Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
124° (2006), Vol. XXX, P. II, pp. 187-204

MARIA TERESA CARROZZO *

Il contributo della Geofisica ai Beni Culturali: alcune esperienze nel Salento

1. Introduzione

La *Geofisica* si occupa della Terra sotto l'aspetto fisico: in particolare la Geofisica Applicata, mediante misure non distruttive effettuate sulla superficie della Terra, fornisce informazioni sulla costituzione interna della Terra stessa. Il termine di Geofisica Applicata implica la specificazione del tipo di applicazione; pertanto è possibile parlare di Geofisica Applicata a:

– la definizione delle strutture crostali;
– la ricerca di idrocarburi ed in generale di risorse (depositi di minerali, acque sotterranee ecc.);
– l'ambiente (individuazione e monitoraggio di inquinanti nel sottosuolo; studio delle condizioni per il verificarsi di rischi naturali quali terremoti, allagamenti e frane e dei possibili danni da essi provocati, ecc).;
– la ingegneria (caratterizzazione geologica di suoli e di rocce per scopi geotecnici, idrogeologici, ecc.);
– la ricerca archeologica e lo sviluppo di tecniche diagnostiche per la valutazione dello stato di conservazione e salvaguardia del patrimonio culturale.

Le prospezioni a fini archeologici e le indagini sui beni culturali costituiscono forse il settore più nuovo ed in maggiore espansione della Geofisica Applicata: la recente messa a punto di strumentazione e di metodologie per l'acquisizione e la elaborazione dei dati consente di raggiungere elevate risoluzioni spaziali necessarie in questo ambito a causa delle limitate dimensioni degli oggetti da investigare (resti archeologici e/o anomalie strutturali in beni monumentali). La grande attrattiva dei

* Osservatorio di Chimica, Fisica e Geologia Ambientali, Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università degli Studi del Salento, Via per Arnesano, 73100 Lecce.
E-mail: mteresa.carrozzo@unile.it

metodi di indagine geofisica è costituita dal fatto che essi sono, come già detto, metodi *non distruttivi e non invasivi*. Nella maggior parte dei casi essi sono anche più speditivi e meno costosi della classica campagna di scavo. Il principale limite è costituito dalla caratteristica di tutti i *metodi indiretti*: in essi, è sempre insito un certo grado di incertezza sia sulla stima delle proprietà fisiche e geometriche dei corpi anomali sia sulla possibilità stessa di rilevarne la presenza. La non univocità della soluzione che ne discende, consiglia la necessità di effettuare *indagini Geofisiche integrate*, per aumentare i vincoli e restringere il campo delle possibili soluzioni. A tal fine risulta anche utile, e talora indispensabile effettuare, almeno in alcuni punti, una "taratura" dei risultati delle indagini geofisiche attraverso dati ottenibili da indagini dirette (sondaggi geognostici, scavi archeologici) anche se più distruttive e dispendiose.

2. La Geofisica per prospezioni archeologiche

I metodi geofisici più comunemente usati possono essere classificati, in base alle grandezze fisiche che intervengono nella misura, in:

- *gravimetrici*;
- *magnetometrici*;
- *elettrici*;
- *elettromagnetici*, tra cui il *Ground Penetrating Radar (GPR)*;
- *sismici e acustici* (*a rifrazione* o *a riflessione);*
- *Telerilevamento;*

il nome stesso dei metodi suggerisce le grandezze fisiche coinvolte nella misura: si tratta, nell'ordine, dell'accelerazione di gravità; dell'induzione magnetica; della intensità di corrente e della differenza di potenziale elettrico; dei tempi di percorso e dell'ampiezza di onde elettromagnetiche e sismiche; della radiazione elettromagnetica.

Ciascun metodo geofisico è sensibile al contrasto di un particolare parametro fisico (*densità, suscettività magnetica, resistività elettrica, velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche e velocità di propagazione delle onde sismiche, ecc.*) dell'oggetto da investigare rispetto a quello dell'ambiente circostante: è intuibile che la maggiore o minore efficacia di un metodo rispetto all'altro dipende dall'entità del contrasto dei corrispondenti parametri fisici. Pertanto la scelta dei metodi e delle tecniche di prospezione più idonei è fortemente dipendente dall'obiettivo ed è guidata dai parametri fisici in esso coinvolti oltre che da considerazioni di natura economica e logistica.

Un quadro di sintesi delle caratteristiche di alcuni metodi geofisici e delle loro principali applicazioni in archeologia è fornito in tabella 1.

I metodi geofisici più frequentemente usati sono i metodi magnetometrici, elettrici ed il GPR: essi in condizioni favorevoli consentono di produrre, in modo abbastanza rapido, mappe la cui interpretazione fornisce indicazioni sulla presenza di possibili strutture archeologiche e sulla loro posizione planimetrica; inoltre il

Metodi	Grandezze coinvolte nella misura	Parametri fisici indagati	Tecniche di misura	Principali applicazioni
Gravimetrici	Accelerazione di gravità, g (mGal o μGal)	Densità, δ (g/cm^3)	Passo del pellegrino	Ricerca di cavità
Magnetometrici	Induzione magnetica, **B** (nT)	Suscettività magnetica, χ	Profili continui e per punti	Ricerca di strutture o manufatti magnetizzati (muri, terrecotte, forni, focolai)
Elettrici	Corrente, I (mA), Differenza di potenziale, V (mV)	Resistività, ϱ (Ω m)	S.E.V. (quadripolo Schlumberger)	Caratterizzazione elettro-stratigrafica, stima del livello di falda
			Profilo (quadripolo Wenner)	Ricerca di cavità e strutture elettricamente anomale
			Tomografia elettrica 2D e 3D (diversi dispositivi elettrodici)	Ricerca di strutture e/o cavità; ricostruzioni paleoambientali (es. paleoalvei); stima del contenuto d'acqua
G.P.R.	Tempi di percorso delle o.e.m., t (ns), Attenuazione, A (dB), Frequenza, f (MHz)	Velocità di propagazione delle o.e.m. v(m/ns);	Profili continui e per punti	Ricerca di cavità o strutture elettromagneticamente anomale (essenzialmente contrasti di costante dielettrica e); stima del grado di umidità.
			WARR e CMP	
			Tomografia	
Sismici	Tempi di percorso delle onde sismiche, t (ms), Attenuazione, A (dB)	Velocità di propagazione delle onde sismiche V (m/s);	Rifrazione	Caratterizzazione stratigrafica; ricerca del basamento roccioso; valutazione del degrado dei materiali (variazioni delle caratteristiche elastiche).
			Riflessione	
			Tomografia	

Tab. 1 - Principali caratteristiche ed applicazioni dei metodi geofisici più frequentemente usati per i beni culturali.

metodo GPR ed il metodo elettrico (se utilizzato con opportuni accorgimenti) forniscono indicazioni abbastanza accurate sulla profondità delle strutture sepolte. Si deve anche notare che la rappresentazione in mappa dei risultati, oltre a facilitare la correlazione con le evidenze di scavo, consente l'integrazione ed il confronto con altri tipi di dati quali foto aeree ed immagini telerilevate.

3. Alcune applicazioni

Le applicazioni di seguito presentate a titolo di esempio sono frutto di indagini condotte negli ultimi anni dall'Osservatorio di Chimica, Fisica e Geologia Ambientali – Dipartimento di Scienza dei Materiali – dell'Università del Salento ed illustrano alcune delle potenzialità offerte dai metodi geofisici nella ricerca archeologica.

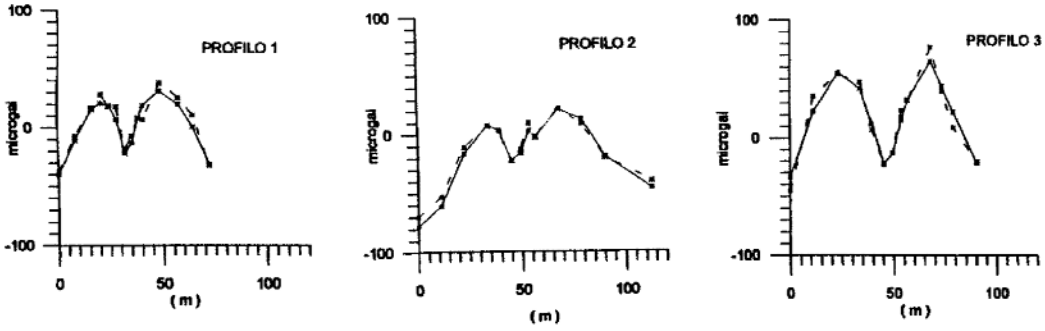
In tutti i casi proposti si è utilizzato il GPR, eventualmente in associazione ad altri metodi geofisici scelti a seconda degli obiettivi: esso, in condizioni favorevoli per il suo utilizzo (in presenza di materiali poco conduttivi e non magnetici e nel caso di un buon contrasto tra le proprietà dielettriche degli oggetti da rilevare rispetto al mezzo inglobante) ha fornito maggiore ricchezza di informazioni ed in tempi notevolmente più ridotti, relativamente agli altri metodi utilizzati.

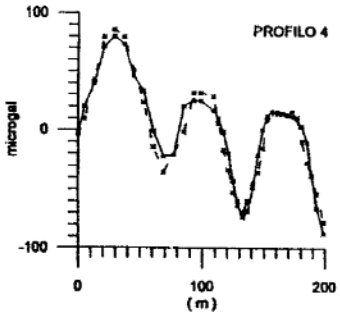
3.1 *Porto Badisco - Otranto (Lecce)*

A Porto Badisco – Otranto (LE) – sito di grande interesse archeologico e speleologico in quanto frequentato dall'uomo sin dal Neolitico, come dimostrano i graffiti della Grotta dei Cervi, sono state eseguite alcune indagini geofisiche integrate con l'obiettivo di individuare le eventuali prosecuzioni del complesso carsico comprendente la Grotta dei Cervi stessa. A tal fine, in un'area immediatamente a ridosso dei cunicoli esplorati, sono stati eseguiti quattro profili gravimetrici e numerosi profili con il metodo GPR, oltre ad un profilo di sismica a rifrazione. La inversione delle anomalie di gravità ha prodotto (Fig. 1a) un modello tridimensionale di distribuzione delle densità (Fig. 1b) che prevede la presenza di cavità, schematizzate mediante prismi, (b, c, d, e) in significativa corrispondenza con il prolungamento di uno dei cunicoli noti, oltre che di varie zone a densità più bassa rispetto a quella del materiale inglobante (ad esempio il prisma g), giustificabili con un locale aumento del grado di carsificazione dell'ammasso calcareo. L'indagine GPR (antenna da 35 MHz), eseguita in collaborazione con l'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali (ITABC) del CNR - Roma, ha messo in evidenza lungo più profili paralleli alcune ampie anomalie inequivocabilmente associabili, per la forma e per la notevole intensità energetica (dovuta al forte contrasto tra la costante dielettrica della roccia calcarea e quella del vuoto), al tetto di cavità (Fig. 2). Le indicazioni sulla loro dimensione orizzontale e sulla profondità del tetto, oltre a confermare le evidenze sperimentali dell'indagine gravimetrica hanno fornito a questa degli importanti vincoli per la modellazione (Carrozzo *et al.*, 1999).

3.2 Piazza Tito Schipa - Lecce

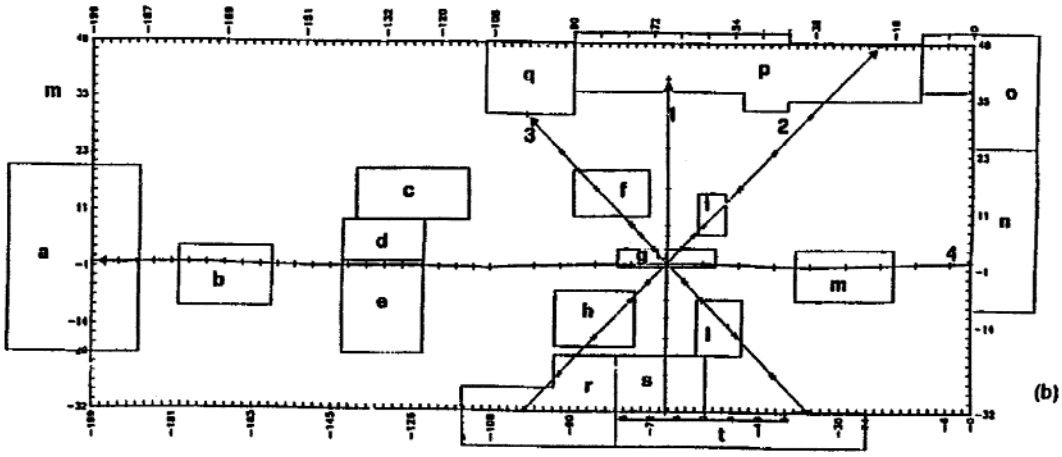
Un altro rilievo, eseguito in piazza Tito Schipa, nelle immediate vicinanze del centro storico leccese, illustra le potenzialità offerte dai metodi geofisici in area urbana. In questo caso la sismica a rifrazione (profili S1, S2, S3 in Fig. 3a) è stata utilizzata per individuare lo spessore del materiale rimaneggiato (Fig. 3b), mentre





(a)

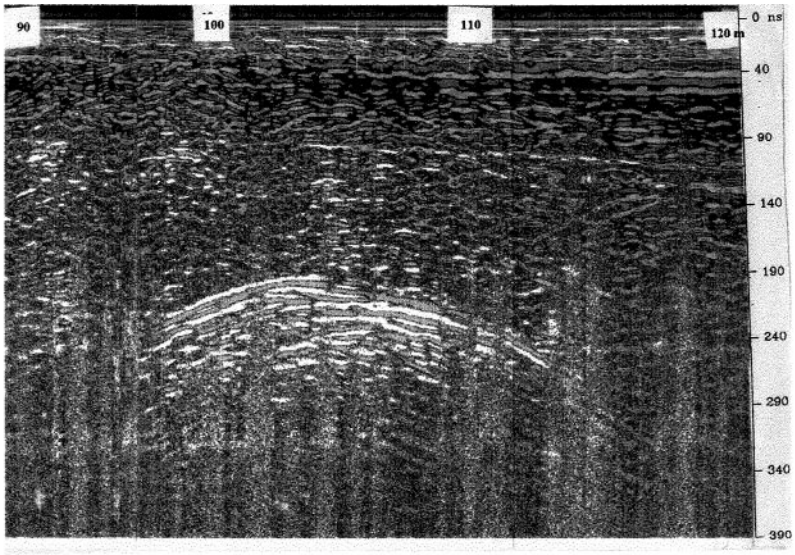
sorgente	densità (g/cm³)	quota del basamento s.l.m. (m)	quota del tetto s.l.m. (m)	topografia s.l.m. (m)
a	2.15	0.0	21.00	20.00
b	0.00	15.5	16.00	19.00
c	0.00	10.0	11.00	21.00
d	0.00	11.0	13.00	21.00
e	0.00	10.0	14.00	21.00
f	2.62	0.0	24.50	23.50
g	1.65	13.0	23.00	24.50
h	2.37	0.0	22.00	24.00
i	2.20	0.0	24.00	24.50
l	2.62	0.0	24.50	24.50
m	2.65	0.0	25.00	25.00
n	2.25	0.0	24.00	26.00
o	2.05	0.0	24.00	26.50
p	2.10	0.0	20.00	25.00
q	2.15	0.0	23.00	23.50
r	2.10	0.0	22.00	23.00
s	2.35	0.0	22.00	23.50
t	2.00	0.0	22.00	23.50



(b)

Fig. 1. Porto Badisco (LE) rilievo microgravimetrico - profili 1-4 , (a) anomalie sperimentali (tratteggio) e calcolate (linea continua) utilizzando un modello di distribuzione di densità riportato in mappa (b); le caratteristiche geometriche e fisiche (dimensioni verticali, densità) sono riportate in Tabella (densità di riferimento: 2.45 g/cm³).

(a)



(b)

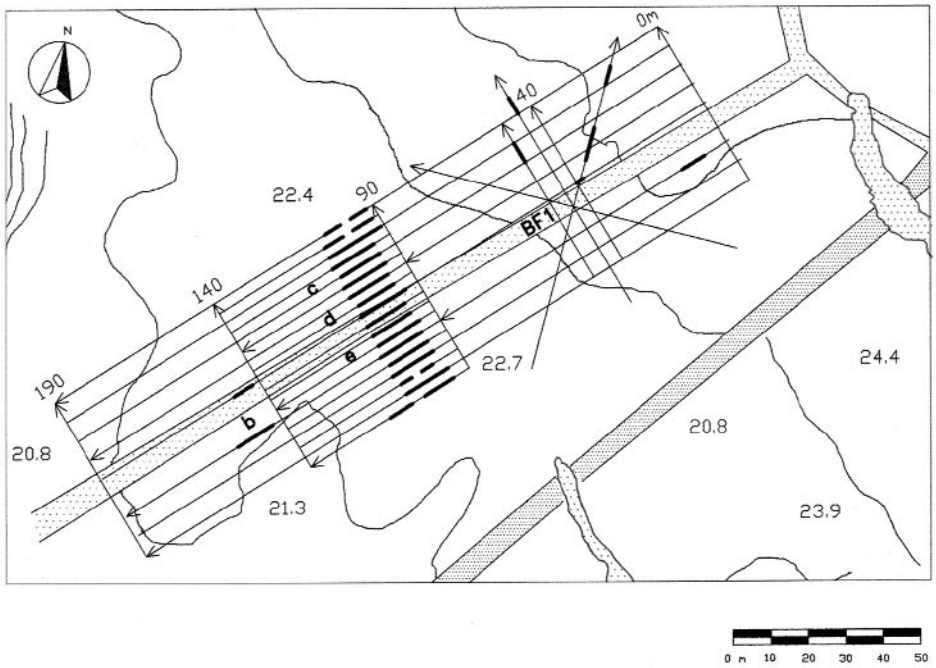


Fig. 2. Porto Badisco (LE): Rilievo GPR: (a) Anomalia molto intensa di forma iperbolica in corrispondenza di una probabile cavità sul profilo BF1. (b) Ubicazione in mappa dei profili GPR e delle anomalie a forma iperbolica; b, c, d, e anomalie graviemtriche.

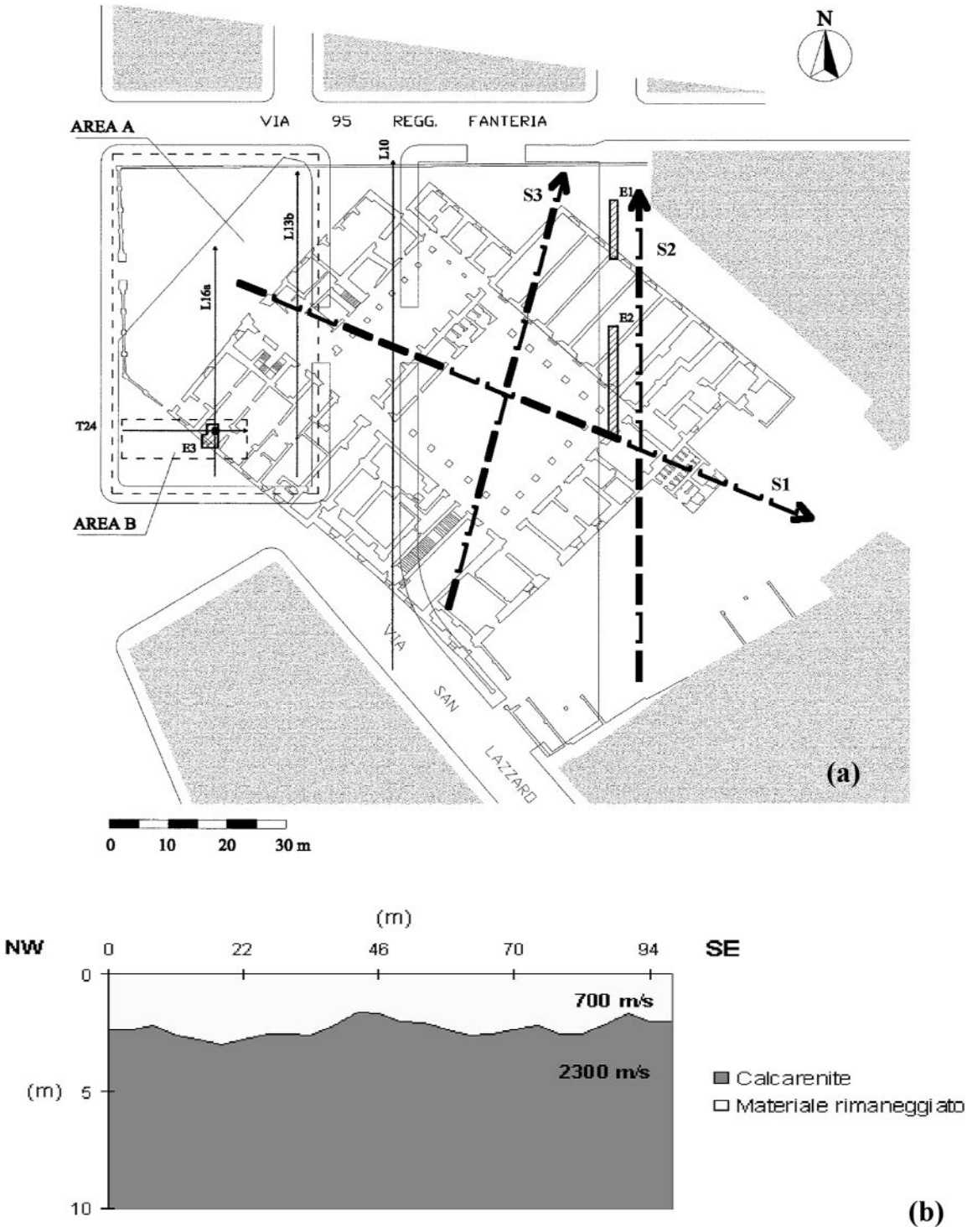


Fig. 3. Piazza Schipa, Lecce: (a) Mappa del sito e pianta della Caserma O. Massa, con ubicazione dei profili sismici (S1, S2 ed S3), di alcuni profili GPR e degli scavi archeologici (E1, E2, E3). (b) Modello di velocità sismiche relativo al profilo S1: lo spessore dello strato rimaneggiato è variabile tra 2 e 3 metri.

un fitto rilievo radar, che in alcune aree (A e B in Fig. 3a) raggiunge la densità di un profilo al metro, è stato effettuato con lo scopo di evidenziare eventuali resti di fondazioni relative ad un convento quattrocentesco successivamente modificato e riutilizzato come caserma militare, fino alla sua distruzione negli anni '70. Il debole contrasto di proprietà elettromagnetiche tra i resti archeologici ed il materiale di risulta adoperato per livellare il terreno ha impedito di mettere in evidenza in maniera chiara eventuali strutture murarie, che talvolta (come ad esempio nel caso del muretto EW dello scavo E3 in Fig 4) appaiono sulle sezioni radar con intensità addirittura più bassa delle zone circostanti. Il rilievo ha tuttavia consentito l'individuazione di una struttura ipogea con volta a botte, successivamente portata alla luce dallo scavo archeologico. Nelle sezioni riportate in Fig. 4 (antenna da 500MHz) sono evidenti le riflessioni generate dalla volta della struttura. L'analisi di forma del riflettore su profili acquisiti a diversa orientazione ha permesso di individuare la forma e le dimensioni geometriche della volta prima dello scavo, mentre la determinazione della velocità media di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo (0.06m/ns) ha consentito di stimarne la profondità (circa 65cm dal piano stradale). Le sezioni radar nei primi 20ns mostrano inoltre una serie di riflettori paralleli, talvolta interrotti da iperboli di diffrazione, indicati con la sigla PP, che lo scavo ha rivelato essere riconducibili a tubazioni o a grosse pietre irregolari rinvenute nei diversi strati di materiale di riempimento (Fig. 5a). Anche altre intense iperboli di diffrazione sono state interpretate, per il loro allineamento, come dovute a sottoservizi. L'uso di tecniche di visualizzazione 3D (Fig. 5b) – "time slices" , ottenute "affettando" il volume di dati opportunamente elaborati ad intervalli-temporali – e quindi intervalli di profondità – progressivamente crescenti (Fig. 5c), ha aiutato nella interpretazione delle anomalie rilevate e nell'ubicazione sia in mappa che in profondità delle strutture responsabili (Basile *et al.*, 1997; Basile *et al.*, 2000).

3.3 *Sito archeologico di Muro Leccese (LE)*

Muro Leccese, insieme a Vaste, Rudiae e Cavallino, costituisce uno dei principali centri Messapici del Salento Leccese. L'evidenza della parziale sovrapposizione del centro moderno sull'area dell'abitato antico e la minaccia dell'espansione edilizia hanno posto alle autorità comunali l'urgenza dell'individuazione delle aree da sottoporre a vincolo urbanistico ai fini della salvaguardia e valorizzazione del patrimonio archeologico sepolto. Nelle indagini archeologiche in un area alla periferia nord-orientale del paese, interno alle mura messapiche, il Dipartimento di Beni Culturali dell'Università del Salento aveva già rinvenuto parte di una strada, orientata est-ovest, e vari ambienti di abitazioni ad essa prospicienti. Contemporaneamente alle ricerche archeologiche, sono state effettuate una serie di indagini geofisiche (G.P.R., tomografia elettrica 2D e 3D, magnetometria, sismica a rifrazione) sia all'interno della zona all'epoca in corso di scavo, sia in un'area situata in direzione del prolungamento della strada già messa in luce (Fig. 6). Le prime hanno avuto

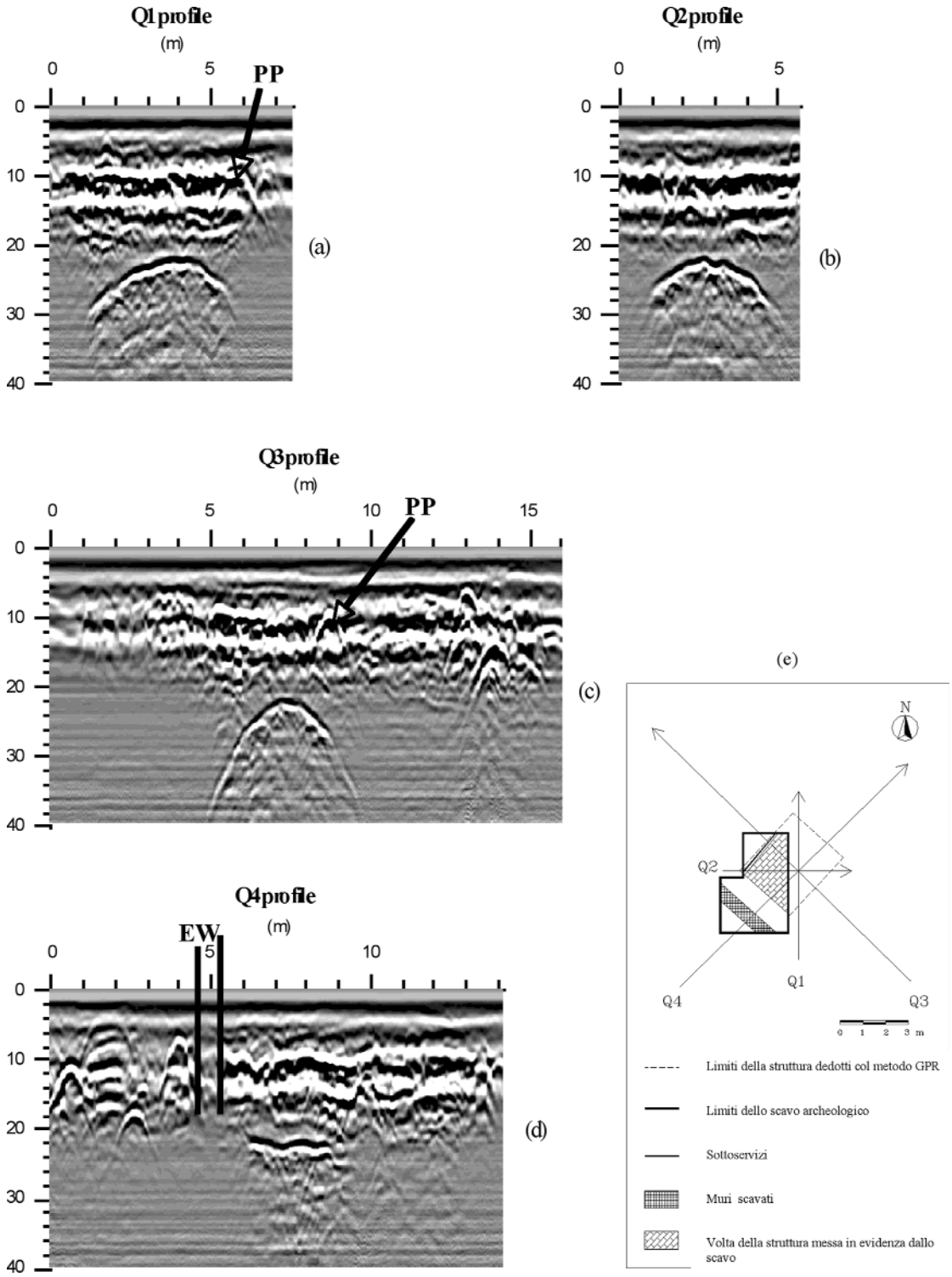


Fig. 4. Piazza Schipa, Lecce: esempi di diverse anomalie GPR prodotte dalla volta a botte di una struttura: profili acquisiti a 45° l'uno dall'altro con antenna da 500 MHz (a, b, c, d) e principali caratteristiche dello scavo E3 (e).

a colori

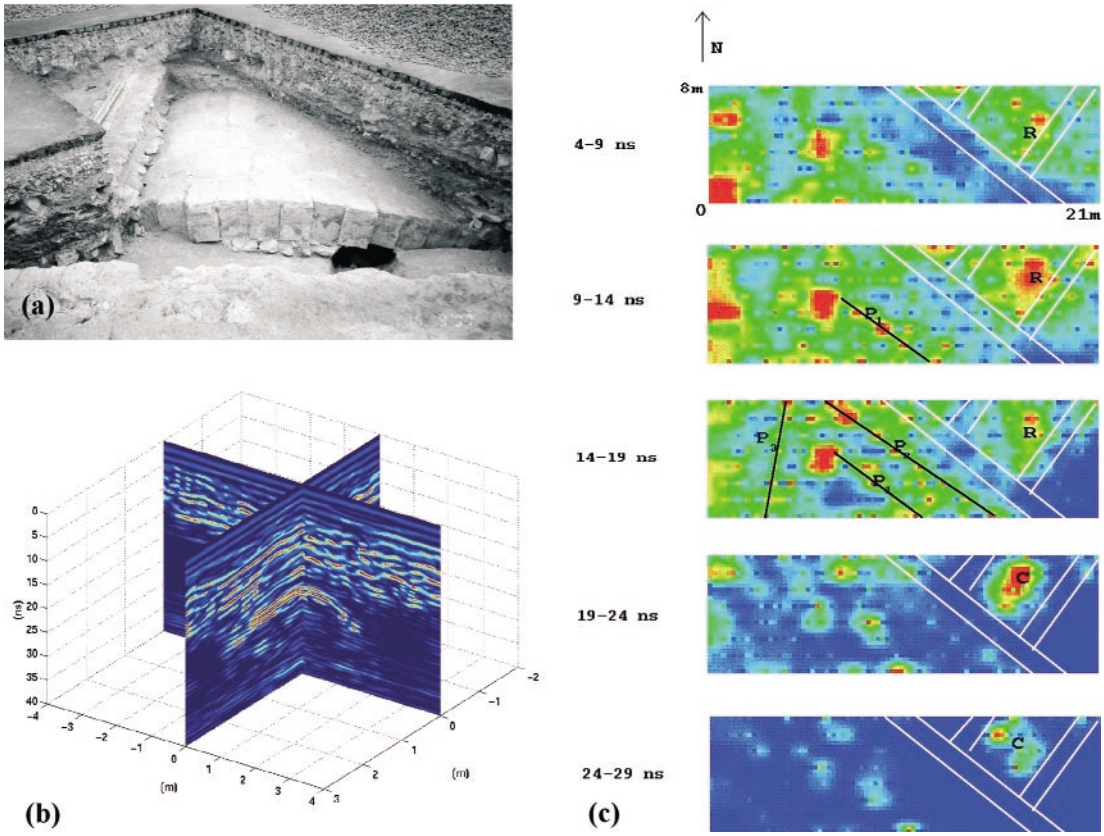


Fig. 5. Piazza Schipa, Lecce. (a) Scavo E3: muro, struttura con volta a botte, strati di riempimento, tubi per acqua. (b) Visualizzazione 3D dei profili Q3 e Q4; (c) Time slices prodotte dai profili acquisiti in direzione est-ovest nell'area B; ogni slice corrisponde a porzioni di terreno progressivamente più profonde con spessore di circa 15 cm. (R) riempimento in corrispondenza di una delle stanze della Caserma; il tetto ed i fianchi della volta a botte della cavità (C) tetto e fianchi della struttura con volta a botte; P1, P2, P3 sottoservizi.

principalmente lo scopo di verificare la validità dei metodi utilizzati ai fini dell'identificazione di resti murari e piani stradali, in considerazione sia del limitato contrasto tra i parametri fisici che li caratterizzano e quelli dei materiale inglobante che della presenza di fonti di disturbo tipici delle aree urbane (linee elettriche, oggetti metallici). In Fig. 7b è evidente un allineamento di energia elettromagnetica riflessa in prosecuzione di un muro portato alla luce dallo scavo nella zona adiacente. In Fig. 7c si intravedono deboli riflessioni in direzione del prolungamento della strada portata alla luce dallo scavo.

Le seconde, effettuate in un'area a quota più elevata della precedente (circa 1m), hanno fornito importanti informazioni sul contesto geologico superficiale e

a colori

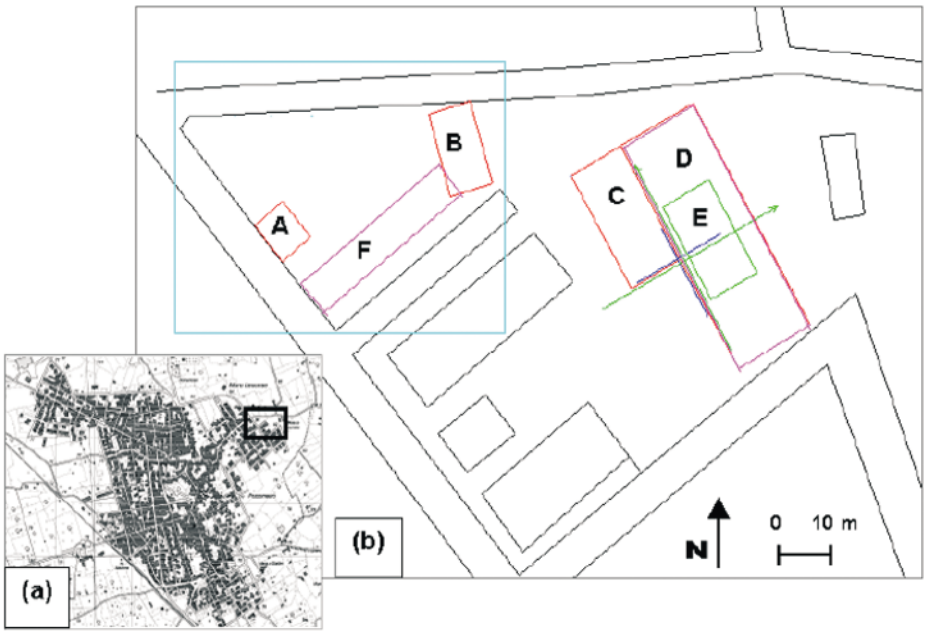


Fig. 6. Muro Leccese: (a) Ubicazione dell'area; (b) Ubicazione delle zone interessate dalle indagini geofisiche ed archeologiche: GPR (aree A, B, C, D); tomografia elettrica 3D (area E) e 2D (linee verdi); magnetometria (D ed F); sismica a rifrazione (linee blu).

sullo spessore di terreno agricolo (Fig. 8 e 9). Alcune intense anomalie GPR sono state interpretate come dovute a cause naturali (riflessioni/diffrazioni dal basamento e da possibili cavità all'interno del substrato roccioso fratturato e carsificato). Sembra invece avere interesse archeologico un'anomalia superficiale di forma approssimativamente ellittica (indicata con A) messa in evidenza dal GPR e confermata dalle indagini magnetometriche (gradiente verticale) e dalla tomografia elettrica 3D (Carrozzo *et al.*, 2002b). In corrispondenza di questa anomalia lo scavo archeologico successivamente effettuato ha messo in luce alcune tombe.

Il rilievo geofisico effettuato nel sito archeologico messapico di Muro Leccese ha permesso di:

– confermare l'utilità del GPR per evidenziare strutture superficiali sia di natura archeologica (muri) che naturale (pieghe e piani di stratificazione, piccole cavità all'interno del substrato roccioso fratturato e carsificato);
– evidenziare l'efficacia dei metodi elettrici tomografici, sia 2D che 3D, per comprendere meglio le caratteristiche geologico-stratigrafiche e la natura elettrica di anomalie di possibile rilevanza archeologica;
– sottolineare l'utilità dell'integrazione di vari metodi (elettrici, magnetici ed elettromagnetici), nonostante i noti problemi connessi con i vari disturbi tipici di un'area urbana;

a colori

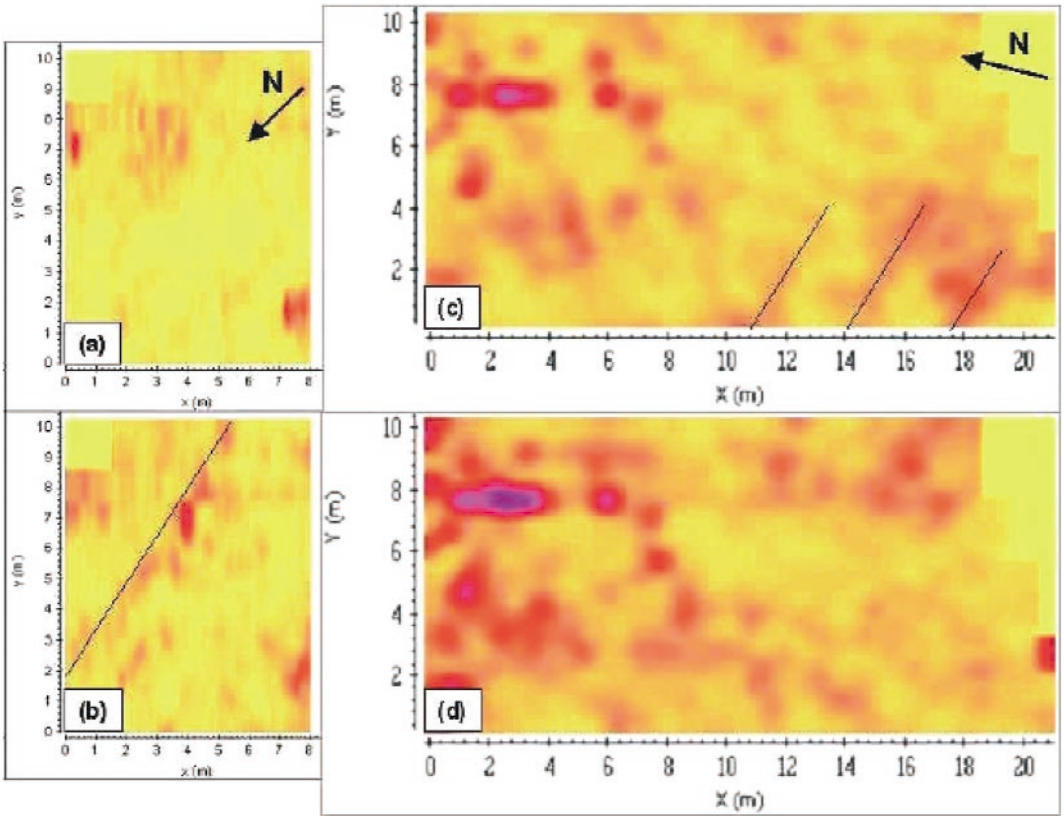


Fig. 7. Muro Leccese: Time slices all'interno della zona in corso di scavo: Area A: (a) time slice 5-15 ns (26-79 cm) e (b) 15-25 ns (79-132 cm); la linea indica una serie di anomalie lungo la prosecuzione di un muro portato alla luce dallo scavo nella zona adiacente. Area B: (c) time slice 5-15 ns (28-83 cm) e (d) 15-25 ns (83-138 cm); le linee indicano deboli anomalie in direzione del prolungamento della strada portata alla luce dallo scavo.

– rimarcare le difficoltà interpretative di alcune anomalie, come quella al centro dell'area D, che per la particolare forma potrebbero avere sia attribuzione antropica (fossa artificialmente tagliata nella roccia e successivamente riempita di terreno) che naturale (per fenomeni di dissoluzione carsica).

3.4 *Il sito Archeologico di Mesagne (BR)*

Il rilievo è stato eseguito nel centro storico del Comune di Mesagne (BR) allo scopo di indagare su una problematica di tipo archeologico legata alla presenza nell'area di numerosi resti di civiltà antiche (Leucci e Negri, 2006) (Fig. 10).

L'indagine geofisica è stata eseguita in due aree poste nelle immediate vicinanze di una necropoli dell'epoca messapica (Fig. 11).

a colori

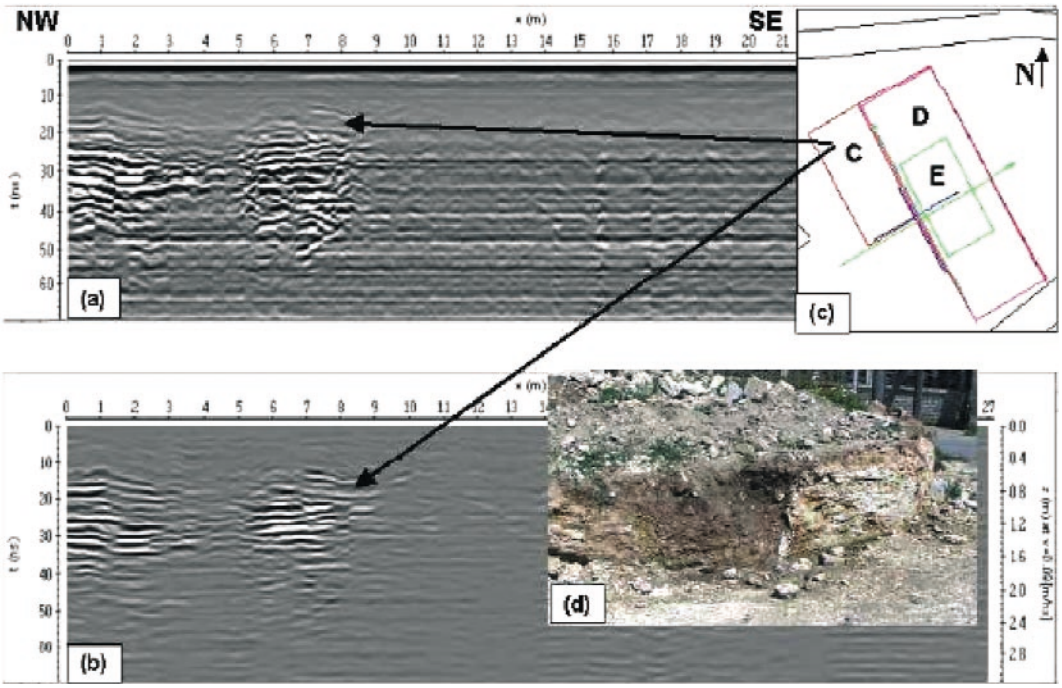


Fig. 8. Muro Leccese: Sezione GPR di campagna (a) ed elaborata (b) relative ad un profilo dell'area C (c). (d) Foto dell'affioramento in corrispondenza del taglio stradale tra l'area C e la zona in corso di scavo.

Il rilievo GPR, effettuato lungo profili paralleli con spaziatura di 0.5m (Fig. 11), ha permesso l'individuazione di lineamenti di interesse archeologico (muri, ipogei) (Fig. 12 e 13) messi successivamente in evidenza dallo scavo.

4. Conclusioni

La Geofisica Applicata può dare un valido contributo nella ricerca archeologica come dimostrato dagli esempi presentati. La caratterizzazione dei primi metri di sottosuolo per mezzo dei diversi parametri fisici peculiari di ogni metodo consente di rilevare eventuali strutture archeologiche sepolte e/o di trarre informazioni sui sedimenti inglobanti (stratigrafia, contenuto d'acqua). Lo sviluppo di specifiche tecniche di elaborazione e di visualizzazione dei dati di campagna può facilitare lo scambio di informazioni tra geofisici ed archeologi: in tal modo i risultati dell'indagine geofisica (indiretti) possono essere confrontati con i risultati dei saggi archeologici (diretti) per la necessaria taratura. Inoltre i risultati della Geofisica possono guidare nella scelta delle aree da scavare e/o integrare i risultati degli scavi archeologici fornendo insostituibili informazioni relativamente alle aree su cui non si intende effettuare lo scavo o per difficoltà logistiche o per l'eccessivo costo delle operazioni.

a colori

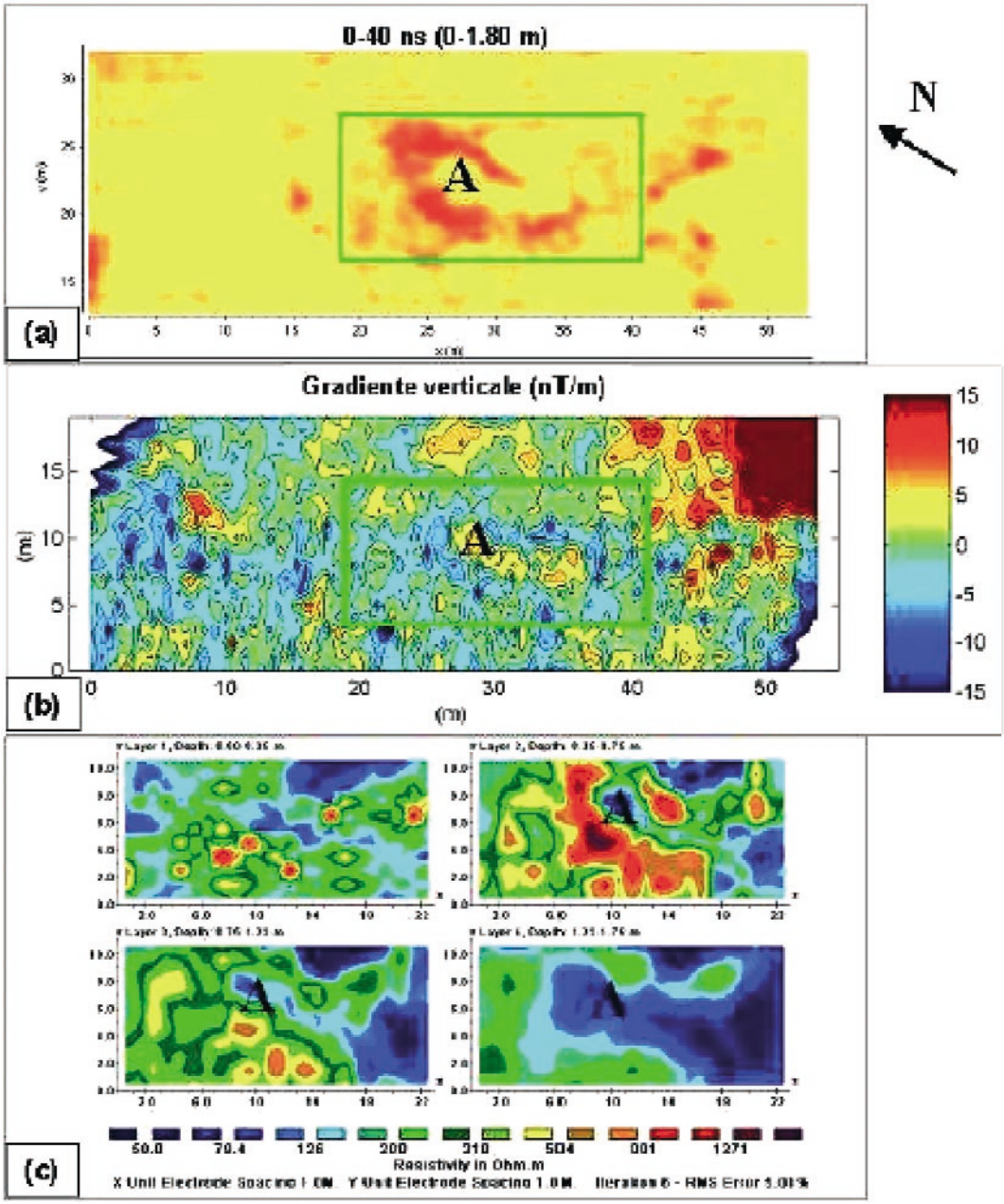


Fig. 9. Muro Leccese: GPR (a) e magnetico (b) nell'area D, tomografia elettrica 3D nell'area E (c).

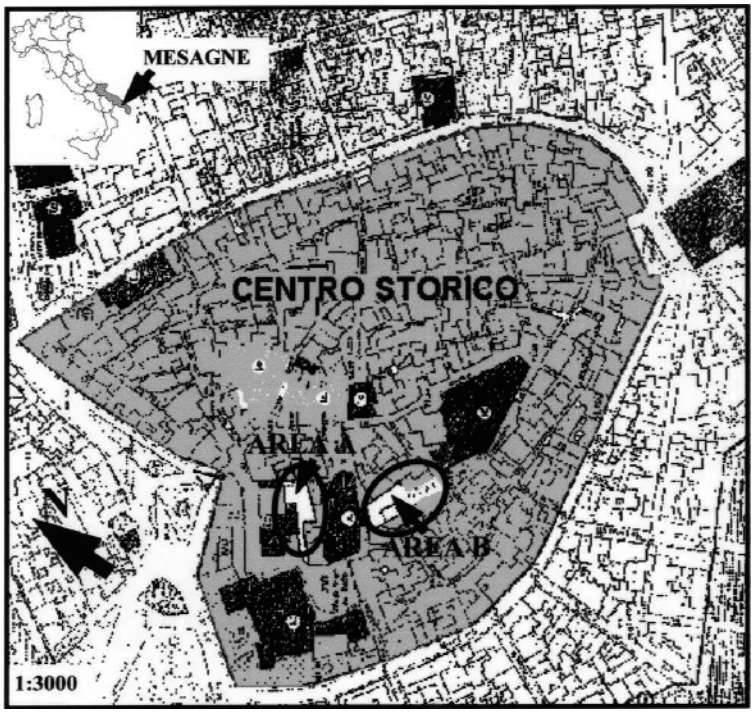


Fig. 10. Mesagne (BR) - Centro storico con ubicazione delle aree indagate.

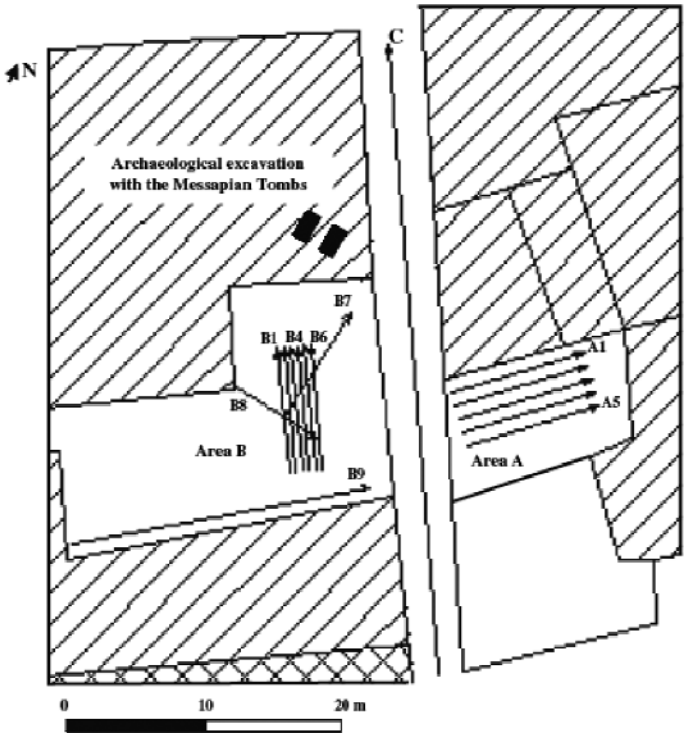


Fig. 11. Mesagne: Aree indagate con ubicazione dei profili GPR.

a colori

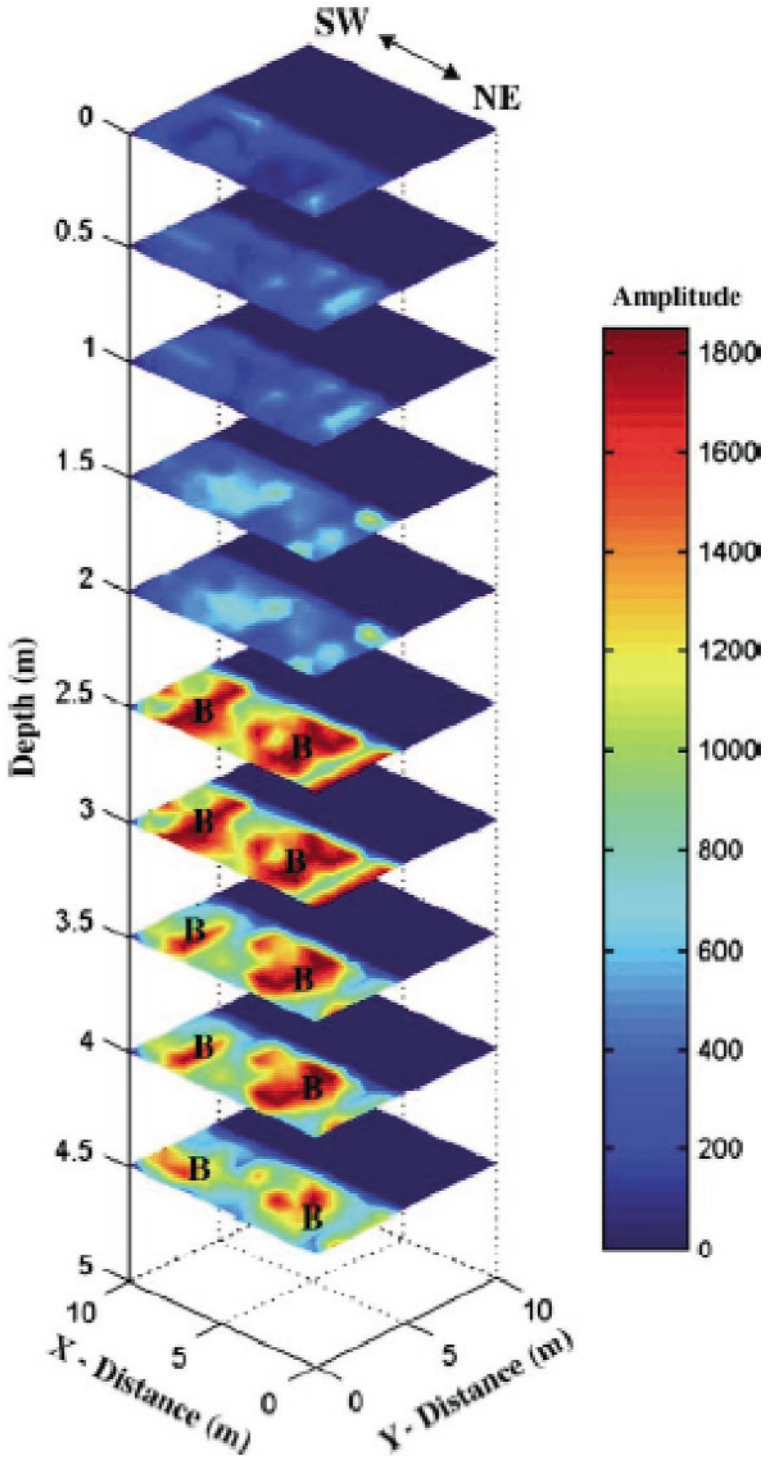


Fig. 12. Mesagne: Area A: Time slices - probabile presenza di un frantoio ipogeo indicato con B.

a colori

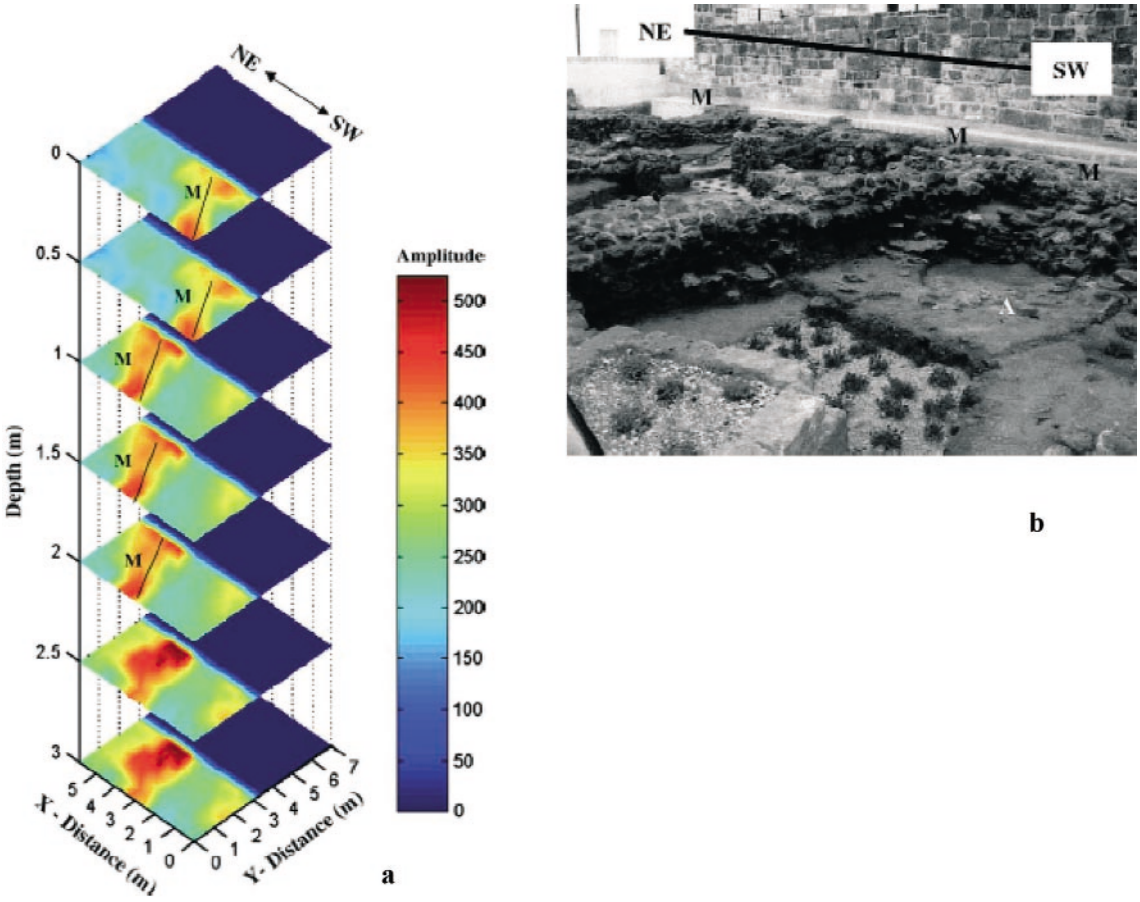


Fig. 13. Mesagne: Area B: a) Time slices - presenza di un muretto indicato con M. b) foto dello scavo eseguito dopo l'indagine geofisica.

BIBLIOGRAFIA

Basile V., Carrozzo M.T., Negri S., Nuzzo L., Quarta T., Villani A.V., 1997. *Indagini geofisiche preliminari in area urbana (Lecce)*, in "Atti del 16° Convegno Nazionale del GNGTS, (Roma, 11-13 novembre 1997)", CD-Rom, File 02.06.

Basile V., Carrozzo M.T., Negri S., Nuzzo L., Quarta T., Villani A.V., 2000. *A Ground Penetrating Radar Survey for Archaeological Investigations in an Urban Area (Lecce, Italy)*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 44, pp. 15-32.

Bruni S. (a cura di), 2000. *Le navi antiche di Pisa Ad un anno dall'inizio delle ricerche*, Edizioni Polistampa Firenze, pp. 383.

Carrozzo M.T., Arcuti S., Basile V., Margiotta C., Piro S., Negri S., Quarta T., Rosso F., 1999. *Metodi geofisici per lo studio del carsismo: indagini nella zona di Porto Badisco, Otranto (LE),* in "Il carsismo dell'area mediterranea 1° Incontro di studi (Castro Marina 1-2 settembre 1997)", Thalassia Salentina, n. 23, supplemento, pp.2 1-34.

Carrozzo M.T., Leucci G., Negri S., Nuzzo L., 2002a. *Gpr Survey to understand the stratigraphy at the Roman Ships Archaeological Site (Pisa, Italy)*, Accettato per la pubblicazione sulla rivista : Archaeological Prospection.

Carrozzo M.T., Leucci G., Negri S., Nuzzo L., 2002b. *Applicazione di metodi elettrici, magnetici ed elettromagnetici per prospezioni archeologiche in area urbana: il caso di Muro Leccese (Lecce)*, GNGTS – Atti del 21° Convegno Nazionale / 09.02 CD-Rom

Leucci G., Negri S., 2006. *Use of ground penetrating radar to map subsurface archaeological features in an urban area*, Journal of Archaeological Science 33, 502-512.