

RETE REGIONALE DI CONTROLLO DELLA SUBSIDENZA:

MISURA DELLA RETE GPS



RELAZIONE FINALE

Referente per conto della Regione Emilia-Romagna, Assessorato Agricoltura, Ambiente e Sviluppo Sostenibile, Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua: il Dirigente **Tiziano Draghetti** Responsabile “Pianificazione della Gestione Sostenibile della Risorsa Idrica”.

Hanno collaborato alla realizzazione del progetto:

Flavio Bonsignore - Responsabile del progetto (ARPA, Ingegneria Ambientale): confronti storici.

Monica Branchi (ARPA, Ingegneria Ambientale): elaborazioni cartografiche.

Marco Unguendoli, Gabriele Bitelli, Luca Vittuari (DISTART - Università di Bologna): misura e calcolo della rete GPS e confronti 1999-2002.

Si raccomanda per le citazioni del presente lavoro la seguente dizione:

Regione Emilia-Romagna – ARPA (2003): *Rete regionale di controllo della subsidenza: misura della rete GPS*. A cura di F. Bonsignore, Bologna, ARPA - Struttura di Ingegneria Ambientale.

In copertina: antenna GPS sul punto 32-Traghetto (Foto F. Bonsignore)

INDICE

1. INTRODUZIONE	2
2. MISURA DELLA RETE GPS	3
2.1 REALIZZAZIONE DEI RILIEVI	3
2.2 CALCOLO E COMPENSAZIONE DELLA “RETE 2002”	4
2.3 CONFRONTO 2002-1999	9
2.3.1 Rielaborazione della “Rete 1999”	9
2.3.2 Confronto ed analisi dei movimenti	9
2.4 CONFRONTO CON I TREND DERIVANTI DALLE MISURE DI LIVELLAZIONE	12
2.4.1 Premessa	12
2.4.2 Analisi dei movimenti	13
3. CONCLUSIONI	20

In allegato:

“VELOCITA’ DI ABBASSAMENTO DEL SUOLO: CONFRONTO FRA I TREND RELATIVI AL PERIODO 1999-2002 E I TREND RELATIVI AL PERIODO PRECEDENTE” su base cartografica della Regione Emilia-Romagna in scala 1:250.000.

1. INTRODUZIONE

La Rete Regionale di Controllo della Subsidenza, istituita nel 1997-98 e misurata per la prima volta nel **1999**, è costituita da una rete di livellazione, la cui misura è prevista ogni 5-6 anni, e da una rete GPS la cui misura è prevista ogni 2-3 anni. Il progetto “Rete Regionale di Controllo della Subsidenza: misura della Rete GPS” ha realizzato la prima ripetizione della misura della rete GPS nel **2002**. Tale progetto è compreso nelle attività e progetti specifici commissionati ad ARPA dalla Regione Emilia-Romagna con Del. della G.R. n. 1445 del 12/8/2002.

Obiettivo della misura della rete GPS è verificare l’andamento del fenomeno della subsidenza, relativamente ai 49 punti distribuiti nell’area di pianura della regione, attraverso il confronto con le misure eseguite nella campagna del 1999.

La rete GPS, come è noto, è utile soprattutto per la definizione della tendenza del fenomeno a larghe maglie - un raffittimento della rete stessa la renderebbe non più conveniente rispetto alla rete di livellazione. La rete di livellazione, d’altra parte, pur offrendo precisioni molto elevate che ben si prestano ad evidenziare movimenti del terreno anche di piccola entità, rimane pur sempre un sistema molto oneroso - anche nel caso si voglia restringere l’indagine a porzioni limitate di territorio - per l’impegno di personale e mezzi e per la necessità di collegarsi a punti ritenuti stabili spesso a notevole distanza dalla zona di interesse.

Nel presente lavoro vengono illustrati i risultati della misura della Rete GPS eseguita nei mesi di giugno-luglio del 2002 e del confronto con le misure rielaborate della precedente campagna del 1999. Vengono inoltre comparati i trend di abbassamento relativi al periodo 1999-2002 (misure GPS) con i trend relativi al periodo precedente - variabile a seconda delle zone - derivanti dalle misure di livellazione. Seguiranno infine alcune considerazioni sia in merito alle ultime tendenze del fenomeno della subsidenza sia in merito all’utilizzo del metodo satellitare GPS.

2. MISURA DELLA RETE GPS

2.1 REALIZZAZIONE DEI RILIEVI

La misura della rete GPS si è svolta nei mesi di giugno e luglio 2002 e costituisce la prima ripetizione dei rilievi dopo la campagna del 1999.

Le misure sono state precedute dal sopralluogo diretto su tutti i punti della rete. E' stata così evidenziata la scomparsa dei vertici 41 e 55 e la sopravvenuta scarsa stabilità dei vertici 1 e 53; si è dunque provveduto alla scelta di un nuovo punto per il vertice 41 (in corrispondenza di un caposaldo di livellazione della Rete) e per gli altri alla materializzazione di tre nuovi vertici - con la stessa tipologia - in prossimità di quelli preesistenti.

Per l'esecuzione del rilievo hanno operato sul territorio 6 squadre che hanno lavorato per un totale di 18 giorni nel periodo dal 24 giugno al 25 luglio 2002.

La modalità di rilevamento GPS impiegata per le misure è stata quella di maggiore precisione attualmente disponibile, ossia il *posizionamento relativo statico*. La strumentazione è consistita in 6 ricevitori geodetici in grado di ricevere entrambe le portanti L1 ed L2 (doppia frequenza). In particolare i parametri relativi all'acquisizione sono l'intervallo di tempo fissato a 15 secondi e l'angolo di taglio per le osservazioni pari a 15° di elevazione.

Con questa metodologia, attraverso uno stazionamento contemporaneo su più vertici, è possibile la misura di un numero di baseline indipendenti per sessione di misura pari al numero di ricevitori contemporaneamente attivi meno uno (n-1). Ogni singola baseline porta alla determinazione delle componenti vettoriali nel sistema di riferimento geocentrico - la baseline è il segmento orientato nello spazio (vettore) che congiunge a due a due le stazioni in acquisizione contemporanea (differenza tra le coordinate geocentriche x, y, z delle 2 stazioni). Tra le possibili baseline ottenibili dai ricevitori contemporaneamente in stazione sono state scelte in fase di calcolo quelle (indipendenti) che fornivano una migliore geometria in termini di forma della rete (vedi fig. 1).

Il numero delle baseline è stato complessivamente di 222 e ha coinvolto 66 vertici geodetici (comprendendo anche le stazioni permanenti ed i vertici di nuova istituzione) evidenziando una ampia sovrabbondanza di osservazioni, circa tripla rispetto al numero strettamente necessario. Ciascun vertice è stato occupato almeno due volte da operatori diversi al fine di garantire, da un lato, un controllo su eventuali errori grossolani di stazionamento o di misura dell'altezza dell'antenna, e, dall'altro, una ridondanza nelle misure sufficiente a realizzare un'analisi, a posteriori, basata su criteri statistici.

Il rilievo della rete ha richiesto 32 sessioni di misura, in numero di due per giornata. La durata programmata per ciascuna sessione (con la contemporaneità nella acquisizione di tutte e sei le squadre) è stata di 4 ore e 30', per tutelarsi da inevitabili contrattempi dovuti a questioni logistiche; da un controllo effettuato a posteriori sui dati è stato verificato che nessuno strumento ha comunque operato con sessioni di misura inferiori alle 4 ore.

Al fine di irrigidire il collegamento al sistema di riferimento geodetico internazionale ITRF2000 sono state impiegate le osservazioni acquisite dalle stazioni permanenti GPS di Medicina, Ferrara (Università di Ferrara), Pavia (Università di Pavia), Prato (Università di Firenze), Venezia (Consorzio Venezia Nuova), Porto Corsini. I dati di quest'ultima stazione sono stati gentilmente concessi dalla Professoressa Susanna Zerbini dell'Università di Bologna. Al fine di mantenere un livello omogeneo di precisione nelle misure si è cercato di contenere la lunghezza delle baseline di connessione alle stazioni permanenti. Sono state impiegate quindi solo per quelle sessioni che vedevano occupati vertici della rete di controllo nell'ambito di alcune decine di chilometri dalle stazioni permanenti stesse.

Come previsto in fase di progettazione delle misure, sono state eseguite anche osservazioni della durata complessiva di 48 h per cinque vertici: 10, 22, 35, 57, 59 (Brescia).

2.2 CALCOLO E COMPENSAZIONE DELLA “RETE 2002”

Come è ovvio la parte più gravosa e delicata per il calcolo di una rete di grandi dimensioni e con un numero di misure enormemente sovrabbondante è quello della sistemazione dei dati, della pulizia degli stessi, dell'eliminazione di baseline

palesemente errate per errori sulla misura di altezza dell'antenna o per disturbi elettromagnetici su di uno strumento. Dopo tale analisi a priori si è passati quindi al calcolo ed alla compensazione della rete riattaccandosi, per quanto possibile, alle stazioni GPS permanenti interne ed esterne alla rete, e portando avanti i calcoli indipendentemente, con due software (GeoGenius 2000, Bernese 4.2). Purtroppo è da segnalare che la stazione permanente di Padova, fondamentale per la "rete 1999" è stata spostata e, a nostra conoscenza, non esiste un collegamento diretto tra il vecchio ed il nuovo punto. Ciò ha fatto sì che tale stazione non si sia potuta utilizzare, nella fase di confronto fra le due reti, come punto fisso sul quale effettuare la rototraslazione, con un evidente indebolimento del sistema a nord.

Ma, tornando al calcolo della "rete 2002", esso è stato effettuato inserendo i dati acquisiti dalle stazioni permanenti di Prato, Pavia, Medicina, Porto Corsini, Ferrara e Venezia, ottenendo una rete veramente ottimale (Fig. 1).

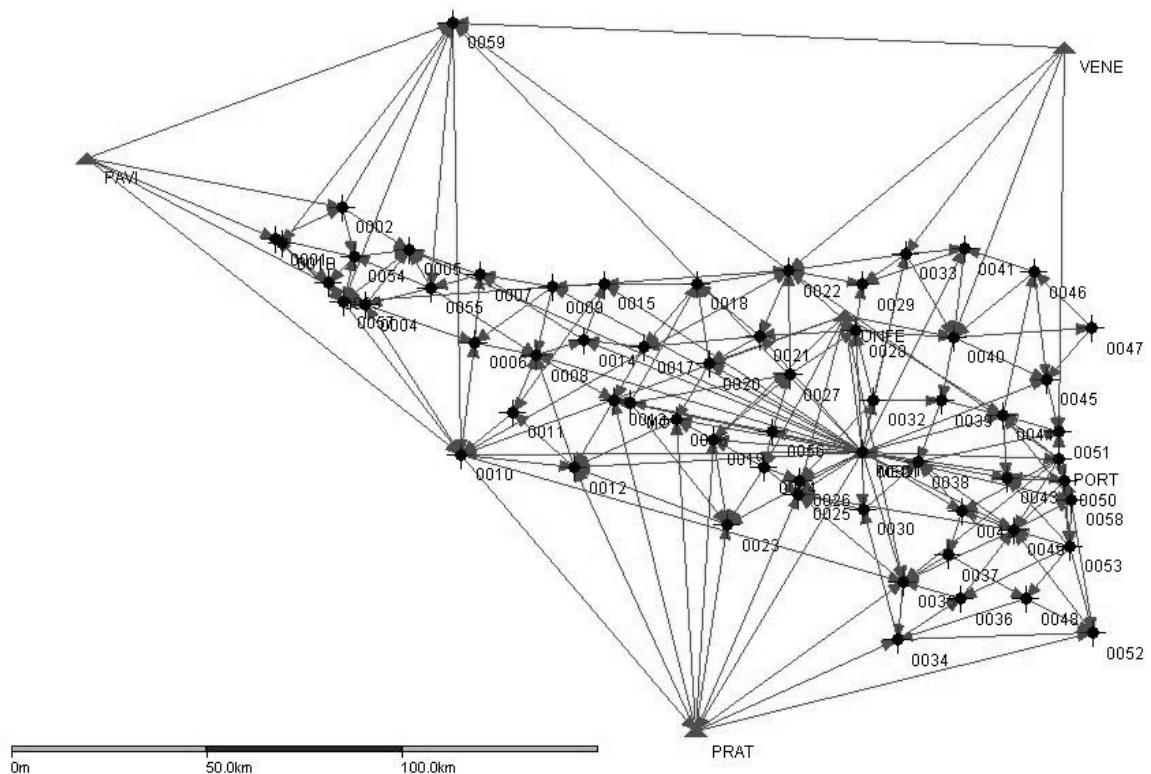


Fig. 1 – Schema dei vettori calcolati nella rete 2002

Dall'analisi statistica a posteriori si è proceduto ad un'ulteriore pulizia dei dati che, alla fine, ha portato a risultati ottimali dal punto di vista planimetrico (semidiametro maggiore delle ellissi di errore al 95% dell'ordine del centimetro), mentre per l'errore sulle quote non si è riusciti a farlo scendere a valori inferiori a 1.5-1.7 cm nonostante diversi tentativi togliendo ed aggiungendo baseline sospette, stazioni permanenti ecc.

Il fatto della minor precisione in quota del sistema è d'altra parte ben noto e dipende da diversi fattori quali la geometria stessa del sistema, l'effetto troposferico, la modellazione delle antenne, ecc., tuttavia, si può affermare che i risultati ottenuti sono piuttosto buoni. Infatti, analizzando le serie temporali delle stazioni permanenti pubblicate in ambito ASI, si può dire che i risultati ottenuti sono in linea con quelli derivanti dalle stazioni permanenti stesse, come si può vedere dai grafici ad esempio delle soluzioni giornaliere delle stazioni di Prato e Medicina (figure 2 e 3), nei quali le oscillazioni in quota risultano fortemente più elevate rispetto a quelle delle altre due componenti (Nord ed Est).

Complessivamente dai grafici ASI si può avere una conferma sperimentale circa l'alta precisione ottenibile nelle componenti planimetriche (N, E), mentre per la componente altimetrica (U) si può osservare un livello di rumore nelle posizioni ottenute giornalmente nell'ambito di circa ± 1.5 cm.

I grafici ASI mostrano un trend di abbassamento di 2.27 e 5,64 mm/anno rispettivamente per la stazione di Prato e di Medicina. Il livello di significatività per le quote (1.5-1.7 cm) risulta congruente con le analisi effettuate da altri centri di ricerca su lunghe serie temporali di dati acquisiti da stazioni GPS permanenti. Tali analisi mostrano infatti per la componente altimetrica uno scarto quadratico medio dell'ordine del centimetro, anche se ottenute in condizioni ottimali (soluzioni giornaliere per lunghissimi periodi, con continuità temporale e ottimizzazione del sito di ricezione). Tali caratteristiche permettono sicuramente di mediare alcune cause di errore sia sistematiche che casuali, diversamente da quanto può avvenire per le misure molto più limitate - sia dal punto di vista temporale sia sulla scelta del sito ottimale - realizzate sulla nostra rete.

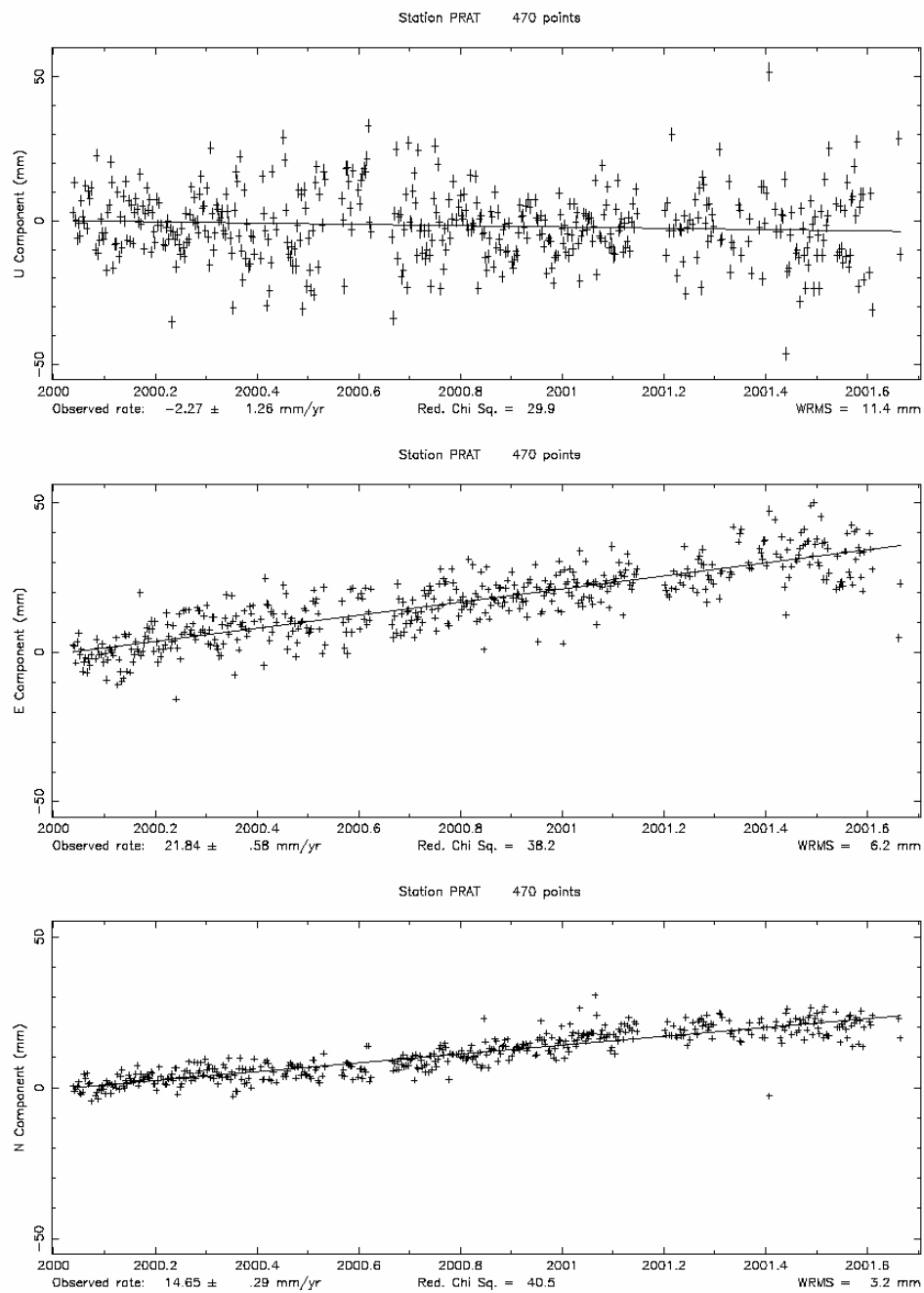


Fig. 2 - Stazione permanente di Prato. Nell'ordine dall'alto in basso: grafico della componente verticale (Up), grafico della componente orizzontale Est (E), grafico della componente orizzontale Nord (N). (I grafici sono desunti dal sito dell'A.S.I. - Agenzia Spaziale Italiana: http://geodaf.mt.asi.it/DATA/GEOD/GPSD/GEODETIC_SOLUTIONS/TIME_SERIES)

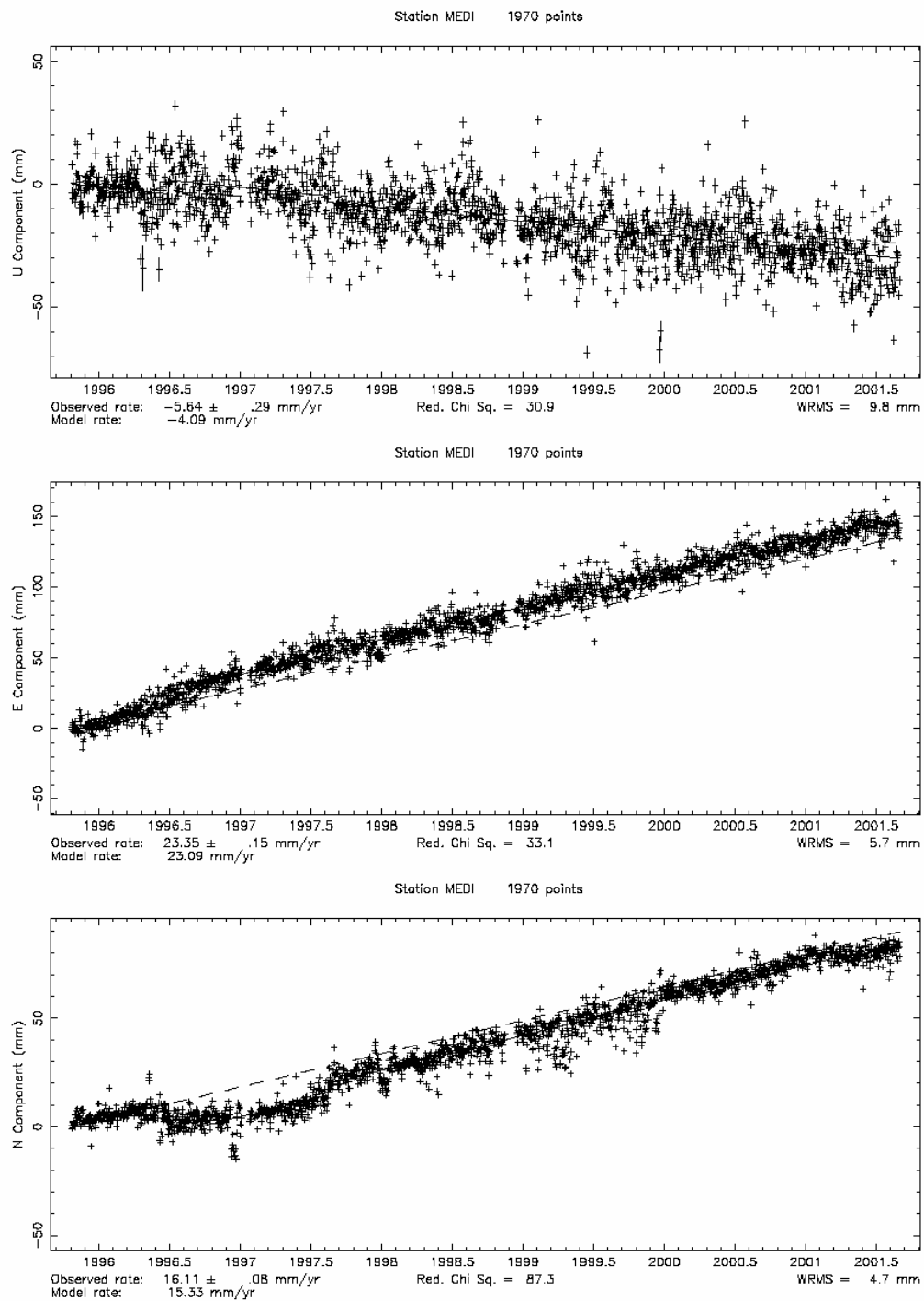


Fig. 3 Stazione permanente di Medicina. Nell'ordine dall'alto in basso: grafico della componente verticale (Up), grafico della componente orizzontale Est (E), grafico della componente orizzontale Nord (N). (I grafici sono desunti dal sito dell'A.S.I. - Agenzia Spaziale Italiana:

http://geodaf.mt.asi.it/DATA/GEOD/GPSD/GEODETIC_SOLUTIONS/TIME_SERIES)

2.3 CONFRONTO 2002-1999

2.3.1 Rielaborazione della “Rete 1999”

Una volta rassicurati sulla bontà delle misure 2002, come da programma, si sono ripresi i file originali delle osservazioni del 1999 per un riprocessamento completo con gli stessi due software usati per le misure del 2002. Ciò ha portato ad un ulteriore screening dei dati originali con un ulteriore controllo di qualità.

I risultati ottenuti si sono rivelati in linea con quelli delle ultime misure.

2.3.2 Confronto ed analisi dei movimenti

Come noto le coordinate GPS si collocano in un sistema di riferimento che varia nel tempo e quindi, grossolanamente, si può dire che le coordinate ottenute in un periodo non sono direttamente paragonabili con quelle ottenute in un altro periodo. Esiste, è vero, la possibilità di riportare il tutto allo stesso sistema, ma ai fini del calcolo della subsidenza, la via più semplice e sicura è quella di far coincidere le coordinate delle due misure per quei punti che geologicamente si possono ritenere stabili attraverso una rototraslazione spaziale a sette parametri. Avendo a disposizione un numero di tali punti ampiamente superiore a tre, ed eseguendo la rototraslazione ai minimi quadrati si può, a posteriori, sulla base dei residui, valutare, da un lato, la bontà delle misure se i punti possono ritenersi stabili o, dall'altro, la stabilità dei punti se le misure sono buone.

Per la rototraslazione sono stati usati nove punti a Sud (57,10, 11, 12, 23, 25, 34, 35, 36) e due punti a Nord: Virle (BS) e Venezia. I risultati si sono dimostrati veramente ottimali con residui su tali punti quasi tutti inferiori al centimetro (vedi Tabella I).

I residui sugli altri punti, vista la bontà della rete e la sostanziale stabilità dei punti di controllo, possono essere considerati come movimenti.

Occorre precisare che l'errore stimato per la componente verticale su una singola campagna di misure (1.5 cm), attraverso una propagazione della varianza applicata al confronto fra le due campagne, porta ad un grado di attendibilità del confronto stesso di circa 2 cm in un intervallo di tre anni. Da ciò discende la possibilità di individuare con

una certa sicurezza movimenti annui non inferiori a 0.7 cm. Volendo individuare movimenti di circa 0.5 cm/anno è necessario ampliare l'intervallo fra le due osservazioni a circa 5 anni.

Nella stessa Tabella 1 sono riportati in metri i residui della rototraslazione di tutti i punti considerati, ivi compresi il 55 ed il 53 che sono stati rimaterializzati e collegati altimetricamente (con livellazione geometrica) ai punti preesistenti. Non sono riportati invece i punti 1 e 41 che sono stati rimaterializzati senza possibilità di riattacco ai punti precedenti (il primo danneggiato, il secondo scomparso). In neretto sono stati evidenziati i punti che presentano un movimento in quota superiore a 2 cm e, quindi, da potersi considerare particolarmente significativi.

Tab. 1 - Risultati della rototraslazione a 7 parametri fra le misure del 1999 e quelle del 2002. I punti indicati senza la lettera M sono stati considerati come fissi.

Progr.	Punto	RESIDUI (m)			Località	Prov.
		Nord	Est	Quota		
1	2	-0.0095	0.0021	-0.0111	M Castelvetro Piacentino	PC
2	3	-0.0188	-0.0061	-0.0116	M Fiorenzuola d'Arda	PC
3	4	-0.0139	-0.0043	0.0013	M Fidenza	PR
4	5	-0.0157	0.0002	-0.0051	M Ragazzola (Roccabianca)	PR
5	6	-0.0152	-0.0201	-0.0225	M S. Prospero	PR
6	7	-0.0209	-0.0097	-0.0108	M Mezzano Superiore (Colorno)	PR
7	8	0.0006	0.0023	-0.0315	M Cadelbosco di Sopra (Reggio Emilia)	RE
8	9	-0.0140	-0.0063	-0.0229	M Guastalla	RE
9	10	-0.0022	0.0005	-0.0041	Compiano (Canossa)	RE
10	11	0.0022	-0.0005	0.0041	Salvarano (Albinea)	RE
11	12	0.0100	0.0013	-0.0046	S. Michele dei Mucchietti (Prignano sulla Secchia)	MO
12	13	0.0037	-0.0081	-0.0142	M Modena	MO
13	14	-0.0077	-0.0196	-0.0521	M Canolo (Correggio)	RE
14	15	-0.0060	-0.0030	-0.0070	M Reggiolo	RE
15	16	0.0076	-0.0026	-0.0071	M Castelfranco Emilia	MO
16	17	0.0006	-0.0072	-0.0051	M Soliera	MO
17	18	-0.0028	-0.0039	-0.0095	M Quarantoli (Mirandola)	MO

18	19	-0.0020	-0.0043	-0.0175	M	Anzola dell'Emilia	BO
19	20	0.0018	-0.0092	-0.0533	M	Crevalcore	BO
20	21	-0.0059	-0.0050	-0.0167	M	Pilastrello (Cento)	FE
21	22	-0.0052	-0.0001	-0.0308	M	Stellata (Bondeno)	FE
22	23	-0.0061	-0.0014	0.0014		Marzabotto	BO
23	24	0.0013	-0.0009	-0.0189	M	Bologna	BO
24	25	0.0041	0.0025	-0.0023		Castel de' Britti (S. Lazzaro di Savena))	BO
25	26	-0.0060	-0.0034	-0.0541	M	Idice (S. Lazzaro di Savena)	BO
26	27	-0.0019	0.0022	0.0006	M	S. Pietro in Casale	BO
27	28	-0.0025	-0.0036	0.0011	M	Fossanova	FE
28	29	0.0037	-0.0086	-0.0087	M	Francolino	FE
29	30	0.0062	0.0022	-0.0105	M	Toscanella (Dozza)	BO
30	31	-0.0039	-0.0109	-0.0177	M	Fiorentina (Medicina)	BO
31	32	-0.0125	-0.0070	-0.0146	M	Traghetto (Argenta)	FE
32	33	-0.0444	0.0204	-0.0546	M	Guarda Ferrarese (Ro)	FE
33	34	0.0005	-0.0014	0.0125		Tredozio	FC
34	35	0.0001	-0.0020	-0.0045		Brisighella	RA
35	36	-0.0015	-0.0024	-0.0010		Castrocaro	FC
36	37	-0.0003	0.0038	-0.0524	M	S. Giorgio (Faenza)	RA
37	38	-0.0025	-0.0008	-0.0268	M	S. Patrizio (Conselice)	RA
38	39	-0.0024	0.0032	-0.0130	M	La Fiorana (Argenta)	FE
39	40	-0.0067	0.0011	-0.0199	M	Migliarino	FE
40	42	0.0086	-0.0038	-0.0277	M	Cotignola	RA
41	43	-0.0010	-0.0006	0.0001	M	Mezzano	RA
42	44	-0.0052	0.0011	-0.0327	M	Argine Agosta (Argenta)	FE
43	45	0.0062	0.0024	-0.0215	M	Porto Garibaldi (Comacchio)	FE
44	46	0.0036	-0.0021	-0.0091	M	Mesola	FE
45	47	-0.0043	-0.0002	-0.0453	M	Gorino Ferrarese	FE
46	48	-0.0401	-0.0288	-0.0171	M	Forlimpopoli	FE
47	49	-0.0045	-0.0026	-0.0156	M	Coccolia	RA
48	50	-0.0024	0.0084	-0.0213	M	Punta Marina	RA
49	51	-0.0006	-0.0070	-0.0154	M	Casalborsetti	RA
50	52	0.0062	0.0028	-0.0354	M	S. Giovanni in Compito (Savigano sul Rubicone)	FC
51	53	0.0001	0.0001	-0.0430	M	Cervia	RA
52	54	-0.0017	0.0032	-0.0065	M	Bersano (Besenano)	PC

53	55	-0.0123	0.0012	-0.0284	M	Ronco Campo (Trecasali)	PR
54	56	-0.0021	0.0081	-0.1126	M	Castelmaggiore	BO
55	57	-0.0035	-0.0009	0.0006		Castelnuovo Fogliani (Aseno)	PC
56	58	-0.0143	0.0298	-0.0465	M	Lido Adriano	RA
57	59	-0.0030	0.0009	0.0003		Virle (Rezzato)	BS
58	VE	-0.0016	0.0026	-0.0028		Venezia	VE

2.4 CONFRONTO CON I TREND DERIVANTI DALLE MISURE DI LIVELLAZIONE

2.4.1 Premessa

Successivamente alla prima misura della Rete Regionale (rete GPS e rete di livellazione), si procedette ad effettuare un primo confronto tra le quote - opportunamente omogeneizzate - dei rilievi precedenti e le quote derivanti dalla livellazione del 1999¹. Tuttavia, l'analisi dei movimenti verticali del suolo, che in tal modo si potè realizzare, fu particolarmente complessa, essendo le quote storiche spesso riferite a periodi diversi tra loro. Inoltre, laddove i confronti coinvolgevano misure omogeneizzate, i movimenti evidenziati potevano presentare un grado d'incertezza difficilmente valutabile. In sostanza, i dati storici si presentavano talmente frammentari e disomogenei, sia dal punto di vista spaziale che temporale, da consigliare una certa precauzione nella lettura dei movimenti.

Ora, accingendoci ad esaminare i risultati del confronto tra i trend derivanti dalle due campagne GPS (1999 e 2002) ed i trend derivanti proprio da quei confronti tra le misure di livellazione di cui sopra, è opportuno ricordare che oggi, come ieri, tali misure sono da prendere con le stesse precauzioni, per cui, eventuali inversioni di tendenza, ad esempio, andrebbero valutate caso per caso tenendo conto del grado d'incertezza variabile che potrebbe esserci e, naturalmente, sapendo che, dall'altra parte, i movimenti evidenziati dal confronto fra le campagne GPS 1999 e 2002, pur discendendo da misure

¹Cap. A5-Confronti ed elaborazioni in Regione Emilia-Romagna - ARPA (2001): *Misura della rete regionale di controllo della subsidenza, misura di linee della rete costiera non comprese nella rete*

di alta qualità, sono tuttavia gravati da quell'errore di circa 2 cm che, allo stato dell'arte, non sembra poter essere abbattuto ulteriormente. Ciò fa sì che i movimenti inferiori a tali valori potrebbero essere compresi nel campo dell'errore, quindi, in definitiva, il metodo GPS diventa maggiormente attendibile o in presenza di movimenti annui superiori a 0.7 cm, in un periodo non inferiore a tre anni, oppure prendendo in considerazione un periodo maggiore di tre anni, ad esempio 5 anni, per il quale si potrà individuare con maggior sicurezza anche un movimento annuo, lineare nel tempo, di circa 0.5 cm.

2.4.2 Analisi dei movimenti

Nella tabella 2 viene riportata una sintesi del confronto tra il trend dei movimenti annui relativi al periodo 1999-2002 (misure GPS) e il trend dei movimenti annui relativi al periodo precedente, variabile, questo, a seconda delle aree in base alla disponibilità dei dati di livellazione. Si è cercato, inoltre, di fornire anche qualche elemento in più che possa diversificare il grado di attendibilità di tale confronto.

In particolare, osserviamo che nella colonna 3 i valori di movimento annuo nel periodo 1999-2002 messi tra parentesi sono quelli corrispondenti ad un movimento complessivo in tale periodo inferiore a 2 cm. In base a quanto detto in premessa, tali movimenti potrebbero essere gravati da un errore superiore - o pari nel caso limite - alla stessa entità del movimento; pur tuttavia, il segno negativo, rende tali valori non privi di una certa significatività.

Anche nella colonna 4 alcuni valori sono stati messi tra parentesi, ciò per indicare un maggior grado di indeterminazione di tali dati; essi infatti non derivano da un confronto fra misure puntuali, bensì dalla lettura della carta a curve di uguale velocità di abbassamento (isocinetiche)² e quindi sono frutto di interpolazioni. Si è ricorsi a tali letture laddove non esisteva un caposaldo di livellazione con più di una misura in corrispondenza o nelle immediate vicinanze (all'interno di un raggio di 2 Km) dei punti GPS; in particolare si tratta di 8 casi su 47 punti interessati dal confronto.

regionale, rilievi batimetrici. A cura di F. Bonsignore, Bologna, ARPA-Struttura di Ingegneria Ambientale.

² Ibid., pag. 40.

Nella colonna 5 viene riportato, per quasi tutti i valori di trend precedente, il periodo per il quale tale valore è stato calcolato. Come è possibile osservare i periodi sono spesso diversi tra loro; in generale si può dire che i trend corrispondenti ai periodi più recenti sono anche i più attendibili. Laddove non compare il periodo di riferimento significa che non è stato possibile determinarlo con precisione essendo il trend ricavato dalla lettura delle isocinetiche e, quindi, da valori derivanti da interpolazione fra misure effettuate in periodi diversi tra loro.

In figura 4 è riportata una sintesi delle informazioni raccolte nella tabella 2, realizzando il confronto, a mezzo di istogrammi costruiti su ogni punto utile, tra il valore della velocità di abbassamento calcolata nell'ultimo periodo 1999-2002 e il valore relativo al periodo precedente - periodo che viene specificato di volta in volta in corrispondenza dell'istogramma stesso.

Nel seguito verranno analizzati i punti interessati dal confronto divisi per provincia.

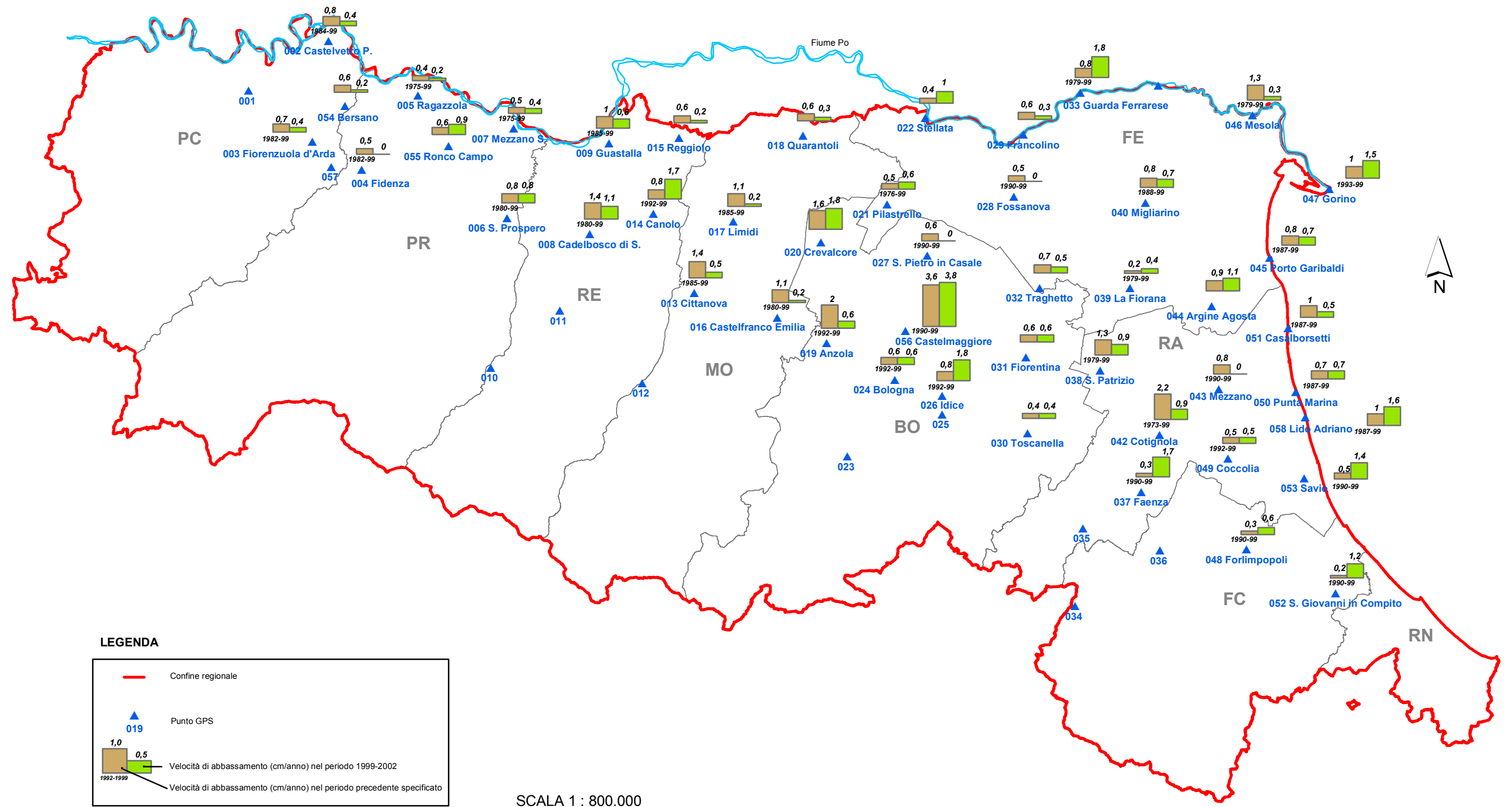
Tab. 2 - Sintesi dei confronti tra il trend dei movimenti rilevati nel periodo 1999-2002 e il trend dei movimenti relativo al periodo precedente, variabile a seconda delle aree in base alla disponibilità dei dati di livellazione.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Punto	Movimento 1999-2002 (cm)	Trend 1999-2002 (cm/anno)	Trend precedente (cm/anno)	Periodo di riferimento del trend precedente	Località	Prov.	Caposaldo di verifica del trend precedente	Note
2	-1.1	(-0.4)	-0.8	1984-99	Castelvetro Piacentino	PC	002500 a circa 2 Km al punto	abbassamento in diminuzione del 50%
3	-1.2	(-0.4)	-0.7	1982-99	Fiorenzuola d'Arda	PC	006020 adiacente al punto	abbassamento in diminuzione del 50%
54	-0.7	(-0.2)	(-0.6)		Bersano (Besenzone)	PC		(In diminuzione) trend prec. derivato da isocinetiche
4	0.1	(0)	-0.5	1982-99	Fidenza	PR	006120 a circa 1Km dal punto	abbassamento precedente annullato
5	-0.5	(-0.2)	-0.4	1975-99	Ragazzola (Roccabianca)	PR	000040 a circa 2 Km dal punto	abbassamento precedente annullato
6	-2.3	-0.8	-0.8	1980-99	S. Prospero	PR	015070 a circa 500 m dal punto	abbassamento stabile
7	-1.1	(-0.4)	-0.5	1975-99	Mezzano Superiore (Colorno)	PR	011230 a circa 500 m dal punto	abbassamento stabile
55	-2.8	-0.9	(-0.6)		Ronco Campo (Trecasali)	PR		(In aumento) trend prec. derivato da isocinetiche
8	-3.2	-1.1	(-1.4)	1980-99	Cadelbosco di Sopra (Reggio Emilia)	RE		(In diminuzione) trend prec. derivato da isocinetiche
9	-2.3	-0.8	-1.0	1985-99	Guastalla	RE	016020 a circa 1Km dal punto	abbassamento stabile
14	-5.2	-1.7	-0.8	1992-99	Canolo (Correggio)	RE	021020 a circa 4 Km dal punto	abbassamento in aumento di un ordine di grandezza
15	-0.7	(-0.2)	(-0.6)		Reggiolo	RE		(In diminuzione) trend prec. derivato da isocinetiche
13	-1.4	(-0.5)	-1.4	1985-99	Cittanova (Modena)	MO	029050 a circa 300 m dal punto	abbassamento in diminuzione di un ordine di grandezza
16	-0.7	(-0.2)	-1.1	1980-99	Castelfranco Emilia	MO	044050 a circa 500 m dal punto	abbassamento in diminuzione di un ordine di grandezza
17	-0.5	(-0.2)	-1.1	1985-99	Limidi (Soliera)	MO	035010 a circa 2 Km dal punto	abbassamento in diminuzione di un ordine di grandezza
18	-1.0	(-0.3)	(-0.6)		Quarantoli (Mirandola)	MO		(In diminuzione) trend prec. derivato da isocinetiche
19	-1.8	(-0.6)	-2.0	1992-99	Anzola dell'Emilia	BO	trend mediato tra gli adiacenti 052020 e 052030	abbassamento in diminuzione di oltre un ordine di grandezza
20	-5.3	-1.8	(-1.6)		Crevalcore	BO		(abbassamento stabile) trend prec. derivato da isocinetiche
24	-1.9	(-0.6)	-0.6	1992-99	(Fac. di Ingegneria) Bologna	BO	trend mediato tra gli adiacenti 025230 e 025241	abbassamento stabile
26	-5.4	-1.8	-0.8	1992-99	Idice (S. Lazzaro di Savena)	BO	trend mediato tra gli adiacenti 067120 e 000330	abbassamento in aumento di un ordine di grandezza
27	0.1	(0)	-0.6	1990-99	S. Pietro in Casale	BO	049100 a circa 500 m dal punto	abbassamento precedente annullato

30	-1.1	(-0.4)	-0.4	1990-99	Toscanello (Dozza)	BO	080050 a circa 700 m dal punto	abbassamento stabile
31	-1.8	(-0.6)	-0.6	1992-99	Fiorentina (Medicina)	BO	066100 a circa 2 Km dal punto	abbassamento stabile
56	-11.3	-3.8	-3.6	1990-99	Castelmaggiore	BO	051130 a circa 500 m dal punto	abbassamento stabile
28	0.1	(0)	-0.5	1990-99	Fossanova	FE	060230 a circa 200 m dal punto	abbassamento precedente annullato
29	-0.9	(-0.3)	(-0.6)		Francolino	FE		(In diminuzione) trend prec. derivato da isocinetiche
21	-1.7	(-0.6)	-0.5	1976-99	Pilastrello (Cento)	FE	040050 a circa 2 Km dal punto	abbassamento stabile
22	-3.1	-1	(-0.4)		Stellata (Bondeno)	FE	038160 a circa 5 Km dal punto	abbassamento in aumento di un ordine di grandezza
32	-1.5	(-0.5)	-0.7	1987-99	Traghetto (Argenta)	FE	062020 a circa 300 m dal punto	abbassamento in leggera diminuzione
33	-5.5	-1.8	-0.8	1979-99	Guarda Ferrarese (Ro)	FE	055080 a circa 300 m dal punto	abbassamento in aumento di un ordine di grandezza
39	-1.3	(-0.4)	-0.2	1979-99	La Fiorana (Argenta)	FE	073090 a circa 300 m dal punto	abbassamento raddoppiato
40	-2.0	-0.7	-0.8	1988-99	Migliarino	FE	070020 a circa 200 m dal punto	abbassamento stabile
44	-3.3	-1.1	(-0.9)		Argine Agosta (Argenta)	FE		(abbassamento stabile) trend prec. derivato da isocinetiche
45	-2.2	-0.7	-0.8	1987-99	Porto Garibaldi (Comacchio)	FE		abbassamento stabile
46	-0.9	(-0.3)	-1.3	1979-99	Mesola	FE	098110 a circa 1.5 Km dal punto	abbassamento in diminuzione di un ordine di grandezza
47	-4.5	-1.5	-1.0	1993-99	Gorino Ferrarese	FE	140181 adiacente al punto	abbassamento in aumento del 50%
42	-2.8	-0.9	(-2.2)	1973-99	Cotignola	RA	trend mediato tra 094170 e 108030 (1.5 Km)	abbassamento in diminuzione di oltre un ordine di grandezza
49	-1.6	(-0.5)	-0.5	1992-99	Coccolia	RA	107060 a circa 300 m dal punto	abbassamento stabile
50	-2.1	-0.7	-0.7	1987-99	Punta Marina	RA	130180 a circa 300 m dal punto	abbassamento stabile
51	-1.5	(-0.5)	-1.0	1987-99	Casalborsetti	RA	104090 coincidente con il punto	abbassamento dimezzato
53	-4.3	-1.4	-0.5	1990-99	Savio (Cervia)	RA	000750 a circa 1.3 Km dal punto	abbassamento in aumento di un ordine di grandezza
37	-5.2	-1.7	-0.3	1990-99	S. Giorgio (Faenza)	RA	111010 a circa 1 Km dal punto	abbassamento in aumento di oltre un ordine di grandezza
38	-2.7	-0.9	-1.3	1979-99	S. Patrizio (Conselice)	RA	075050 adiacente al punto	abbassamento in diminuzione
58	-4.7	-1.6	-1.0	1987-99	Lido Adriano	RA	130040 adiacente al punto	abbassamento in aumento del 50%
43	0.0	(0)	-0.8	1990-99	Mezzano	RA	106090 adiacente al punto	abbassamento precedente annullato
48	-1.7	(-0.6)	-0.3	1990-99	Forlimpopoli	FC	115140 a circa 500 m dal punto	abbassamento raddoppiato
52	-3.5	-1.2	-0.2	1990-99	S. Giovanni in Compito (Savignano sul Rubicone)	FC	118160 adiacente al punto	abbassamento in aumento di un ordine di grandezza

VELOCITA' DI ABBASSAMENTO DEL SUOLO: CONFRONTO FRA I TENDI RELATIVI AL PERIODO 1999-2002 E I TENDI RELATIVI AL PERIODO PRECEDENTE

Fig. 4



Provincia di Piacenza

Gli unici tre punti disponibili (2, 3 e 54) - il punto 1 essendo stato rimaterializzato senza possibilità di riattacco al punto del 1999 - segnalano un movimento annuo di pochi millimetri (siamo all'interno del campo di errore del sistema) con un abbattimento del 50% rispetto al trend precedente relativo al periodo 1982/84-99. Anche il punto 54 situato in una zona di bassa pianura mai indagata prima (trend precedente ricavato per interpolazione) mostra un movimento pressoché nullo.

Provincia di Parma

Osserviamo sui due punti 4 e 5, rispettivamente di Fidenza (Via Emilia) e Ragazzola (in prossimità del F. Po), come il precedente trend di abbassamento di 4-5 mm/anno si sia ora annullato. Sui punti 6 e 7, rispettivamente di S. Prospero (a est di Parma) e di Mezzano Superiore (in prossimità del F. Po), viene confermato il trend precedente con rispettivamente -0.8 e -0.5 cm/anno. Mentre sul punto 55, presso Ronco Campo (Trecasali), si osserva un movimento di quasi 1 cm/anno, con un aumento del 50% rispetto al precedente valore (stimato per interpolazione).

Provincia di Reggio Emilia

Sui punti 8 e 9, rispettivamente di Cadelbosco di Sopra (a nord di Reggio E.) e di Guastalla (a ridosso del F. Po), vengono confermati i trend precedenti con movimenti intorno a 1 cm/anno. Sul punto 15 (Reggiolo) il movimento è pressoché nullo. Mentre sul punto 14 (Canolo - Correggio) si evidenzia un movimento di 1.7 cm/anno, raddoppiato rispetto a quello del precedente periodo (1992-99).

Provincia di Modena

Per ognuno dei 4 punti presenti, 13 (Cittanova - Modena), 16 (Castelfranco Emilia), 17 (Limidi - Soliera) e 18 (Quarantoli - Mirandola) si osserva un generale abbattimento dei precedenti valori di subsidenza - tutti superiori al centimetro tranne il punto 18 - che si attestano ora su alcuni mm/anno fino ad un massimo di 0.5 cm/anno a Cittanova.

Provincia di Bologna

Su cinque degli otto punti presenti nel Bolognese si può osservare una sostanziale continuità del fenomeno di subsidenza presente nel periodo precedente. In un caso si evidenzia un forte incremento e in due casi una diminuzione. In continuità con il passato si trovano i punti 20 (Crevalcore) con 1.8 cm/anno, 24 (Bologna - Facoltà di Ingegneria) con 0.6 cm/anno, 30 (Toscanella) con 0.4 cm/anno, 31 (Fiorentina - Medicina) con 0.6 cm/anno e 56 (Castelmaggiore) che, ancora una volta, detiene il primato in quanto località a più alto tasso di subsidenza con quasi 4 cm/anno. Si ricorda³ che in tale località si è registrato un abbassamento nel periodo 1943-99 di circa 3 m.

Un aumento consistente dell'abbassamento, pari ad un ordine di grandezza, si osserva invece sul punto 26 Idice (S. Lazzaro di Savena) con 1.8 cm/anno. Appaiono in decremento gli abbassamenti sul punto 19 (Anzola dell'Emilia) con 0.6 cm/anno (anziché 2 cm/anno) e sul punto 27 (S. Pietro in Casale) con movimento nullo (precedente pari a 0.6 cm/anno).

Provincia di Ferrara

In continuità con i trend precedenti appaiono i seguenti punti: 29 (Francolino - argine F. Po) con alcuni mm/anno, 21 (Pilastrello - Cento), 32 (Traghetto - Argenta) e 39 (La Fiorana - Argenta) con circa 0.5 cm/anno. I punti 40 (Migliarino) e 45 (Portogaribaldi) con circa 0.7 cm/anno. Il punto 44 (Argine Agosta) con 1 cm/anno.

Un aumento dell'abbassamento si registra sui punti 22 (Stellata - argine F. Po) con 1 cm/anno, 47 (Gorino Ferrarese - faro) con 1.5 cm/anno e 33 (Guarda Ferrarese - argine F. Po) con 1.8 cm/anno. Quest'ultimo abbassamento sembra dovuto, molto probabilmente, ad un movimento anomalo particolare del caposaldo a pilastro posto in sommità arginale, come testimonierebbero anche i residui piuttosto elevati - dell'ordine di alcuni centimetri - registrati sulle componenti planimetriche (cfr. tab. 1).

Una diminuzione dell'abbassamento si evidenzia sui punti 28 (Fossanova - Ferrara) ove il precedente trend di 0.5 cm/anno viene annullato e 46 (Mesola) ove il precedente trend di oltre 1 cm/anno si riduce a qualche millimetro.

³ Ibid., pag.45

Province di Ravenna e Forlì-Cesena

In continuità con i trend precedenti appaiono i seguenti punti: 49 (Coccolia) con 0.5 cm/anno, 50 (Punta Marina) con 0.7 cm/anno e 38 (S. Patrizio - Conselice) con circa 1 cm/anno.

Un aumento dell'abbassamento si registra sui punti 48 (Forlimpopoli) con 0.6 cm/anno, 53 (Savio - Cervia) con 1.4 cm/anno, 37 (S. Giorgio - Faenza) con 1.7 cm/anno (trend precedente di pochi millimetri), 58 (Lido Adriano) con 1.6 cm/anno (trend precedente di 1 cm/anno), 52 (S. Giovanni in Compito - Savignano sul Rubicone) con oltre 1 cm/anno (trend precedente di pochi millimetri). In particolare per il punto 48 di Forlimpopoli è doveroso segnalare, così come si è fatto per il punto 33 (Guarda Ferrarese), anche un movimento anomalo di alcuni centimetri sulla posizione planimetrica.

Una diminuzione dell'abbassamento si evidenzia sui punti 51 (Casalborsetti) con 0.5 cm/anno (abbattimento del 50%), 42 (Cotignola) ove il precedente trend di oltre 2 cm/anno si riduce a circa 1 cm/anno e 43 (Mezzano) con abbassamento precedente di circa 1 cm/anno ora annullato.

3. CONCLUSIONI

La prima ripetizione del rilievo della rete GPS si è svolta nei mesi di giugno e luglio del 2002 ad esattamente tre anni di distanza dalla prima campagna. In fase di sopralluoghi preliminari è stata rilevata la scomparsa di due punti e la sopravvenuta non misurabilità di altri due, si è quindi proceduto alla loro sostituzione. Le misure sono state realizzate utilizzando la strumentazione più aggiornata e metodiche in grado di assicurare la maggiore precisione attualmente possibile. Il calcolo e la compensazione sono stati eseguiti, per un maggior controllo, utilizzando due software diversi. Successivamente sono stati riprocessati anche i dati della precedente campagna 1999 usando gli stessi software. Il confronto fra le due campagne ha confermato l'alta qualità delle misure.

Il confronto tra i movimenti nel periodo 1999-2002 e il trend relativo al periodo precedente ha evidenziato una tendenza all'abbassamento del suolo che interessa gran parte del territorio di pianura della Regione. Si tratta di movimenti che, per molti punti,

rientrano nei limiti di errore delle misure, tuttavia, il segno negativo che li accompagna è comunque significativo di tale tendenza.

Per altri punti, invece, il movimento è decisamente più consistente. A seconda dei casi, si può notare o una continuità rispetto al passato o un peggioramento.

In sostanziale continuità con i trend precedenti si collocano S. Prospero nel Parmense (0.8 cm/anno); Cadelbosco di Sopra e Guastalla (circa 1 cm/anno) nel Reggiano; Crevalcore (1.8 cm/anno) e Castelmaggiore (3.8 cm/anno) nel Bolognese; Argine Agosta (circa 1 cm/anno), Migliarino e Portogaribaldi (0.7 cm/anno) nel Ferrarese; Punta Marina (0.7 cm/anno) nel Ravennate.

Un aumento dell'abbassamento viene evidenziato a Ronco Campo (circa 1 cm/anno) nel Parmense; Canolo (1.7 cm/anno) nel Reggiano; Stellata (1 cm/anno) e Gorino (1.5 cm/anno) nel Ferrarese; Idice (1.8 cm/anno) nel Bolognese; Savio di Cervia (1.4 cm/anno), S. Giorgio (1.7 cm/anno) e Lido Adriano (1.6 cm/anno) nel Ravennate; S. Giovanni in Compito (1.2 cm/anno) nel Cesenate.

Per taluni punti si può evidenziare anche una netta diminuzione dell'abbassamento come, ad esempio in tutti i punti del Piacentino (alcuni mm/anno); a Fidenza (abbassamento nullo); in tutti i punti del Modenese (alcuni mm/anno fino ad un massimo di 5 mm/anno a Cittanova); a Cotignola (circa 1 cm/anno) e a Casalborgorsetti (0.5 cm/anno) nel Ravennate.

La seconda campagna di misure GPS è risultata, inoltre, un utile banco di prova per verificare la reale rispondenza del metodo satellitare alle esigenze di monitoraggio della subsidenza. Come si evince dai dati e dalle considerazioni esposte, risulta evidente che le potenzialità di tale metodo, pur essendo elevate, possono essere utilmente applicate solo per il rilievo di movimenti di una certa entità, mentre possono dare indicazioni non esaustive per movimenti più contenuti.

Dall'esperienza di questa campagna di rilievi si possono trarre anche indicazioni per il prossimo futuro: si potrebbe ipotizzare, ad esempio, un cambiamento delle strategie di misura. Infatti, il numero crescente delle stazioni permanenti, sia all'interno che all'esterno della rete, e la loro maggiore affidabilità inducono a pensare ad un uso di esse molto più sostanziale. Si potrebbe quindi passare dall'attuale schema a rete ad un collegamento diretto e prolungato dei punti della rete stessa ad un maggior numero di stazioni permanenti, riducendo così la propagazione degli errori, soprattutto in

altimetria, con l'uso di un numero minimo di baseline. Vista, inoltre, l'altissima qualità raggiunta nel posizionamento planimetrico dei punti - per i quali esiste anche la quota sul livello del medio mare misurata con la campagna di livellazione del 1999 - si potrebbe pensare ad una valorizzazione della rete GPS regionale attraverso il suo inserimento nella rete nazionale IGM95. Ciò comporterebbe la necessità di effettuare collegamenti ad un numero sufficiente di vertici IGM95 al contorno ed all'interno della rete regionale stessa.

Come considerazione finale, contrariamente a quanto attualmente si sta delineando nel campo del controllo tramite tecniche satellitari, si ritiene che la livellazione geometrica di altissima precisione resti comunque il metodo principe per il rilievo di piccoli movimenti verticali del suolo e, in ogni caso, sia indispensabile per la verifica, ad intervalli abbastanza ampi, dei risultati ottenuti con le tecniche spaziali stesse (GPS e SAR).