

# DERIVAZIONE IDROELETTRICA SUL FIUME ADDA a valle del nuovo ponte sulla SS591

"Piccola derivazione" ai sensi dell'art. 6 del R.D. 1775/1933

Valutazione di impatto ambientale artt. 23-24-25-26 D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii

## CONTRODEDUZIONI

### Relazione archeologica Indagini geofisiche per la verifica di resti archeologici

DATA PROGETTO	CONTRODEDUZIONI	SCALA	ELABORATO
Dicembre 2012	Giugno 2014		04.2

#### GRUPPO DI PROGETTAZIONE

#### PROPONENTE

**Capellino**  
Studio di Ingegneria

**STUDIO DI INGEGNERIA**  
Dott. Ing. ANTONIO CAPELLINO

Via Rosa Bianca, 18  
12084 Mondovì - (CN)  
☎ 0174/551247  
335/6560172

✉ studiocapellino@alice.it



ORDINE DEGLI INGEGNERI  
DELLA PROVINCIA DI CUNEO

A647 Dott. Ing. Antonio Capellino

**Dott. Arch. DANIELE BORGNA**

Via G. Pascoli, 39/6 - 12084 Mondovì (CN)

☎ 339-3131477

✉ arch.borgna@virgilio.it

**Geom. ALBERTO BALSAMO**

S.S. 28 Nord, 6 - 12084 Mondovì (CN)

☎ 347-4097196

✉ alberto.balsamo@geopec.it

**Dott. Ing. ALBERTO BONELLO**

Strada di Pascomonti - 12084 Mondovì (CN)

☎ 328-4541205

✉ alberto.bonello@ingpec.eu



Sis.Co. In.

Dott. Ing. BARTOLOMEO DOMINICI

Via Bucci, 2  
10022 CARMAGNOLA - (TO)

☎ 011/9711820

337-221887

✉ ing.dominici@virgilio.it



**Studio Sintesi**  
Ingegneria e Paesaggio

Dott. Agr. STEFANO ASSONE

Via Mongrando, 41/a - 10153 Torino

☎ 011/6598961

✉ stefano.assone@studio-sintesi.com

**Dott. Geol. LUCA ARIONE**

Via Principe Tommaso, 99 - 10125 Torino

☎ 011/6599131

✉ luca.arione@geopec.it



EDISON

**EDISON S.p.a.**

Sede Legale:

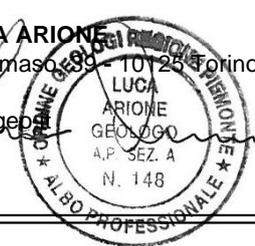
Foro Buonaparte, 31 - 20121 Milano  
Partita IVA 12921540154

☎ 02/6222.7534

02/6222.8480

www.edison.it

✉ PEC: asee@pec.edison.it



## Realizzazione di Impianto idroelettrico sul Fiume Adda

### Bertonico (LO)



### Indagini geofisiche per la verifica di resti archeologici

#### Relazione tecnica

Relazione n.: 2752/14  
Redatto da: Dott. Ing. Fabrizio Fantini  
Controllato da: Dott. Geol. Mario Naldi  
Data: Maggio 2014  
Revisione: 0

## SOMMARIO

1.	INTRODUZIONE.....	1
2.	INDAGINE ELETTROMAGNETICA.....	2
2.1.	Acquisizione dati.....	2
2.2.	Risultati dell'indagine elettromagnetica.....	2
3.	INDAGINE GEOELETRICA.....	4
3.1.	Modalità di acquisizione.....	4
3.2.	Risultati dell'indagine geoelettrica.....	4
4.	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	5

## In allegato al testo

Appendice A	Cenni teorici sulla metodologia elettromagnetica
Appendice B	Cenni teorici sulla metodologia geoelettrica
Appendice C	Specifiche tecniche strumentazione
Figura 1	Ubicazione sito di indagine e schema impianto
Figura 2	Ubicazione delle indagini geofisiche
Figura 3	Risultati indagine elettromagnetica – Mappa della conducibilità elettrica apparente
Figura 4	Risultati indagine geoelettrica – Modello tomografico di resistività elettrica
Figure 5÷6	Documentazione fotografica

---

## 1. INTRODUZIONE

La presente relazione illustra e descrive i risultati delle indagini geofisiche realizzate, nel periodo 22-26 Maggio 2014, presso il comune di Bertonico (LO), in corrispondenza di un'ansa del Fiume Adda oggetto di un intervento di realizzazione di una centrale per la produzione di energia idroelettrica (Figura 1).

L'indagine è stata realizzata con metodologia elettromagnetica integrata da una prospezione geoelettrica, ed ha avuto lo scopo di verificare la presenza di strutture interrato di origine archeologica e/o zone anomale rispetto al fondo naturale in corrispondenza dell'impronta dell'intervento.

A tal fine, è stata eseguita un'indagine areale su tutte le zone agibili secondo una griglia regolare di punti di rilievo elettromagnetico, con elaborazione e restituzione di mappe di conducibilità elettrica apparente. In seguito all'osservazione di una anomalia areale a bassa conducibilità elettrica, si è proceduto alla sua caratterizzazione e valutazione della forma e della profondità mediante realizzazione di una indagine geoelettrica aggiuntiva e tracciata trasversalmente al corpo anomalo.

I risultati delle indagini, illustrati nelle figure in allegato e commentati nelle pagine seguenti, hanno evidenziato quanto segue:

- AREA EMP1 - nell'area a prato sul lato ovest della vecchia strada statale si è rilevata un'anomalia areale piuttosto estesa (con una superficie di circa 500 mq) e caratterizzata da valori di conducibilità elettrica apparente molto bassi. Per caratterizzare forma e approfondimento di tale anomalia, è stata tracciata una sezione geoelettrica multielettrodo che ha consentito di verificare trattarsi di un riempimento di terreni di riporto a elevata resistività elettrica (congruente quindi con i dati di bassa conducibilità elettrica apparente rilevati con metodo EM) costituiti da depositi a scheletro grossolano (ghiaia e ciottoli, ?); tali terreni hanno valori di resistività elettrica nettamente differenti dal terreno naturale (caratterizzato da materiali più fini, sabbioso-limosi). E' verosimile ritenere che tale riempimento (di spessore massimo pari a circa 7-8 m) sia stato realizzato per colmare dei vuoti di cava o delle vecchie darsene dell'Adda (di cui si osserva ancora traccia sul corso fluviale);
- AREA EMP2 – sul tracciato stradale non si osserva nulla di significativo, con una notevole omogeneità dei valori di conducibilità elettrica del sottosuolo compatibile con i valori di fondo del terreno naturale/sottofondo stradale;
- AREA EMP3 – nell'area occupata dall'ex attività di cava (sul lato est della vecchia strada statale) si osservano numerose anomalie localizzate riconducibili, tuttavia, alla presenza di strutture e oggetti di varia natura rilevati in superficie (resti metallici di macchinari, blocchi di cemento, ecc..). Si rileva, inoltre, la presenza di una forte anomalia lineare a elevata conducibilità elettrica, congruente con una possibile tubazione interrata.

## 2. INDAGINE ELETTROMAGNETICA

### 2.1. Acquisizione dati

Il rilievo elettromagnetico, realizzato con strumentazione **Profiler EMP-400** prodotto da GSSI, USA (cenni teorici riportati in Appendice A e scheda tecnica in Appendice C), ha interessato tutte le aree accessibili e non occupate da vegetazione arbustiva. Per questioni logistiche di acquisizione, e per consentire una più immediata interpretazione dei risultati, l'intero rilievo elettromagnetico è stato suddiviso in n.3 sub-aree, la cui ubicazione viene riportata in Figura 2 (computo metrico nella tabella seguente).

	Descrizione	Superficie [m <sup>2</sup> ]
<b>Area EM1</b>	Porzione ovest dell'area di intervento	3189
<b>Area EM2</b>	Strada abbandonata	872
<b>Area EM3</b>	Porzione est dell'area di intervento	4004
<b>TOTALE</b>		<b>8065</b>

### 2.2. Risultati dell'indagine elettromagnetica

Delle 6 frequenze acquisite e comprese tra i 1000 ed i 15000 Hz, si è scelta la più significativa, e cioè la frequenza a 9000 Hz che ha fornito i valori più stabili (in termini di stacking) del valore in quadratura.

I risultati sono stati espressi in termini di andamento della conducibilità elettrica, in quanto si tratta del parametro che maggiormente consente di individuare la presenza di strutture o oggetti interrati estranei al suolo naturale. Il parametro viene definito "apparente" in quanto rappresenta la media dei valori corrispondenti ai primi 5÷6 m di sottosuolo. I valori di conducibilità elettrica non vanno quindi intesi in termini assoluti ma unicamente in senso relativo al fine di individuare aree o oggetti puntuali "anomali" rispetto al valore di fondo del terreno naturale. Ad esempio, un suolo argilloso presenterà valori di conducibilità elettrica superiori rispetto ad uno sabbioso/ghiaioso, mentre un manto di asfalto determinerà una conducibilità minore. Al tempo stesso un oggetto metallico "eccitato" da un campo elettromagnetico (primario), genera a sua volta un campo elettromagnetico (secondario) e, pertanto, determina valori anomali della conducibilità elettrica che posso essere molto elevati (fortemente positivi) o molto bassi (fortemente negativi). Questo fenomeno è dovuto alla tipica forma sinusoidale "a farfalla" che caratterizza un campo elettromagnetico.

I dati della proprietà fisica sono stati opportunamente localizzati ed elaborati con un programma di *contouring* per la definizione di mappe di variazione del parametro geofisico (correlato alle caratteristiche dei materiali presenti nel sottosuolo), riportate nella Figura 3.

### **Area di indagine EMP1**

L'area in questione ha interessato parte del settore sul lato ovest dell'intervento previsto e presenta interamente copertura prativa.

In termini di conducibilità elettrica apparente è possibile individuare 2 macro-zone di riferimento:

- a. Terreno naturale con copertura prativa (tonalità di colore verde - azzurro);
- b. Terreno di riempimento con presenza di materiali caratterizzati da granulometria più grossolana, ciottolosa (tonalità di colore giallo - rosso).

### **Area di indagine EMP2**

L'area in questione è localizzata in corrispondenza di una porzione della strada asfaltata sopraelevata, situata in corrispondenza del tratto centrale dell'intervento. Si sono evidenziate sostanzialmente 2 forti anomalie di conducibilità elettrica (in colore blu - viola), dovute alla presenza dei guard-rail metallici laterali. Il settore centrale della strada non mostra invece anomalie di particolare interesse.

### **Area di indagine EMP3**

L'area EMP3 ha interessato il piazzale situato nel settore est dell'intervento in progetto. L'intera area presenta un manto di terreno compatto caratterizzato da una bassa vegetazione incolta, oltre ad un cumulo di materiale sabbioso e la presenza di numerosi resti di strutture metalliche e blocchi in cemento abbandonati.

Tutte le anomalie puntuali caratterizzate da valori molto bassi di conducibilità elettrica apparente sono determinate dalle strutture o dagli oggetti metallici superficiali rilevati in sito. Si evidenzia unicamente una anomalia di conducibilità elettrica legata verosimilmente alla presenza di una struttura interrata (tubazione) caratterizzata da una forte anomalia di conducibilità elettrica (in colore blu - viola) .

---

### 3. INDAGINE GEOELETRICA

Come detto nel capitolo introduttivo, la sezione geoelettrica è stata realizzata al fine di valutare lo spessore dell'anomalia caratterizzata da bassa conducibilità elettrica apparente, individuata con l'indagine elettromagnetica, in corrispondenza dell'area ovest dell'intervento (area di indagine EMP1). Si è quindi realizzata l'acquisizione di una linea geoelettrica multielettrodo, la cui ubicazione viene riportata in Figura 2.

#### 3.1. Modalità di acquisizione

Al fine di raggiungere una profondità di indagine adeguata e garantire un ottimo grado di dettaglio, la sezione geoelettrica è stata realizzata posizionando 48 elettrodi con interasse 3 m, per una lunghezza totale dello stendimento pari a 141m.

La misura dei valori di resistività elettrica è stata realizzata con un georesistivimetro *Syscal Pro* (Iris Instruments, F) a 72 canali e l'utilizzo di elettrodi in acciaio inox collegati mediante cavi multipolari. Per l'acquisizione dei dati si sono utilizzate due sequenze miste *Wenner-Schlumberger*, predisposte con il software *Electre II* (Iris Instruments, Fr). Entrambe le sezioni hanno previsto la misura dei parametri di resistività elettrica e di polarizzazione indotta.

Per l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati i programmi:

- ⇒ *Prosys II* (Iris Instruments, Fr): consente l'elaborazione preliminare dei dati di resistività elettrica apparente (filtraggio e correzione topografica dei dati);
- ⇒ *Res2DINV* (Geotomo Software, Mal): esegue l'inversione numerica dei dati e la restituzione della sezione tomografica di resistività elettrica reale.

#### 3.2. Risultati dell'indagine geoelettrica

La sezione A-B (si veda Figura 4) è stata realizzata in direzione Sud-Ovest/Nord-Est ed individua la presenza di due corpi di materiali di riporto grossolano, caratterizzati da alti valori di resistività elettrica ( $Rho > 1000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ , tonalità di colore giallo - rosso). Il primo si estende all'incirca dall'inizio della sezione fino alla progressiva 40 m, mentre il secondo tra le progressive 50 e 100 m (corrispondendo perfettamente con l'anomalia individuata mediante indagine elettromagnetica). Entrambi i riporti di ciottoli presentano uno spessore massimo pari a circa 7÷8 m.

Al disotto di tali materiali di riporto resistivi si osserva un livello omogeneo che raggiunge la base della sezione (20 m di profondità dal p.c.), caratterizzato da valori di resistività elettrica medio - bassi ( $Rho < 1000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ , tonalità di colore verde - blu), verosimilmente costituito da terreno naturale sabbioso - argilloso.

---

#### 4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel periodo 22 ÷ 26 Maggio 2014 è stata realizzata una campagna di indagini geofisiche con metodologia elettromagnetica e geoelettrica, presso il comune di Bertonico (LO), in corrispondenza dell'area di futura realizzazione di un passante fluviale per la realizzazione di una centrale idroelettrica.

L'indagine elettromagnetica non ha rilevato alcuna anomalia di rilievo correlabile alla presenza di resti archeologici.

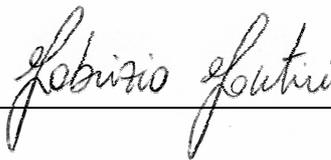
Le anomalie riscontrate e indicate in carta sono legate all'attività antropica recente (attività di cava), ora dismessa.

In particolare:

- AREA EMP1 - nell'area a prativo sul lato ovest della vecchia strada statale si è rilevata un'anomalia areale piuttosto estesa (con una superficie di circa 500 mq) e caratterizzata da valori di conducibilità elettrica apparente molto bassi. Per caratterizzare forma e approfondimento di tale anomalia, è stata tracciata una sezione geoelettrica multielettrodo che ha consentito di verificare trattarsi di un riempimento di terreni di riporto a elevata resistività elettrica (congruente quindi con i dati di bassa conducibilità elettrica apparente rilevati con metodo EM) costituiti da depositi a scheletro grossolano (ghiaia e ciottoli, ?); tali terreni hanno valori di resistività elettrica nettamente differenti dal terreno naturale (caratterizzato da materiali più fini, sabbioso-limosi). E' verosimile ritenere che tale riempimento (di spessore massimo pari a circa 7-8 m) sia stato realizzato per colmare dei vuoti di cava o delle vecchie darsene dell'Adda (di cui si osserva ancora traccia sul corso fluviale);
- AREA EMP2 – sul tracciato stradale non si osserva nulla di significativo, con una notevole omogeneità dei valori di conducibilità elettrica del sottosuolo compatibile con i valori di fondo del terreno naturale/sottofondo stradale;
- AREA EMP3 – nell'area occupata dall'ex attività di cava (sul lato est della vecchia strada statale) si osservano numerose anomalie localizzate riconducibili, tuttavia, alla presenza di strutture e oggetti di varia natura rilevati in superficie (resti metallici di macchinari, blocchi di cemento, ecc..). Si rileva, inoltre, la presenza di una forte anomalia lineare a elevata conducibilità elettrica, congruente con una possibile tubazione interrata.

Relazione redatta da:

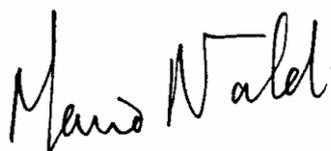
Dott. Ing. Fabrizio Fantini



---

Relazione controllata da:

Dott. Geol. Mario Naldi



---

# **APPENDICE A**

## **Cenni sulla metodologia elettromagnetica**

---

## TEORIA DELLE INDAGINI ELETTROMAGNETICHE

### Richiami preliminari

Le indagini elettromagnetiche in dominio di frequenza (FDEM) consentono di ottenere, in modo speditivo, profili e mappe dei valori della variazione di fase e dell'intensità del campo elettromagnetico secondario rispetto ai valori del campo primario. Il metodo di prospezione EM fa intervenire simultaneamente 3 processi fisici distinti:

1. il passaggio di corrente alternata in una bobina trasmittente genera un campo magnetico  $H_p$  (campo magnetico primario) variabile con il tempo;
2. il flusso del campo magnetico primario genera delle correnti indotte (correnti di *Foucault*) in tutti i conduttori sui quali esso agisce (suoli, rocce);
3. le correnti indotte generano un campo magnetico secondario  $H_s$  il quale insieme al campo primario che si propaga direttamente attraverso l'aria provoca il passaggio di corrente alternata in una bobina ricevente.

L'ampiezza delle correnti indotte in un corpo conduttore nel sottosuolo dipende da diversi fattori :

- proprietà elettriche del conduttore;
- dimensioni e dalla forma del conduttore;
- frequenza del campo primario;
- posizione del conduttore rispetto agli strumenti di indagine geofisica.

La conduttività elettrica (l'inverso della resistività) dei suoli e delle rocce dipende inoltre dal grado di saturazione in acqua, dalla salinità dell'acqua contenuta nei pori della roccia, dalla composizione mineralogica, dalla presenza di metalli o contaminati organici (benzina, gasolio, nafta ecc.).

Si analizza quindi la variazione in ampiezza e fase che un segnale (onda sinusoidale) subisce nell'attraversare mezzi a diversa conduttività.

Tra le diverse soluzioni tecniche disponibili sono da evidenziare, per il loro utilizzo in geofisica ambientale, gli strumenti denominati Ground Conductivity Meters (GCM), commercializzati da Geonics Ltd (EM31), GSSI (Profiler) e Geophex Ltd (GEM-2). Tali dispositivi elettromagnetici in dominio di frequenza (di tipo Slingram) utilizzano due bobine di piccole dimensioni (Small-loop systems), una trasmittente ed una ricevente, affiancate secondo specifiche configurazioni e mantenute ad una distanza costante  $s$  (a seconda delle strumentazioni compresa tra 0,75 m e 100 m). L'acquisizione prevede lo spostamento dello strumento lungo una serie di profili paralleli secondo una geometria prestabilita.

Le strumentazioni GCM consentono di ricavare, sotto opportune ipotesi, dalla componente in quadratura del campo magnetico secondario, misurato alla bobina ricevente, il valore della conducibilità apparente del volume di suolo indagato.

---

## Caratteristiche operative

Per la presente indagine si è utilizzata la strumentazione elettromagnetica PROFILER EMP-400 prodotta dalla GSSI (USA), un conducivimetro multifrequenza che rientra nella categoria delle strumentazioni elettromagnetiche in dominio di frequenza di tipo GCM.

Il Profiler può utilizzare simultaneamente fino a 3 frequenze definite dall'utente, in un range compreso tra 1 kHz e 16 kHz, registrando le componenti in fase ed in quadratura del campo magnetico secondario, normalizzate rispetto al campo magnetico primario. Il sensore dello strumento è costituito da una bobina trasmittente e da una ricevente, poste ad una distanza pari a 1.219 m. Tale geometria, chiamata configurazione bistatica, contiene anche una terza bobina accoppiata bucking coil che rimuove (avendo polarità opposta) il campo magnetico primario registrato alla bobina ricevente, di intensità molto superiore a quello indotto.

Le bobine riceventi registrano, tramite un convertitore A/D (analogico-digitale) a 16 bit, il segnale dovuto al campo magnetico indotto; dall'analisi di convoluzione tra il campo magnetico primario ed il secondario viene elaborato il loro rapporto ed espresso in ppm (parti per milione).

Estraendo la componente in fase e la componente in quadratura di fase, si ha:

$$\text{In fase: } \operatorname{Re}\left(\frac{H_s}{H_p}\right) \cdot 10^6 \text{ [ppm]}$$

$$\text{In quadratura: } \operatorname{Im}\left(\frac{H_s}{H_p}\right) \cdot 10^6 \text{ [ppm]}$$

La componente in fase risulta sensibile ad oggetti metallici (fusti sepolti, tubazioni interrato ecc.). La componente in quadratura di fase è proporzionale alla conducibilità del mezzo indagato.

I conducivimetri LIN (a basso numero d'induzione) consentono, per un range di frequenze e di conducibilità determinato, di calcolare la conducibilità elettrica apparente del terreno indagato. Il GEM-2 fornisce direttamente il valore della conducibilità apparente, calcolato con la formula:

$$\sigma_a = 360 \cdot \text{ppm}(Q) / f \text{ [mS/m]}$$

essendo ppm(Q) la componente in quadratura di fase ed  $f$  la frequenza [Hz].

## Acquisizione ed elaborazione dati

I dati vengono acquisiti secondo la seguente procedura:

1. si traccia un'area (possibilmente rettangolare) di acquisizione che, opportunamente referenziata rispetto ad un sistema di coordinate note, viene suddivisa in una serie regolare di linee di misura (in funzione del dettaglio richiesto);
2. l'operatore seleziona e visualizza attraverso il menu di setup i parametri dello strumento relativi all'acquisizione dell'area;
3. l'operatore si posiziona sul primo punto di acquisizione (con coordinate  $x = 0$ ,  $y = 0$ ), attiva lo strumento e cammina con passo regolare lungo la prima linea di misura;

4. lo strumento esegue la misura il cui termine viene stabilito dall'operatore alla fine della linea;
5. dopo aver registrato i dati acquisiti sulla prima linea, l'operatore passa alla successiva e ripete le procedure di cui al punto 3).
6. al termine dell'acquisizione si ha come output una serie di punti a cui vengono attribuite le coordinate rispetto al sistema di riferimento locale, le componenti in quadratura, fase e conducibilità apparente per ogni frequenza indicata.

### **Potenziali fonti di disturbo**

Il Profiler EMP-400 fornisce un valore relativo di conducibilità elettrica a partire dal confronto tra due campi magnetici (campo primario e campo indotto). E' evidente, quindi, che la presenza di campi elettromagnetici nella zona del rilievo possono essere fonte di disturbo. La misura elettromagnetica, in particolare, fortemente disturbata da:

- elettrodotti;
- motori elettrici di grosse dimensioni
- accumuli di rottami metallici ecc.

### **Profondità di indagine**

L'utilizzo di più frequenze consente d'individuare anomalie diverse prodotte da target di diversa natura. La profondità d'indagine è funzione della frequenza, della conducibilità del mezzo e della geometria e disposizione dell'anomalia da indagare.

Il Profiler EMP-400, con spaziatura pari a 1,219 m tra le bobine, ha una profondità massima di investigazione di circa 10m, in base alle caratteristiche del mezzo investigato. Sulla base di queste considerazioni, se gli eventuali obiettivi dovessero trovarsi in zone a profondità maggiore occorre approfondire l'indagine con indagini geofisiche di dettaglio (linee di tomografia elettrica) o direttamente con sondaggi geognostici.

## **APPENDICE B**

### **Cenni sulla metodologia geoelettrica multi-elettrodo**

## CENNI TEORICI SULLE INDAGINI GEOELETTRICHE

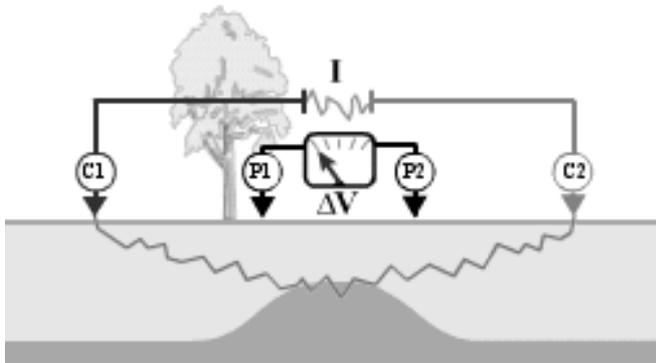
La tomografia di resistività elettrica di superficie ha come obiettivo la costruzione di un modello elettrico bidimensionale o tridimensionale del sottosuolo effettuando delle misure di potenziale elettrico in seguito all'immissione di corrente elettrica nel sottosuolo.

Il principio fisico su cui si basano le misure di resistività elettrica è la legge di *Ohm*, che governa il flusso di corrente in un mezzo:

$$J = \sigma E$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica [Siemens/m] del mezzo,  $E$  è l'intensità del campo elettrico applicato [V/m],  $J$  è la densità di corrente [ $A/m^2$ ]. Nelle indagini geoelettriche si è soliti esprimere anziché la conducibilità, la resistività  $\rho = 1/\sigma$  [ $\Omega m$ ].

Nella pratica ciò che viene misurato è la differenza di potenziale tra due punti della superficie (schema sottostante).



**Figura B. 1** Schema di base usato per le indagini elettriche: gli elettrodi C1 e C2 sono le sorgenti di corrente elettrica mentre P1 e P2 sono gli elettrodi di misura del potenziale.

Nel caso di un semispazio omogeneo la differenza di potenziale misurata agli elettrodi P1 e P2 risulta pari a:

$$\Delta\Phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)$$

Le misure di campo sono condotte su mezzi non ideali (e quindi eterogenei); la resistività inoltre varia in uno spazio tridimensionale per cui dalla corrente  $I$  e dalla differenza di potenziale  $\Delta\Phi$  si calcola un valore di resistività *apparente*:

$$\rho_a = k \frac{\Delta\Phi}{I}$$

$k$  è un fattore geometrico che dipende dalla configurazione degli elettrodi ed è pari a:

$$k = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)}$$

Gli strumenti di misura, i georesistivimetri, rilevano un valore di resistenza ( $R = \Delta\Phi/I$ ), per cui la resistività apparente si calcola come:

$$\rho_a = kR$$

Tale resistività è un valore appunto *apparente* che corrisponde cioè alla resistività che un semispazio omogeneo fornirebbe nella stessa configurazione elettroica.

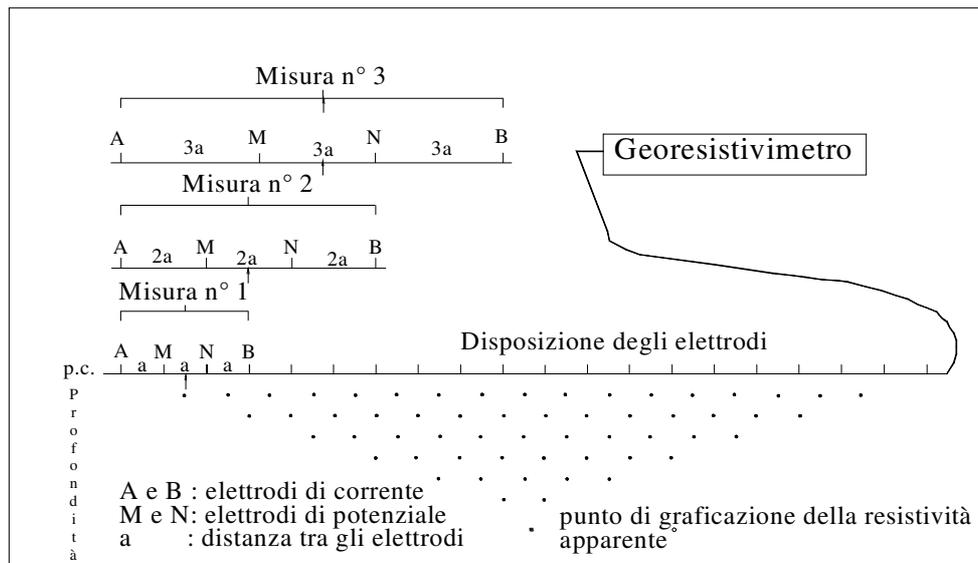
L'esecuzione di misure di resistività ottenute traslando lateralmente il quadripolo consente di ottenere informazioni relative a variazioni laterali di resistività. Se invece si aumenta la spaziatura tra gli elettrodi di corrente e di tensione, aumenta la profondità di indagine e si ottengono informazioni maggiori sulle variazioni verticali. La strumentazione tipica delle tecniche di tomografia elettrica permette di effettuare le due operazioni in modo automatico, e di associare ad ogni linea di misura, una distribuzione bidimensionale di resistività apparente, detta pseudo-sezione.

Per effettuare le misure ERT si utilizzano un certo numero di elettrodi (48-72 nelle configurazioni più comuni) disposti lungo un profilo, con passo dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste. Questi sono collegati con un cavo multipolare al georesistivometro, che consiste in un'unità *switching* che può essere esterna o interna, comandata da un microprocessore. Tale unità ha la funzione di selezionare, per ogni lettura, gli elettrodi attivi (di corrente e di tensione).

La sequenza delle misure, così come il tipo di array, l'intensità di corrente e la durata delle acquisizioni, sono parametri di input usualmente impostati dall'utente. Il formato di uscita della strumentazione normalmente permette di ottenere per ogni misura, la corrente immessa, la differenza di potenziale, la configurazione elettroica, la resistività apparente e una stima statistica sulla qualità delle misure.

Le configurazioni elettroiche più utilizzate nelle indagini geofisiche di resistività sono sicuramente: Wenner, Dipolo-Dipolo e Wenner-Schlumberger. Queste differiscono principalmente in relazione a potere risolutivo, profondità di investigazione, copertura orizzontale e stabilità del segnale.

La configurazione **Wenner** (schema sottostante) presenta un'alta risoluzione verticale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture o stratificazioni orizzontali, una buona profondità di investigazione, scarsa copertura orizzontale e una buona stabilità del segnale, essendo questa inversamente proporzionale a k.



**Figura B. 2 Sistema di acquisizione dei dati utilizzando il dispositivo di Wenner.**

La configurazione **Dipolo-Dipolo**, presenta invece un'alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture verticali (variazioni laterali di resistività, cavità ecc.), profondità di investigazione e ampiezza del segnale misurato minori rispetto al Wenner, ma con una maggiore copertura orizzontale.

Il dispositivo **Wenner-Schlumberger** rappresenta una soluzione ibrida ed è quello più utilizzato in geofisica ambientale poiché costituisce il giusto compromesso tra le caratteristiche sopra descritte.

Per ottenere, a partire dai valori di resistività apparente, la distribuzione delle resistività reali nel sottosuolo, è necessario risolvere un "problema inverso". In molte applicazioni geofisiche, la soluzione del problema inverso consente di determinare i valori di quantità non misurabili direttamente, parametri incogniti, a partire da quantità misurabili, i dati sperimentali, attraverso l'assunzione di un modello, cioè di una legge fisica che li correla. Tale modello è una rappresentazione matematica ed ideale di una porzione di sottosuolo; il modello è caratterizzato dai "parametri del modello" che sono le quantità fisiche che si vuole stimare dai dati misurati. Nel caso della tomografia elettrica, si vuole stimare la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo a partire da misure effettuate in superficie.

Il software utilizzato per l'inversione (RES2DINV, © Loke) implementa un modello a celle (o blocchi), i cui parametri sono i valori di resistività delle singole celle in cui il sottosuolo è stato suddiviso; la soluzione agli elementi finiti o alle differenze finite fornisce i valori di resistività reale.

Dal modello geofisico, con opportune tarature e/o in base alle conoscenze geologiche del sottosuolo, si elabora un modello geo-litologico. La profondità di indagine raggiunta è mediamente pari a 1/7 della lunghezza dello stendimento: pertanto con un'interasse elettrodica di 3 m con 48 elettrodi si ottiene una

estensione di indagine laterale pari a circa 141 m ed una profondità di circa 20 m. Nella tabella successiva si riportano i valori di resistività elettrica di alcuni terreni e materiali, che sono stati utilizzati come valori indicativi nell'interpretazione delle tomografie.

<b>Materiale</b>	<b>Resistività (<math>\Omega.m</math>)</b>
Acqua dolce	$10 \cdot 10^2$
Acqua salata	0.2
Arenarie	$2 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3$
Argille	1-50
Benzina	$10^7$
Calcari	$3 \cdot 10^2 - 10^4$
Cloruro di Potassio	0.708
Cloruro di sodio	0.843
Depositi alluvionali	$50 \cdot 10^3$
Dolomie	$5 \cdot 10^2 - 10^5$
Ferro	$9.074 \cdot 10^{-8}$
Ghiaia e sabbia secca	$10^3 - 10^4$
Ghiaia e sabbia sature d'acqua dolce	$50 - 5 \cdot 10^2$
Ghiaia e sabbia sature d'acqua salata	2-5
Gneiss e graniti sani	$10^3 - 10^4$
Gneiss e graniti alterati	$10^2 - 10^3$
Marne	$50 - 5 \cdot 10^2$
Piroclastici	$50 - 6 \cdot 10^2$
Rocce ignee	$10^2 - 10^4$
Suolo di copertura	$10 - 2 \cdot 10^2$
Tufi	$1.5 \cdot 10^2 - 9 \cdot 10^2$

**Tabella B.1: Valori caratteristici di resistività elettrica  
[Ulriksen (1982), Telford (1990), Reynolds (1997)]**

Un ulteriore parametro misurabile con il metodo della tomografia elettrica è la polarizzazione indotta. L'effetto di polarizzazione indotta nel sottosuolo è determinato da due meccanismi principali: la polarizzazione di membrana e la polarizzazione d'elettrodo. Il primo è prevalentemente causato dai minerali argillosi presenti nelle rocce o nei sedimenti, il secondo dalla presenza di minerali conduttivi. Le misure di IP sono effettuate in dominio di tempo; l'effetto di polarizzazione indotta si stima in seguito alla misura del decadimento della tensione dopo che la corrente inviata nel sottosuolo viene interrotta. L'unità di polarizzazione indotta, denominata caricabilità apparente, è solitamente espressa in mV/V o in ms.

I valori di caricabilità apparente ottenuti dalle misure, vengono sottoposti ad un modello di inversione numerica per ricavare un modello tomografico dei valori di caricabilità. In Tabella B.2 si riportano i valori caratteristici di caricabilità di alcuni minerali e rocce:

<b>Minerali</b>	<b>Caricabilità (ms)</b>	<b>Materiali e rocce</b>	<b>Caricabilità (ms)</b>
Pirite	13-15	Solfuri (20 % volume)	2000 - 3000
Calcocite	13.2	Solfuri (8-20 %)	1000 - 2000
Calcopirite	9.5	Solfuri (2-8 %)	1000 - 2000
Rame	12	Rocce vulcaniche	100 - 500
Grafite	11	Quarziti	5 - 12
Galena	4	Graniti	10 - 50
Magnetite	2	Arenaria	100 - 500
Malachite	0.2	Argilliti	50 - 100
Ematite	0	Calcari	10 - 20
		Alluvioni	1 - 4
		Ghiaie	3 - 9
		Scisti	5 - 20
		Acqua	0

**Tabella B.2: Valori di caricabilità di alcuni minerali e rocce naturali.**

## **APPENDICE C**

# **Specifiche tecniche strumentazioni geofisiche**



**The World Leader in  
Subsurface Imaging™**

# Profiler

# EMP-400

Multi-Frequency  
EM Conductivity  
Meter



**Geophysical Survey Systems, Inc.**



The Profiler EMP – 400 is a frequency domain, electromagnetic profiling system. By acquiring multiple frequencies, the user can select the frequencies that provide the best results for a specific application.

Profiler can be configured to simultaneously measure up to 3 frequencies between 1000 Hz and 16,000 Hz. The system can be deployed in either the vertical or horizontal dipole mode.

The output is the mutual coupling ratio (Q) in parts per million (PPM) for both the in-phase and quadrature, or apparent conductivity in mS/m.

All survey acquisition parameters and EM data are stored on internal memory. Files are structured in Excel spreadsheet format (ASCII text file) for simple download to a PC for immediate presentation on commercial mapping software packages.

### Profiler Features:

- Single person operation
- Affordable and easy to use
- Collects multiple frequencies
- Designed for measurement stability
- Real-time results
- Wireless data logger
- Integrated GPS
- Light weight - less than 10 pounds
- Built with pride in the USA

### Real-time Display:

- Survey grid coordinates
- Measurement values; In-phase & Quadrature in PPM or Conductivity in mS/m
- Survey navigation display
- Alphanumeric or graphic data display
- On-screen contour plots of collected data



Archaeology



Geology



Precision Agriculture



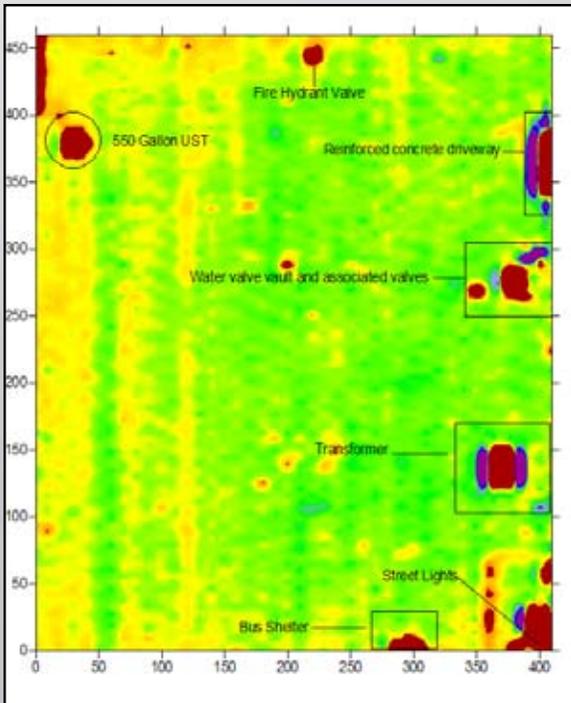
Environmental Assessment



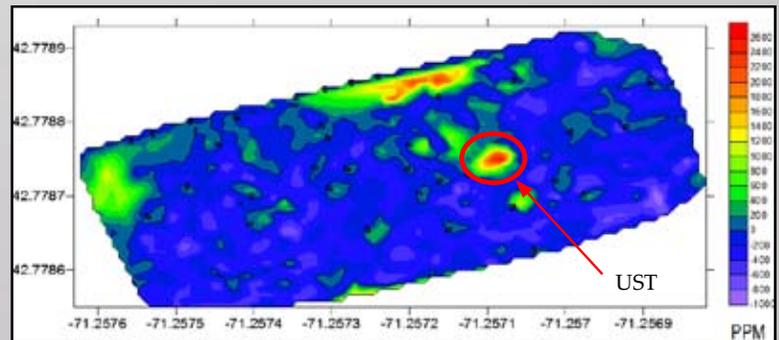
# Profiler



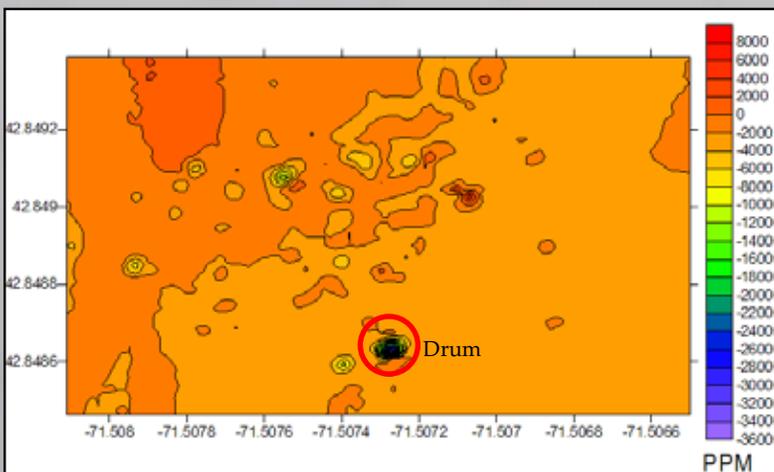
## Data Examples



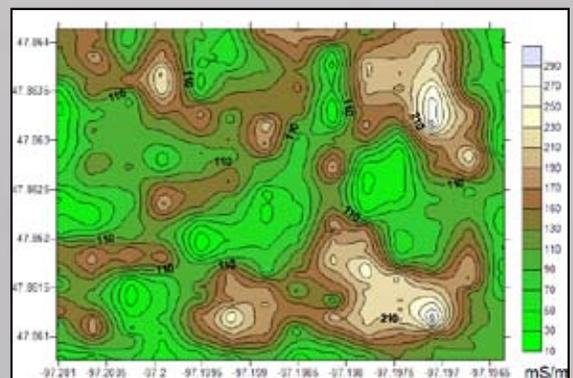
5 kHz In-Phase VDM data of 4.5 acre dairy site.



14.6 kHz quadrature VDM data file of the GSSI parking lot collected with a Trimble™ AG 132 GPS.



10 KHz In-Phase VDM data of a Brownfield site.



14.6 kHz conductivity VDM data showing localized zones of high conductivity related to areas of high soil salinity.

## Profiler System Includes:

- Profiler EM system with wireless, handheld computer
- 12-channel WAAS GPS (can also be integrated with external GPS)
- 2 batteries
- Battery charger
- Carrying strap
- Rugged transit case
- Instruction manual
- 2-year warranty

## Physical Dimensions:

- Length: ~ 57.5 inches (1.46 m)
- Max. Width: ~ 9.5 inches (24 cm)
- Max. Height: ~ 4.9 inches (12.4 cm)
- Weight: ~ 10 pounds (4.535 kg)

## Specifications:

Coil Spacing:	4 feet (91.219 m)
Operational Band-width:	1 kHz to 16 kHz
Records from	1 to 3 frequencies
Measurement Values:	In-phase - PPM Quadrature - PPM Conductivity - mS/m
Memory	248.5 MB 180,000 continuous data points 360,000 discrete data points
Power:	Re-chargeable Lithium Ion battery or 8 (eight) AA batteries
Data Transfer:	Via MicroSoft® Active Sync
Display:	2.2" x 2.9" color screen (5.58 x 7.36 cm)



[www.geophysical.com](http://www.geophysical.com) • [sales@geophysical.com](mailto:sales@geophysical.com)

12 Industrial Way • Salem, NH 03079-4843  
Tel: (603) 893-1109 • Fax: (603) 889-3984



**The World Leader in  
Subsurface Imaging™**

Copyright © 2007 Geophysical Survey Systems, Inc.  
November, 2007

# IRIS INSTRUMENTS

## SYSCAL R1 PLUS *Switch-72*



### RESISTIVITY IMAGING FOR ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

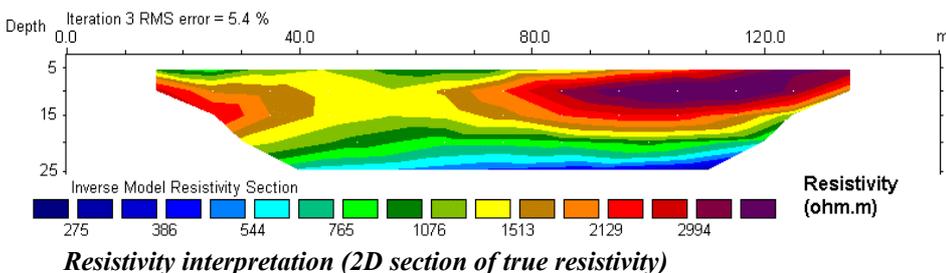
- Compact yet powerful
- **600 V – 200 W – 2.5 A**
- Automatic ranging
- Automatic switching



**SYSCAL R1 PLUS Switch-72** is a new **all-in-one multinode resistivity imaging** system. It features an internal switching board for 72 electrodes and an internal 200 W power source. The output current is automatically adjusted (automatic ranging) to optimise the input voltage values and ensure the best measurement quality. The system is designed to automatically perform pre-defined sets of resistivity measurements with roll-along capability. Four strings of cable with 18 electrode take-out each are connected together on the back of the resistivity meter. Made of heavy duty seismic cable, these strings are available with standard 5 or 10 m electrode spacings. Customized cables may also be assembled for special arrays or non-standard applications.

Compact, easy-to-use and field proof, the SYSCAL R1 PLUS Switch-72 measures both resistivity and chargeability (IP). It is ideal for environmental and civil engineering applications such as pollution monitoring and mapping, salinity control, depth-to-rock determination and weathered bedrock mapping. It can also be used for shallow groundwater exploration (depth and thickness of aquifers).

With the SYSCAL R1 PLUS Switch-72 resistivity surveys can be performed very efficiently with one operator only.



The well-known reliability and accuracy of the SYSCAL range of resistivity meters will also mean extra value both for the contractor and the results end-user.

### IRIS Instruments

1 avenue Buffon, B.P. 6007, 45060 Orléans Cedex 2, France  
Phone: + 33 (0) 2 38 63 81 00 - Fax: + 33 (0) 2 38 63 81 82  
E-mail: sales@iris-instruments.com - Web site: www.iris-instruments.com

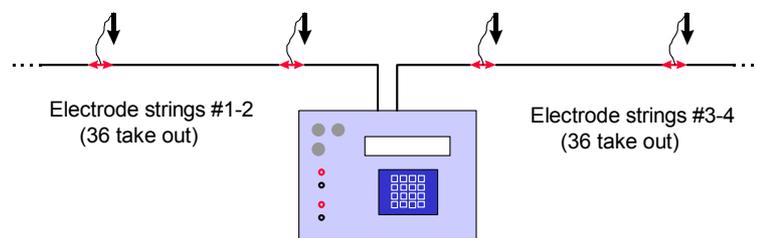


# SYSCAL R1 PLUS *Switch-72*

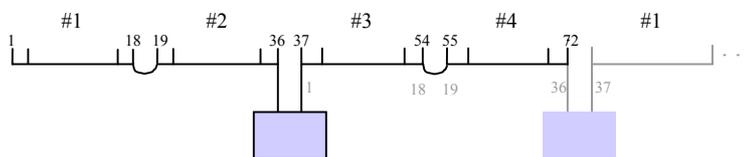
## RESISTIVITY IMAGING

- **Aim:** imaging the underground geological structures through surface electrical measurements
- **Principle:** transmitting a current  $I$  through two electrodes and measuring a voltage  $V$  with two other electrodes
- **Apparent resistivity:**  $\rho = K \cdot V/I$ ,  $K$  depending on the electrode separation
- **Resistivity pseudo-section:** contoured plot of the apparent resistivity data, using the electrode distance as a pseudo-depth parameter
- **True resistivity section:** contoured plot of the resistivity distribution obtained through the inversion of the measured data (using a non linear parameter fitting scheme)
- **Applications:** environmental studies, groundwater investigation, civil engineering, archaeology...

## FIELD LAY-OUT



Preset arrays (Wenner, dipole,...) or customized arrays are uploaded through the user-friendly ELECTRE (version 2) PC software. The roll-along capability is implemented.



## ACCURACY

- Automatic SP compensation including linear drift
- Digital stacking for noise reduction
- Standard deviation computation
- Noise may be monitored before injection

## DATA INTERPRETATION SOFTWARE

- RES2DINV or RESIX-2DI (PC), for pseudo-section inversion to true resistivity (and IP) 2D section
- RES3DINV (PC), for inversion to true resistivity (and IP) 3D data

## OUTPUT CURRENT SPECIFICATIONS

- Automatic ranging (microprocessor controlled)
- Intensity: up to 2500 mA
- Voltage: up to 600V (1200V peak to peak)
- Power: up to 200 W
- Selectable cycle time of 0.25, 0.5, 1 or 2 s programmable from 0.25 to 10 s.
- Current measurement precision: 0,5% typical.

## INPUT VOLTAGE SPECIFICATIONS

- Measuring process: automatic ranging and calibration
- Input impedance : 10 M $\Omega$  minimum.
- Input voltage protection up to 1000V, range from -5 V to +5 V.
- Power line rejection
- Voltage measurement precision: 0.5% typical
- Noise reduction: continuous stacking selectable from 1 to 255 stacks.
- SP compensation through automatic linear drift correction.
- Resistivity accuracy: 0,5% typical
- Induced polarization (chargeability) measured over four predefined windows.
- Chargeability accuracy: 1% of measured value for input voltage higher than 10 mV.

## GENERAL SPECIFICATIONS

- Weather proof
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- Dimensions: 31 x 23 x 40 cm. Weight: 11.5 kg
- Internal memory for 2700 readings
- Power supply: two internal rechargeable 12V, 7 Ah battery ; optional external 12V backup car battery for transmitter power
- Autonomy with internal battery: several thousands of readings
- Weight of a 18 take-out string on a reel: 15 kg each (for 5m spacing)



### IRIS Instruments

1 avenue Buffon, B.P. 6007, 45060 Orléans Cedex 2, France

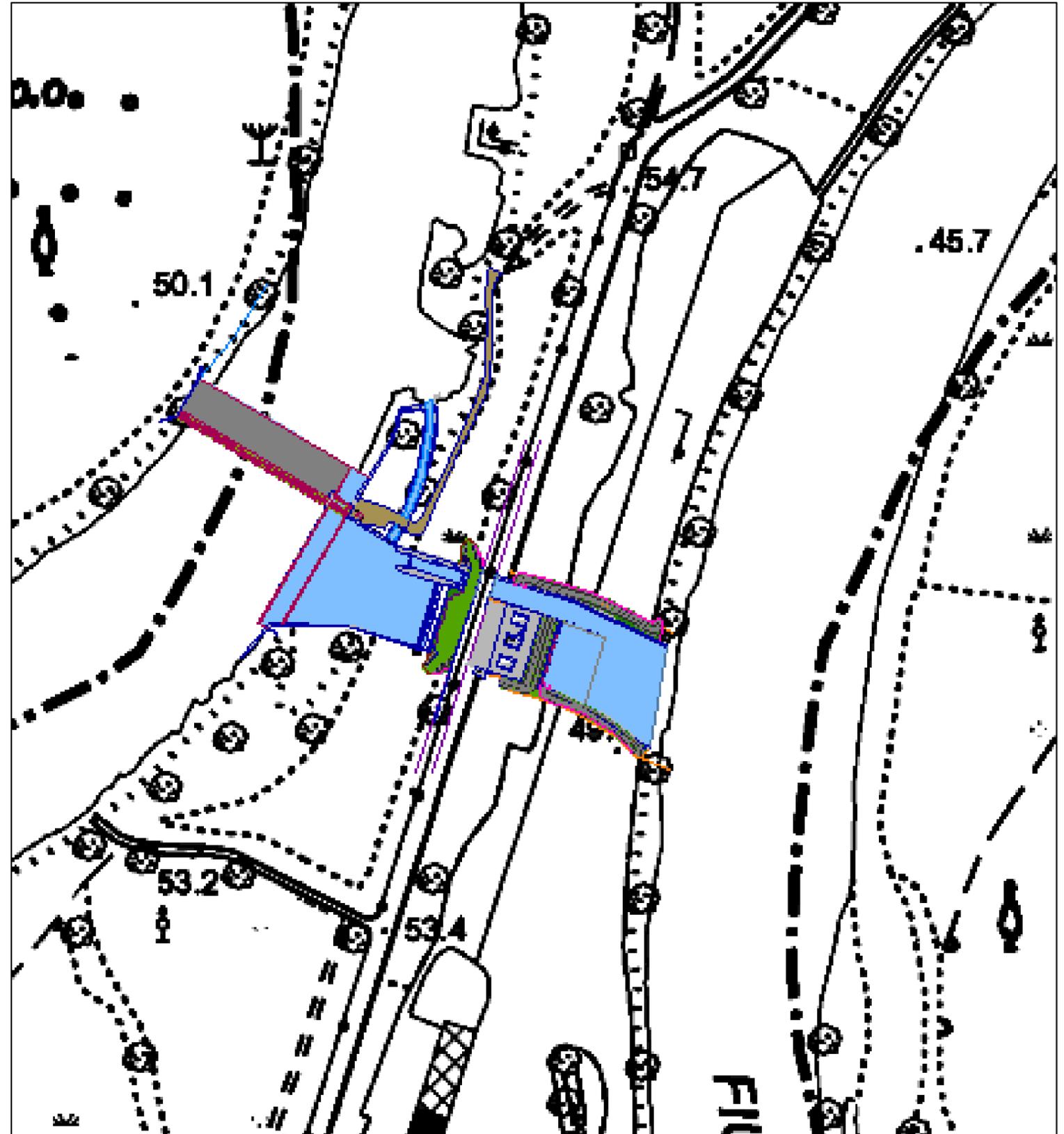
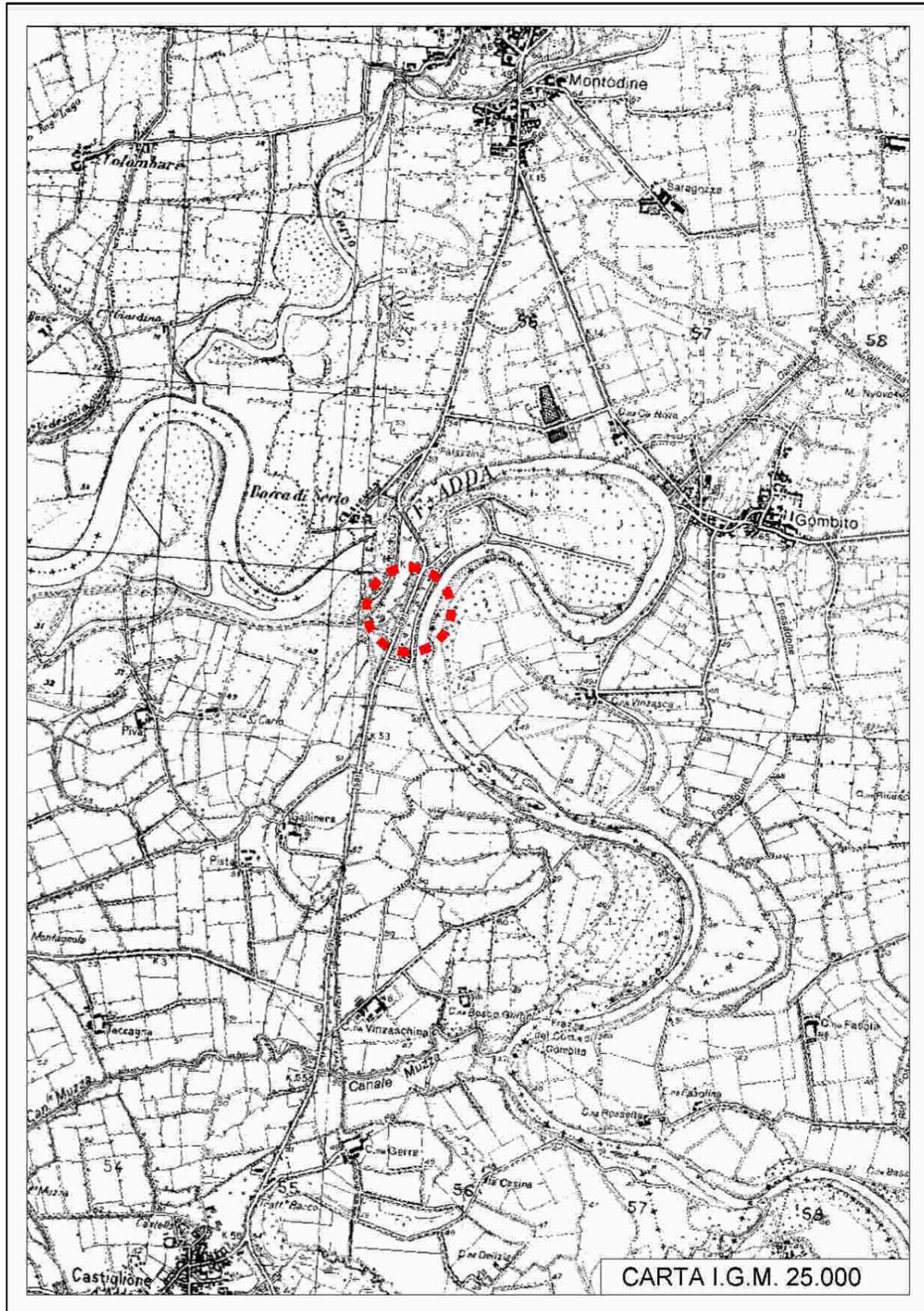
Phone: + 33 (0) 2 38 63 81 00 - Fax: + 33 (0) 2 38 63 81 82

E-mail: sales@iris-instruments.com - Web site: www.iris-instruments.com

## FIGURE

# Impianto idroelettrico sul fiume Adda – indagini geofisiche per verifica archeologica

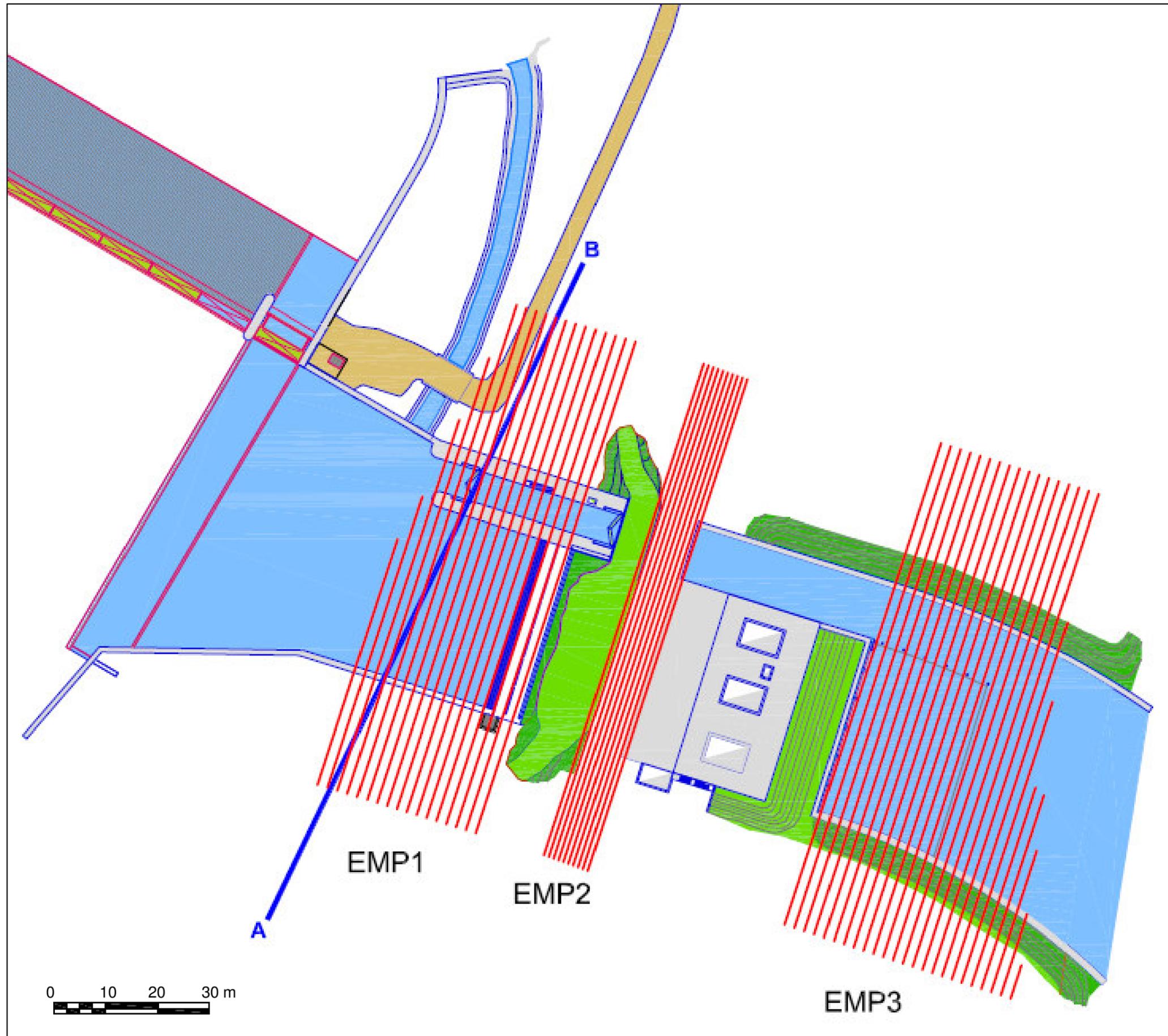
## Ubicazione sito di indagine e schema impianto – non in scala



	Relazione 2752/14
	Revisione 0
Committente Ing. Capellino	Data Maggio 2014
Sito: Bertonico (LO)	Figura 1

# Impianto idroelettrico sul fiume Adda – indagini geofisiche per verifica archeologica

## Ubicazione indagini - Scala grafica



— Linee di acquisizione di punti elettromagnetici all'interno di sub-aree di indagine EMP1, EMP2 e EMP3

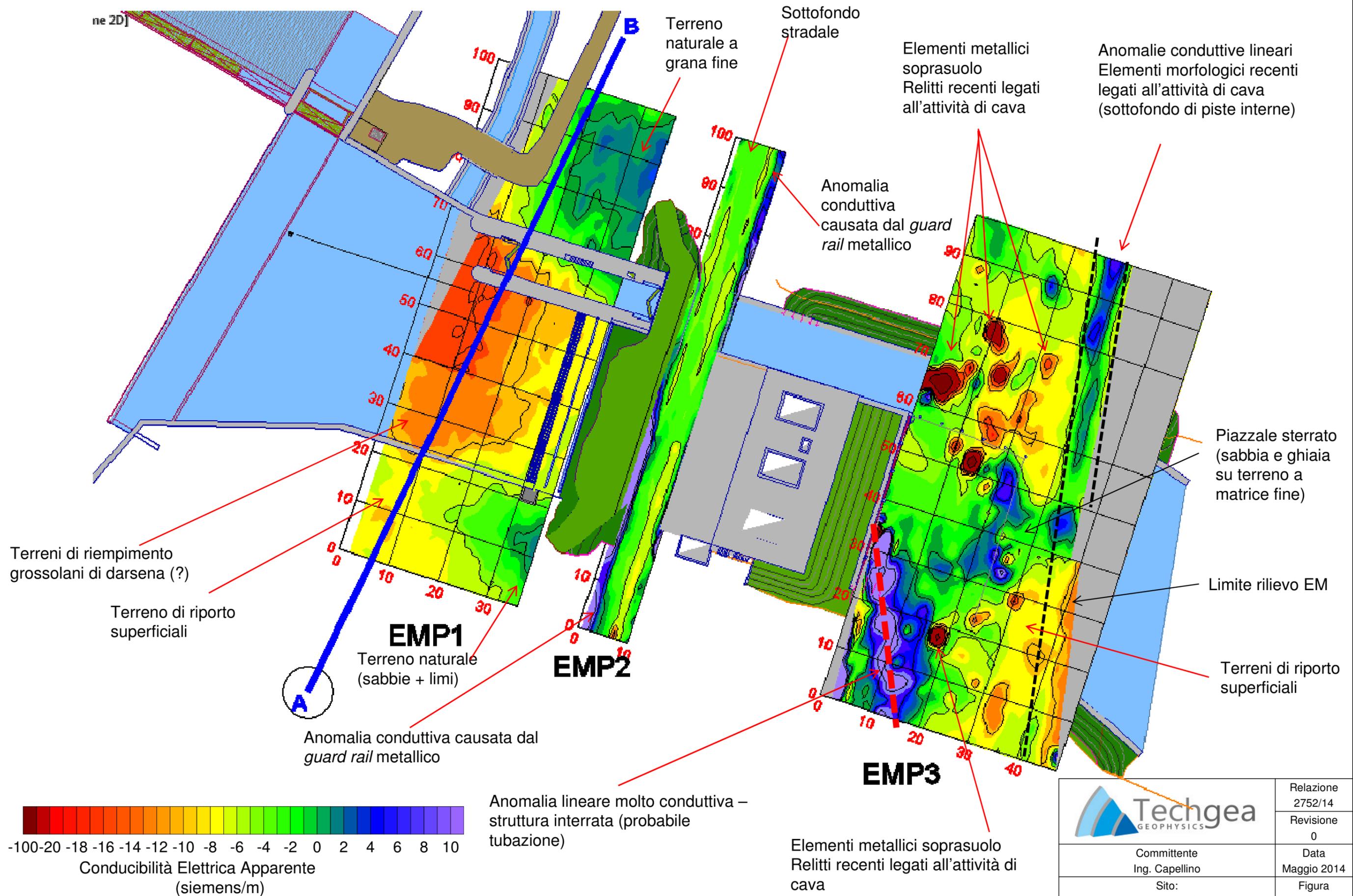
- Spaziatura tra linee: 2 m per EMP1 e EMP3, 1 m per EMP2.
- Distanza tra i punti di acquisizione 30 cm

— Linea geoelettrica multielettrodo

	Relazione 2752/14
	Revisione 0
Committente Ing. Capellino	Data Maggio 2014
Sito: Bertonico (LO)	Figura 2

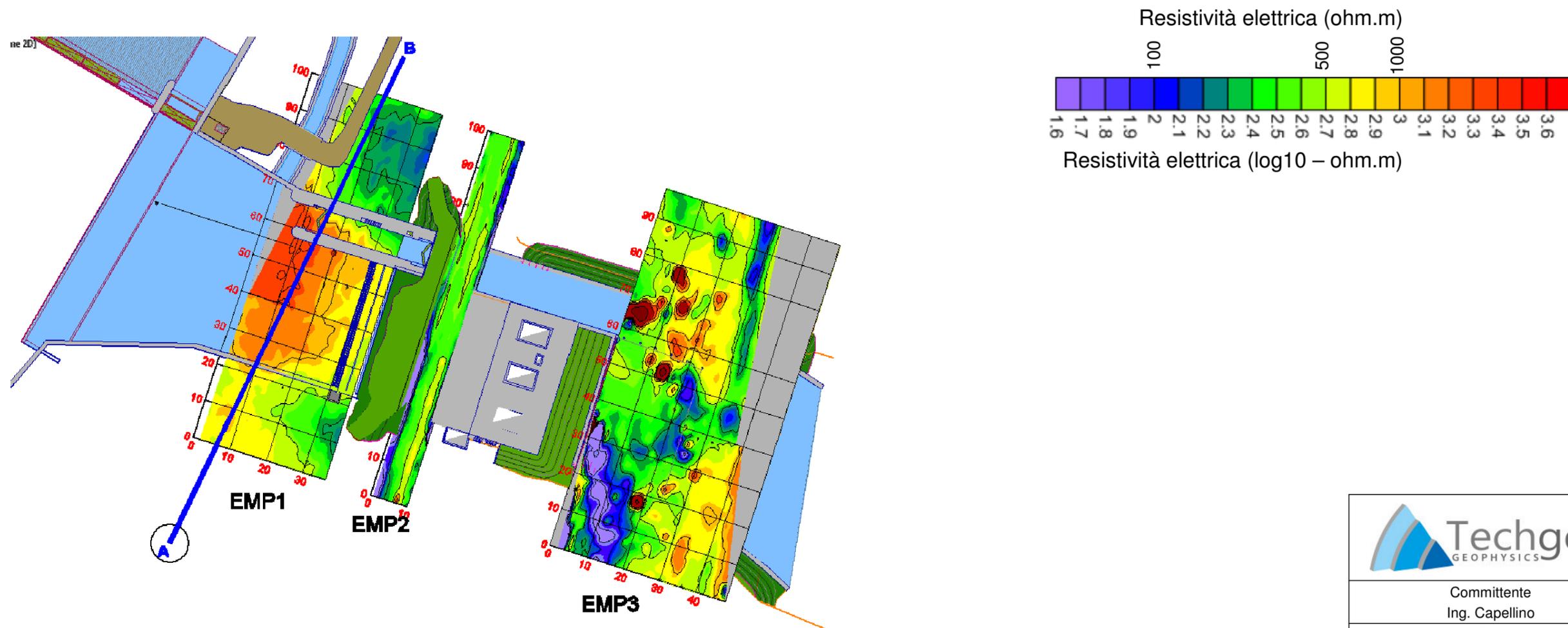
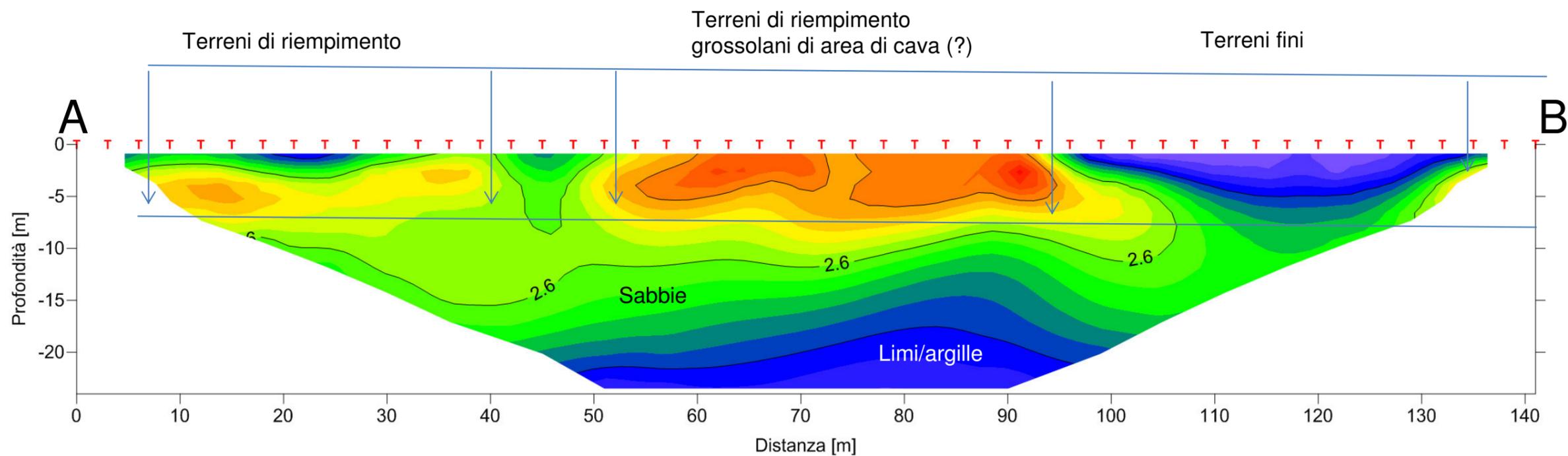
# Impianto idroelettrico sul fiume Adda – indagini geofisiche per verifica archeologica

## Mappa della conducibilità elettrica apparente alla frequenza 9000 Hz - Scala grafica



# Impianto idroelettrico sul fiume Adda – indagini geofisiche per verifica archeologica

## Sezione geoelettrica A-B trasversale all'anomalia resistiva di area EMP1



	Relazione 2752/14
	Revisione 0
Committente Ing. Capellino	Data Maggio 2014
Sito: Bertonico (LO)	Figura 4

# Impianto idroelettrico sul fiume Adda – indagini geofisiche per verifica archeologica

## Documentazione fotografica



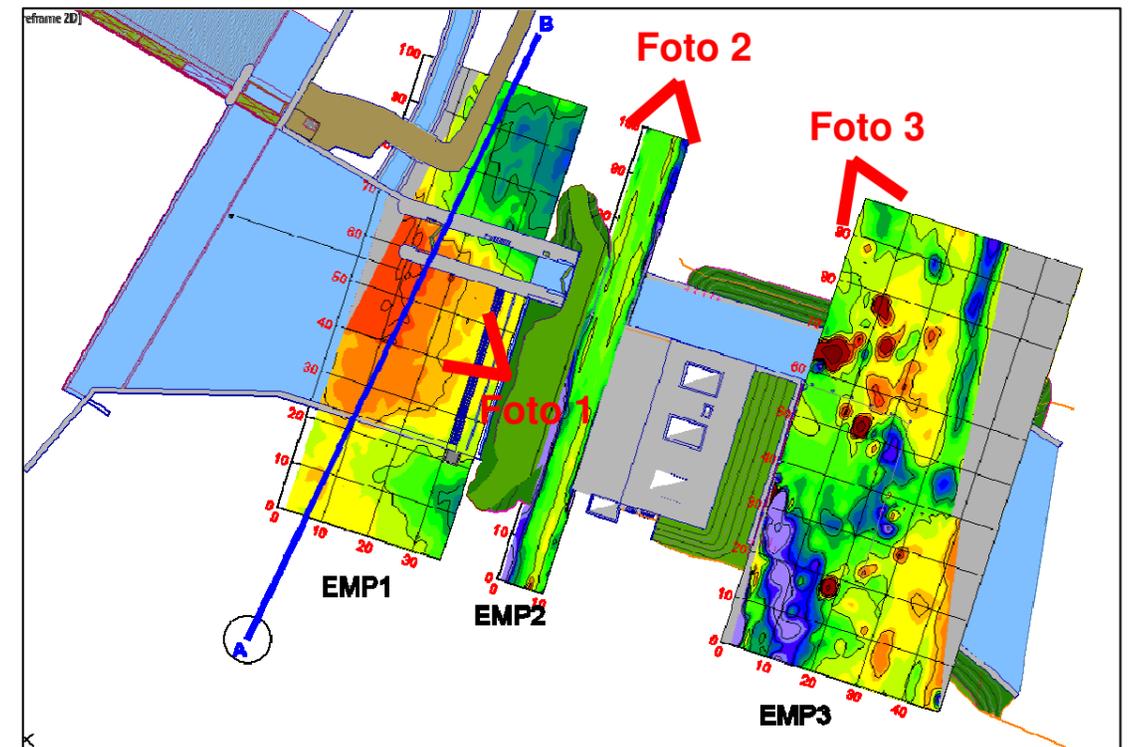
Foto 1 - AREA EMP-1



Foto 2 - AREA EMP-2



Foto 3 - AREA EMP-3



	Relazione 2752/14
	Revisione 0
Committente Ing. Capellino	Data Maggio 2014
Sito: Bertonico (LO)	Figura 5

# Impianto idroelettrico sul fiume Adda – indagini geofisiche per verifica archeologica

## Documentazione fotografica



Strumentazione geoelettrica



Strumentazione Elettromagnetica

	Relazione 2752/14
	Revisione 0
Committente Ing. Capellino	Data Maggio 2014
Sito: Bertonico (LO)	Figura 6