

JPL (Jet Propulsion Laboratory) – NASA ([www.jpl.nasa.gov](http://www.jpl.nasa.gov)).

NGDC (National Geophysical Data Center, <http://www.ngdc.noaa.gov>).

SIDC (Solar Influences Data Center, [www.sidc.oma.be](http://www.sidc.oma.be)).

Royal Observatory of Belgium (<http://www.astro.oma.be>).