

## Il GPS nella gestione del territorio e dei bacini idrici

*Esperienza operativa sul più grande bacino idraulico italiano, il fiume Po*

- Il GPS è uno strumento di rilievo geodetico e topografico entrato a far parte ormai dell'esperienza quotidiana dei professionisti in Italia così come nel resto del mondo. Il suo impiego consente di effettuare rilievi di alta precisione con livelli di produttività altrettanto elevati.
- Nella presente esperienza vengono presentati i risultati di un rilievo basato quasi completamente su metodi GPS. Il lavoro, svolto per conto del Magistrato del Po e finalizzato all'aggiornamento delle sezioni trasversali del fiume, del profilo degli argini maestri e di tutti i manufatti rilevanti e sensibili al deflusso delle acque, mostra ulteriormente, se ve ne fosse ancora bisogno, la maturità della tecnologia GPS nel rilievo territoriale e topografico, soprattutto quando è necessario coniugare precisione e produttività e quando nell'uso di tale tecnologia si tiene conto di infrastrutture fondamentali quali la rete IGM-95 e la disponibilità di dati e informazioni avanzate quali il geoide nazionale.

### Premessa

Il Magistrato per il Po, quale Ufficio Speciale del Genio Civile all'interno del Ministero dei Lavori Pubblici, effettua con regolarità rilievi sul maggiore fiume italiano al fine di controllare l'evoluzione morfologica dell'alveo, della golena e degli argini maestri.

Tali rilievi rappresentano lo strumento primario e fondamentale, indispensabile per gli studi e le progettazioni degli interventi di riassetto idraulico, di riordino ambientale ed, in generale, per tutte le ricerche di ordine tecnico-scientifico che vengono effettuate sul fiume e relativo ambito fluviale. In tempi recenti un appalto per l'effettuazione di nuove misure è stato assegnato a seguito di una gara in ambito europeo.

I rilievi riguardavano le circa 90 sezioni storiche, già rilevate più volte nel passato e note come sezioni Brioschi, l'isti-

tuzione e il rilievo di ulteriori 239 sezioni lungo l'intero fiume, dei manufatti rilevanti per il deflusso delle acque e del profilo degli argini maestri.

Il lavoro quindi si caratterizza come il più completo, ampio e preciso rilievo mai eseguito sul fiume Po, e quindi il più esteso nel suo genere mai eseguito in Italia. Un'idea delle dimensioni del lavoro è rappresentata d'altronde dai dati che seguono:

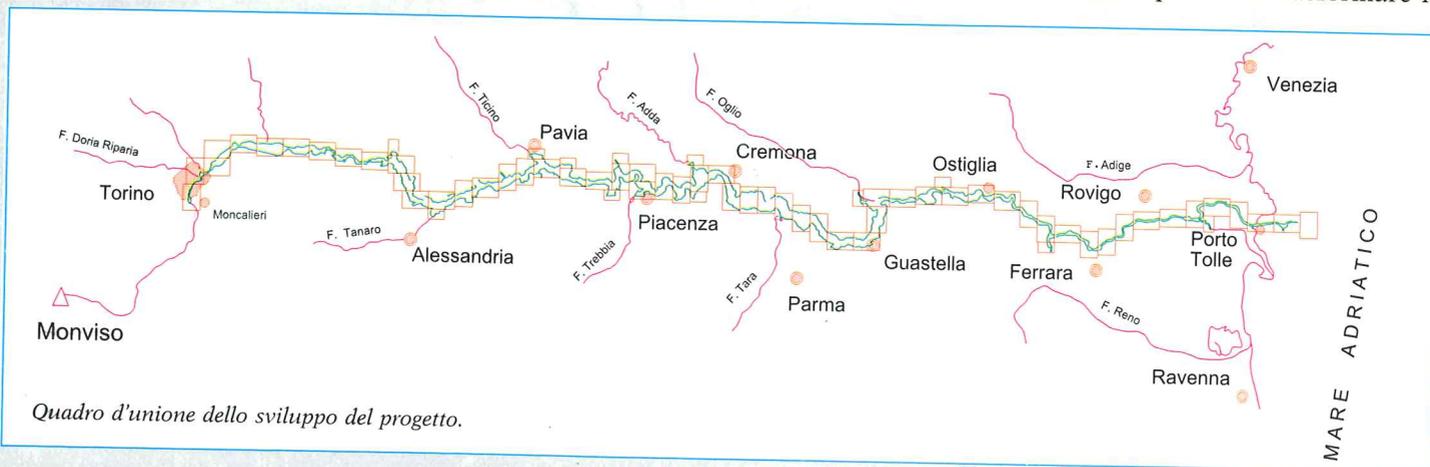
- asta di fiume interessata dal rilievo: km 550;
- sezioni: n° 337;
- lunghezza complessiva delle sezioni rilevate: m. 630.000;
- lunghezza complessiva delle sezioni in golena: m. 514.000;
- lunghezza complessiva delle sezioni in alveo: m. 116.000;
- lunghezza massima di sezione: m. 6.200;

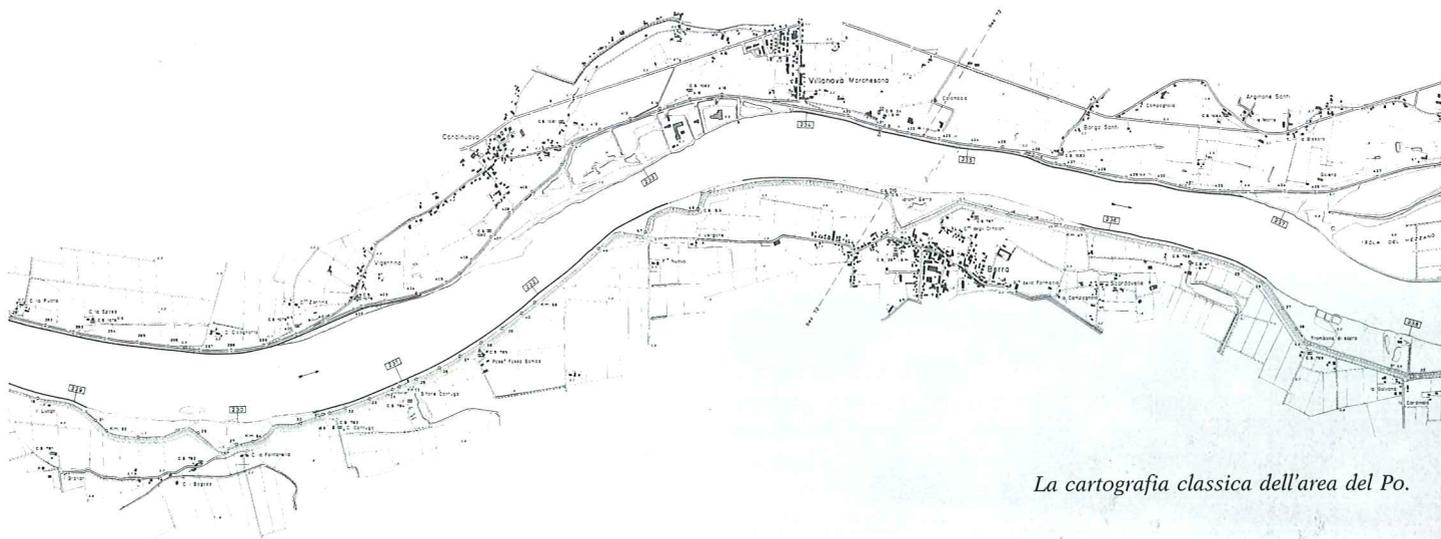
- interesse massimo dei punti da battere in golena: m. 25;
- interesse massimo dei punti da battere in alveo: m. 2;
- lunghezza complessiva del profilo degli argini maestri: km 1.400;
- interesse massimo dei punti da battere sul profilo arginale: m. 300;
- ponti rilevati : n° 53;
- precisione richiesta nelle tre coordinate:  $\pm 5$  cm;
- tempo massimo consentito per l'esecuzione del lavoro: 365 giorni.

Una attività di questa importanza e nei tempi imposti per l'esecuzione, richiedeva l'utilizzo di metodologie e strumenti d'avanguardia, individuando metodi e soluzioni efficienti e rapide sia nelle fasi del rilievo che in quelle del calcolo, con la garanzia al contempo di ottenere la massima qualità dei risultati e un abbattimento dei tempi operativi.

Le chiavi del successo nella esecuzione di operazioni così complesse sono state individuate in alcune scelte operative come segue:

- impiego del GPS in tutte le fasi di rilievo, impiegando il più possibile tecniche di rilievo altamente produttive quali rilievi cinematici RTK, rilievi STOP & GO, con tempi ridotti di stazionamento ed elevate precisioni nella stima delle coordinate. Con tali metodi è stato possibile rilevare le coordinate di decine di migliaia di punti;
- impiego della rete IGM-95 come rete di inquadramento fondamentale e che ha consentito di inquadrare l'intero rilievo, da Torino al mare, in un unico sistema spazialmente rigido e coerente. Inoltre, impiegando i parametri di trasformazione locale forniti dalle monografie della rete di riferimento IGM-95, è stato possibile trasformare le





La cartografia classica dell'area del Po.

coordinate dei punti dal riferimento GPS (WGS-84) a quello cartografico standard Gauss Boaga in maniera semplice ed immediata, senza dover procedere a complesse determinazioni delle trasformazioni da applicare;

- impiego del Geoide per derivare le quote ortometriche da quelle ellissoidiche. Grazie al lavoro di studio e approfondimento del Politecnico di Milano, infatti, è disponibile un geoido nazionale di precisione decimetrica, e precisioni anche migliori là dove la topografia è meno accidentata.

L'utilizzo di queste tre chiavi ha consentito di realizzare il lavoro con successo, così come si è dimostrato alla fine dei collaudi effettuati mediante comparazioni con rilievi indipendenti.

## Il rilievo

L'inquadramento del rilievo delle sezioni è stato realizzato utilizzando un sottoinsieme di punti appartenenti alla rete IGM-95. A tali punti sono stati agganciati, mediante rilievo GPS statico i caposaldi di sezione, uno in riva destra e uno in riva sinistra, posizionati sugli argini maestri e materializzati mediante cippi in feno-polyroc.

I caposaldi così rilevati hanno costituito la rete di raffittimento successivamente utilizzata sia per il rilievo delle sezioni che per il rilievo dei profili degli argini maestri. In quest'ultimo caso il rilievo è stato condotto mediante GPS in modalità RTK (Real Time Cinematico) o Stop & Go. In alcuni casi in cui nessuna delle due tecniche sopra citate era applicabile i punti sono stati rilevati median-

te tecnica di rilievo statico rapido.

Per realizzare il rilievo dei cippi arginali si è proceduto con la determinazione di 22 poligonali omologhe a destra e a sinistra dell'asta fluviale, con apertura e chiusura su un punto IGM95. I punti intermedi tra gli estremi delle poligonali erano ubicati in corrispondenza dei caposaldi di sezione.

Il rilievo delle poligonali è stato condotto mediante GPS in modalità statica con tempi di occupazione minimi di 30 minuti per i vertici intermedi (cippi arginali) e di 60 minuti per i vertici di chiusura ed apertura coincidenti con gli IGM-95. La coincidenza tra i punti estremi di poligonale sia in riva destra che in riva sinistra, ha consentito l'aggancio tra loro dei rilievi condotti in modo indipendente sulle due rive.

La determinazione dei rilievi ha visto l'impiego di due squadre operative, una per ciascuna riva, composte ognuna da 4 operatori, dotati di 6 ricevitori Trimble 4700, tre per squadra. Il completamento della materializzazione e del rilievo della rete di raffittimento ha richiesto poco più di un mese ed è stato completato agli inizi di febbraio '99.

I rilievi delle sezioni in gola, in alveo e dei profili degli argini principali sono stati effettuati con la tecnica del GPS in tempo reale (RTK) e riferiti ai vertici della rete dei cippi arginali ma-

terializzati sugli argini maestri. Su di essi, infatti, veniva posizionata la stazione di riferimento in grado di determinare e distribuire le correzioni differenziali impiegate dai ricevitori adottati nel rilievo della sezione. Qualora, come a volte è avvenuto, non sia stato possibile applicare la tecnica RTK il rilievo è stato condotto in modalità Stop & GO oppure statico rapido.

Nel rilievo dell'alveo, onde limitare l'effetto dello scarroccio della barca a seguito della corrente, il lavoro, su ogni sezione, è stato effettuato due volte, la prima volta da sinistra a destra e la seconda in senso inverso. Le due linee batimetriche venivano poi mediate in fase di elaborazione.

La determinazione delle linee batimetriche è stata ottenuta mediante l'impiego di un eco-scandaglio per la determinazione della profondità del fondo, i cui dati erano georeferenziati in tempo reale attraverso un sistema GPS installato a bordo del natante. Il cippo arginale in gola corrispondente alla sezione rilevata veniva utilizzato infine, come riferi-





mento per la determinazione del livello del pelo dell'acqua così da consentire il riattacco tra lo spezzone di sezione rilevato in golena e quello rilevato in alveo mediante batimetria.

### Il Calcolo Geodetico

La complessità del lavoro, così come delle procedure adottate, ha richiesto lo studio di una precisa metodologia di approccio al problema. Una volta individuate le giuste procedure si è proceduto sia all'esecuzione del lavoro che alle fasi di analisi, impiegando in modo indipendente SW e procedure di calcolo dedicate per le tre fasi di elaborazione definite, ovvero:

- la determinazione delle coordinate nel riferimento WGS-84 (GPS);
- la determinazione delle coordinate Gauss-Boaga derivate dalle WGS-84;
- la determinazione delle quote ortometriche da quelle ellissoidiche, impiegando il modello di correzione del geode ITALGEO95.

### Determinazione delle coordinate WGS-84

La determinazione delle coordinate è stata condotta impiegando il SW GPSur-

	Componente NORD		Componente EST	
	MEDIA (m)	SQM (m)	MEDIA (m)	SQM (m)
TEST (a)	-0,01	0,08	-0,01	0,06
TEST (b)	-0,03	0,10	0,01	0,07
TEST (c)	-0,04	0,13	0,01	0,09

**Tabella 2:** controllo sulla qualità delle Trasformazioni Gauss-Boaga

vey di TRIMBLE fornito insieme ai ricevitori. Le attività di calcolo più impegnative hanno riguardato la stima delle coordinate dei cippi arginali (la rete di raffittimento), i cui vincoli di precisione erano stringenti. I circa 700 punti della rete sono stati stimati mediante post-processamento dei dati GPS rilevati

in modalità statica. Le coordinate dei punti di sezione e dei profili degli argini, sono stati invece, nella quasi totalità, determinati mediante rilievo RTK; in questo caso le attività di analisi, anche se hanno assorbito molto tempo date le dimensioni del rilievo, sono state ricondotte principalmente al controllo dei risultati ottenuti direttamente sul campo.

La rete definita dai cippi arginali per la strategia di analisi e calcolo seguita ha costituito lo strumento per validare l'intera metodologia seguita attraverso le seguenti fasi:

- a partire dai punti IGM-95 di apertura della poligonale sono state determinate le coordinate del cippo arginale più vicino, impiegato poi come riferimento per la determinazione del cippo successivo e così via fino all'ultimo cippo arginale della poligonale impiegato quale riferimento nella determinazione delle del punto di chiusura di poligonale coincidente con un IGM-95;
- il confronto tra le coordinate dell'IGM-95 di chiusura stimate nel rilievo corrente con quelle pubblicate sulla monografia consentiva una verifica diretta della qualità della soluzione sull'intera poligonale. È evidente che ciascun errore commesso nel rilievo o nella riduzione dei dati, sarebbe risultato subito evidente da tale confronto;
- come ulteriore confronto, infine, l'a-

nalisi indipendente delle due poligonali definite in riva destra e sinistra garantiva una ulteriore ridondanza e verifica di qualità utilizzando il punto IGM-95 di chiusura (comune ad entrambe le poligonali) quale punto di controllo.

I risultati ottenuti sono sintetizzati nella successiva Tabella 1, dove per le tre coordinate è riportato rispettivamente il valore medio e lo scarto quadratico medio del confronto tra le coordinate stimate e quelle definite nella monografia dei 22 punti IGM-95 impiegati quali punti di chiusura delle diverse poligonali.

	RILPO-IGM-95 (cm)	
	Media	SQM
Latitudine	0.36	3.11
Longitudine	3.00	2.69
Quota	-0.07	3.02

**Tabella 1:** statistica delle discrepanze osservate tra il presente rilievo e IGM-95

I risultati ottenuti sintetizzati in Tabella sono soddisfacenti e compatibili con i requisiti di capitolato.

### Determinazione delle coordinate Gauss-Boaga

I rilievi GPS vengono condotti nel riferimento proprio GPS, il sistema WGS84, che è un sistema geocentrico (con origine, cioè, nel centro della Terra) con propri parametri. Le coordinate cartografiche normalmente impiegate sono invece riferite al sistema nazionale chiamato Gauss-Boaga (GB).

Per la determinazione delle coordinate Gauss-Boaga si è quindi utilizzato la peculiarità specifica dei punti IGM-95 che hanno la caratteristica di essere punti doppi, cioè punti appartenenti alla rete di vertici trigonometrici e/o alle linee di livellazione IGM, che sono stati stazionati mediante GPS, durante la campagna di rilievo IGM-95. Partendo dalla conoscenza dei due set di coordinate, dopo complessi calcoli, l'IGM ha determinato per ogni vertice della rete i parametri di trasformazione utilizzabili per passare dalle coordinate WGS-84 a quelle Gauss Boaga.

Normalmente tali parametri sono validi in un certo intorno ( $\approx 10$  km) al loro punto di applicazione (punti IGM95). Essendo tali parametri parte integrante delle monografie, ed essendo gli stessi quel-

li canonicamente impiegati a livello nazionale, si è deciso di utilizzare le stesse procedure SW fornite dall'IGM allo scopo.

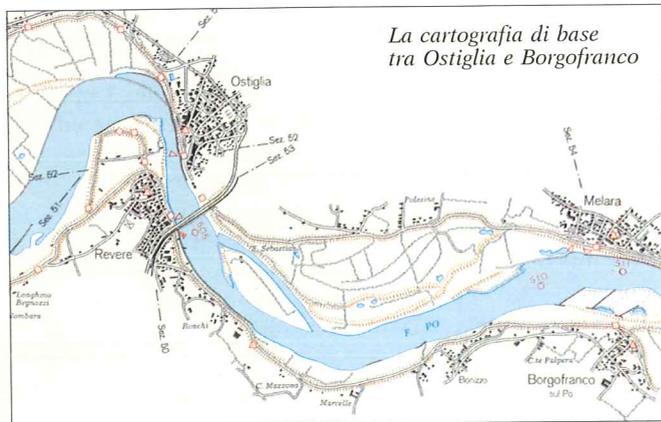
Mediante tali procedure ed avendo cura di scegliere i punti IGM-95 più prossimi ai punti di cui si volevano conoscere le coordinate GB si è proceduto ad effettuare le conseguenti trasformazioni, mentre ai fini della verifica della bontà dei risultati sono stati effettuati alcuni test i cui risultati vengono riportati nella Tabella 2.

I test realizzati sono così definiti:

**Test (a)** - i parametri di trasformazione relativi ad un punto venivano applicati alle coordinate WGS-84 delle monografie del punto stesso;

**Test (b)** - i parametri di trasformazione relativi ad un punto venivano applicati alle coordinate WGS-84 ottenute nel rilievo di attuale;

**Test (c)** - per verificare il deterioramento della qualità delle trasformazioni con il crescere della distanza rispetto al punto di emanazione, i parametri di trasformazione relativi ad un punto IGM-95 venivano applicati al punto IGM-95 più prossimo lungo la poligonale.



I risultati del confronto delle coordinate GB ottenute applicando le trasformazioni e le coordinate delle monografie è riportato in Tabella 2. Da tale confronto si evince che lo scarto quadratico medio dei punti trasformati è minore di 10 cm per la componente Nord e ancor minore nella componente Est. Tali risultati sono consistenti con la precisione che caratterizza le reti di vertici trigonometrici IGM. Risulta confermato inoltre un deterioramento della precisione a distanze dal punto IGM-95 superiori a 15 km.

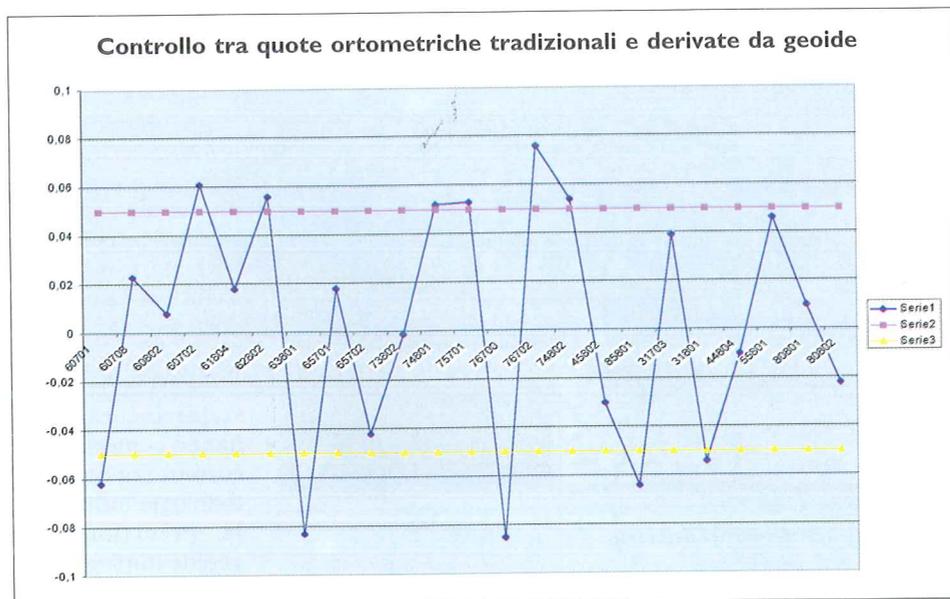


Figura 1: Risultati di un confronto nell'area della pianura Padana tra livellazione GPS e livellazione geometrica di alta precisione. Valor medio delle differenze=0,003 (m); SQM =0,05 (m)

## Determinazione delle quote ortometriche

Il GPS come è noto consente di determinare la quota ellissoidica nel sistema di riferimento proprio del GPS (WGS84), mentre la quota utile ai fini cartografici è quella ortometrica (quota rispetto al geoidi); le stesse sono legate da una semplice relazione che tiene conto dello scostamento locale del geoidi rispetto all'ellissoide.

Qualora tale scostamento fosse noto nel punto GPS rilevato, la determinazione della quota ortometrica sarebbe generata da una semplice somma algebrica. Infatti la relazione che lega la quota ortometrica, quella ellissoidica e lo scostamento del geoidi è esemplificata nella espressione (1):

$$H = h - N, \text{ dove } H = \text{quota ortometrica,} \\ h = \text{quota ellissoidica, e} \\ N = \text{scostamento del geoidi (1)}$$

In Italia il D.I.I.A.R. del Politecnico di Milano è da lungo tempo impegnato nel calcolo di un geoidi valido su scala nazionale, e ai tempi del rilievo sul Po era disponibile una sua versione denominata ITALGEO 95. Esso è stato determinato

da misure dirette di gravità effettuate su scala nazionale. Le misure sono disponibili su una griglia di punti 3'x3' (circa 2 km x 2 km) e, mediante opportune tecniche di interpolazione, è possibile determinare i valori dello scostamento del geoidi in qualsiasi punto all'interno della griglia.

Grazie a questo approccio è stato possibile determinare lo scostamento locale del geoidi in corrispondenza di ciascun punto rilevato mediante GPS di cui era nota, quindi, la quota ellissoidica e applicando la relazione (1) è stato possibile determinare le quote ortometriche relative a ciascun punto.

Le precisioni ottenute nell'area oggetto sono esemplificate dai risultati del grafico in figura 1, in cui sono riportate le differenze tra le quote ottenute applicando la (1) e quelle ottenute dalla livellazione di alta precisione dell'IGM. I punti su cui il confronto è stato determinato sono punti IGM-95 coincidenti con caposaldi di livellazioni scelti in una regione contenente l'area di esecuzione del rilievo.

## Conclusioni

In questa nota si sono presentati i principali risultati di un rilievo condotto sul Po da Moncalieri (Torino) fino alla foce del fiume. Tale rilievo ha riguardato 337 sezioni, di cui 239 di nuova istituzione, e i profili degli argini maestri per uno sviluppo di 1400 km. Esso si presenta come il più completo e ampio rilievo mai ese-

Ministero dei Lavori Pubblici <b>Magistrato per il Po - Parma</b>		<b>CO.RIP. S.r.l.</b> SERVIZIO GEODETICO REGIONALE Via Lazzarini, 101 - 40142 - Parma		Regione: Piemonte Comune: Isola S. Antonio Provincia: Alessandria Nazione: Italia	Punto: <b>S00CDX</b> Data: 19/01/99 Operatore: DE MARCO
<b>RILIEVO DEI CIPPI ARGINALI PER L'AGGIORNAMENTO DELLE SEZIONI E DEI PROFILI DEL Fiume PO E DELLE SUE ARGINATURE</b>					
Marcatizzazione: CIPPO FERRO POLIURCO	<b>Geografica (Roma '60)</b> $\varphi$ : 45°02'17,16" E $\lambda$ : -07°35'50,00" W Quota (m): 79,01	<b>Piano (Gauss-Boaga)</b> Ut E Ut N Ut S Ut W X: 1.499.507,43 Y: 4.997.265,81	<b>Geografica (WGS 84)</b> $\varphi$ : 45°02'18,577432" E $\lambda$ : -07°35'51,126074" W Q: 79,01 Q: 119,83	<b>Piano (UTM-WGS 84)</b> Ut E Ut N Ut S Ut W	
<b>Parametri di trasformazione:</b> N.B. I parametri indicati non sono propri del punto monografato, ma appartengono al Trigonometrico IGM 95 di emanazione <b>05900 CERESINA (BOV)</b>					
Accessori: Tx: 109,6      Ec: 0,297 Ty: 35,92      Ey: -2,055 H: 50,39      Ez: -1,005 K: 5,26					
Informazioni ausiliarie: Vertici collegati:		Schizzo planimetrico 		Fotografia 	

Una monografia dei vertici della rete.

guito su questo fiume, e, quindi, il più esteso nel suo genere mai eseguito in Italia.

Il rilievo in tutte le sue fasi è stato effettuato mediante GPS. Ciò ha permesso di stabilire una rete di raffittimento di quasi 700 punti, che è stata fatta coincidere con i punti di intersezione tra le sezioni e gli argini principali. Tale rete ha costituito un riferimento univoco, lungo tutta l'asta del fiume, ed è risultata inquadrata rispetto alla rete IGM-95 con una precisione dell'ordine di 3 cm.

La rete IGM-95 si è confermata una rete di alta precisione che in più ha la peculiarità di consentire di agganciare i rilievi effettuati mediante GPS alle reti tradizionali di vertici trigonometrici. Tramite questa peculiarità sono state ottenute le coordinate Gauss-Boaga di tutti i punti rilevati con un errore dell'ordine di 8-10 cm nella componente Nord e di 6-7 cm nella componente Est. Tale errore è consistente con l'errore di misura associato alle stime delle coordinate delle reti tradizionali di vertici trigonometrici.

Per ottenere le quote ortometriche da associare ai punti rilevati mediante GPS, si è fatto uso di ITALGEO95, che al tempo del rilievo era la stima più aggiornata del geode nazionale effettuata al Politecnico di Milano.

Il confronto effettuato su 23 caposaldi di livellazione IGM coincidenti con la rete IGM-95, distribuiti su un'area contenente al suo interno l'area del rilievo, ha confermato la precisione centimetrica di ITALGEO95 che in particolare su tali punti ha mostrato uno sqm di 5 cm.

Il rilievo del 1999 è l'ultimo di una serie di rilievi che il Magistrato del Po ha eseguito a partire dal dopoguerra ad oggi. Nei precedenti rilievi erano state istituite e rilevate 90 sezioni note come se-

zioni Brioschi. Lo stato di manutenzione di tale rete è deteriorato negli anni, molti dei caposaldi originali non sono più rintracciabili sul territorio. Il confronto è stato possibile solo su circa un terzo delle sezioni rilevate nei precedenti rilievi con risultati molto soddisfacenti che hanno confermato la correttezza delle metodologie utilizzate e la precisione del geode impiegato.

Il rilievo effettuato si caratterizza come il più completo, ampio e preciso mai effettuato in Italia; nel complesso delle attività, infatti, si sono stazionati e sono state determinate le coordinate di:

- oltre 30 punti coincidenti con vertici della rete IGM-95 distribuiti uniformemente lungo il corso del Po, che hanno costituito la rete di inquadramento;
- quasi 700 punti di intersezione tra le sezioni e gli argini principali, che hanno costituito la rete di raffittimento;
- circa 36000 punti di sezioni in golena e sugli argini principali;
- più di 90000 punti di sezioni in alveo.

Complessivamente i dati GPS acquisiti hanno comportato la gestione di un archivio costituito da:

- oltre 1500 Mega-byte di osservazioni GPS grezze;
- circa 700 Mega-byte di output delle elaborazioni GPS;
- oltre 200 Mega-byte di file CAD con le elaborazioni grafiche delle sezioni e dei profili;
- oltre 650 Mega-byte contenenti le monografie dei vertici della rete di raffittimento.

A conclusione di questa lunga nota si vogliono sottolineare gli aspetti di particolare importanza che hanno caratterizzato questo lavoro:

- l'impiego del GPS ha consentito di completare il rilievo nel periodo di tempo previsto in capitolato (365 giorni solari);
- i rilievi effettuati risultano inquadrati in un unico sistema di riferimento rappresentato dalla rete IGM-95 e realiz-

zato da una rete di raffittimento costituita da quasi 700 vertici;

- la rete IGM-95 costituisce una rete di alta precisione che consente di agganciare i rilievi GPS alle reti tradizionali di vertici trigonometrici con precisioni migliori dei 10 cm su aree anche molto vaste;
- la disponibilità di geoidi di alta precisione consente di agganciare il rilievo GPS alla rete di caposaldi di livellazione dell'IGM con precisioni decimetriche su scala nazionale. Nell'area interessata dal rilievo tale precisione è risultata dell'ordine di 5 cm.

La tecnica GPS, quindi, dimostra ancora una volta, grazie anche a infrastrutture fondamentali, quali la rete IGM-95 e la disponibilità di un geode nazionale di alta precisione, di essere una tecnologia ormai completamente matura nelle applicazioni topografiche.

ING. FABIO COLLETTI  
 Direttore tecnico ingegneria  
 CORIP S.r.l.

## Riferimenti

Il lavoro è stato realizzato da Corip S.r.l. nel periodo dicembre '98-'99, impiegando 4 squadre topografiche composte da 3 operatori, mentre la restituzione ed elaborazione dei dati ha richiesto oltre 500 giorni/uomo. La progettazione della rete, il coordinamento dei rilievi e le analisi dei dati sono state realizzate con la collaborazione del Dott. Marco Fermi.

## Strumentazione impiegata

Le strumentazioni impiegate riguardano oltre alle attrezzature standard per i rilievi, 8 ricevitori GPS Trimble 4700 L1/L2 con RTK, e 2 total station Leica 703 impiegate nel rilievo dei manufatti. L'elaborazione dei dati è stata realizzata oltre che con il software in dotazione ai GPS, anche con procedure proprietarie per l'integrazione dei dati e la stesura degli elaborati finali.