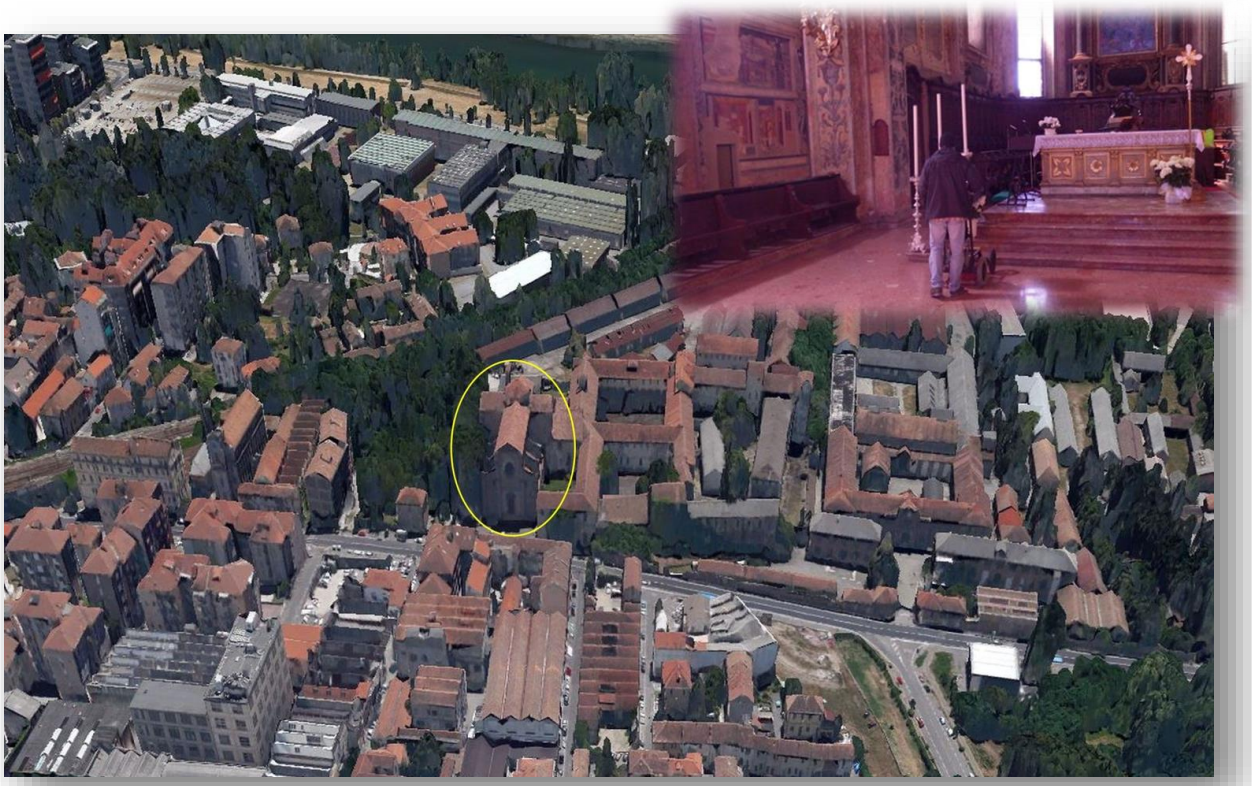
ASSOCIAZIONE L'ITALIA FENICE onlus

Comitato Pavia Città di Sant'Agostino

Progetto: Pavia – I Monasteri Imperiali

Chiesa di San Salvatore

Rilievi radarstratigrafici



Ottobre 2017

SGQ certificato secondo la Norma UNI EN ISO 9001:2008

GEOINVEST s.r.l.
Geologia-Geofisica
Via della Conciliazione n. 45/A
29122 Piacenza – Tel. 0523.593622

Sommario

1 PREMESSA 3
2 RILIEVI RADARSTRATIGRAFICI 6
2.1 Elaborazione 2D del rilievo radar: sezioni verticali / orizzontali 9
2.2 Elaborazione 3D del rilievo radar 15
2.3 Rilievi sulla controfacciata 27
3 COMMENTO DEI RISULTATI 28

1 PREMESSA

A seguito dell'incarico con nota del 23/02/2017 dell'Associazione l'Italia Fenice – onlus (AIF), sono stati effettuati degli specifici rilievi radarstratigrafici per indagini archeologiche all'interno della Chiesa di San Salvatore in Pavia (Fig. 1), in corrispondenza del sagrato e in alcuni settori limitrofi come definito in Fig. 2.

Il presente rapporto riassume le attività svolte e la sintesi conclusiva dei rilievi. Le indagini sono state programmate e coordinate dai Proff. Maria Teresa Mazzilli e Saverio Lomartire.

Sono parte integrata del rapporto gli elaborati inseriti nello specifico supporto informatico (CD):

- rapporto tecnico (nome file: *R3640_PV_Pavia_SSalvatore_Radar_00A_Master.pdf*);
- planimetria di riferimento del rilievo – settori: chiesa, sagrato e aree limitrofe (nome file: *Planimetria_Riferimento_SchemaSettoriIndagati_Scala200.pdf* e *Planimetria_Riferimento_RilievoRadar_Scala200.pdf*)
- profili radarstratigrafici (nome cartella*: A_Profili_radarstratigrafici*)
- sezioni orizzontali (piano XY) ottenute con operatore Laplaciano e con Scarto Quadratico Medio (SQM) scala1:200 (nome cartella: *B_Sezioni_orizzontali_Laplaciano_SQM*)
- elaborazione 3D (nome cartella: *C_Elaborazione_3D*):
  - Visualizzazione volumetrica di sintesi (PDF dinamico con funzionalità 3D);
  - Visualizzazione sul piano XY degli isovolumi a varie quote (PDF statico).

Fig. 1 - Vista aera della Chiesa San Salvatore estratta Google Earth

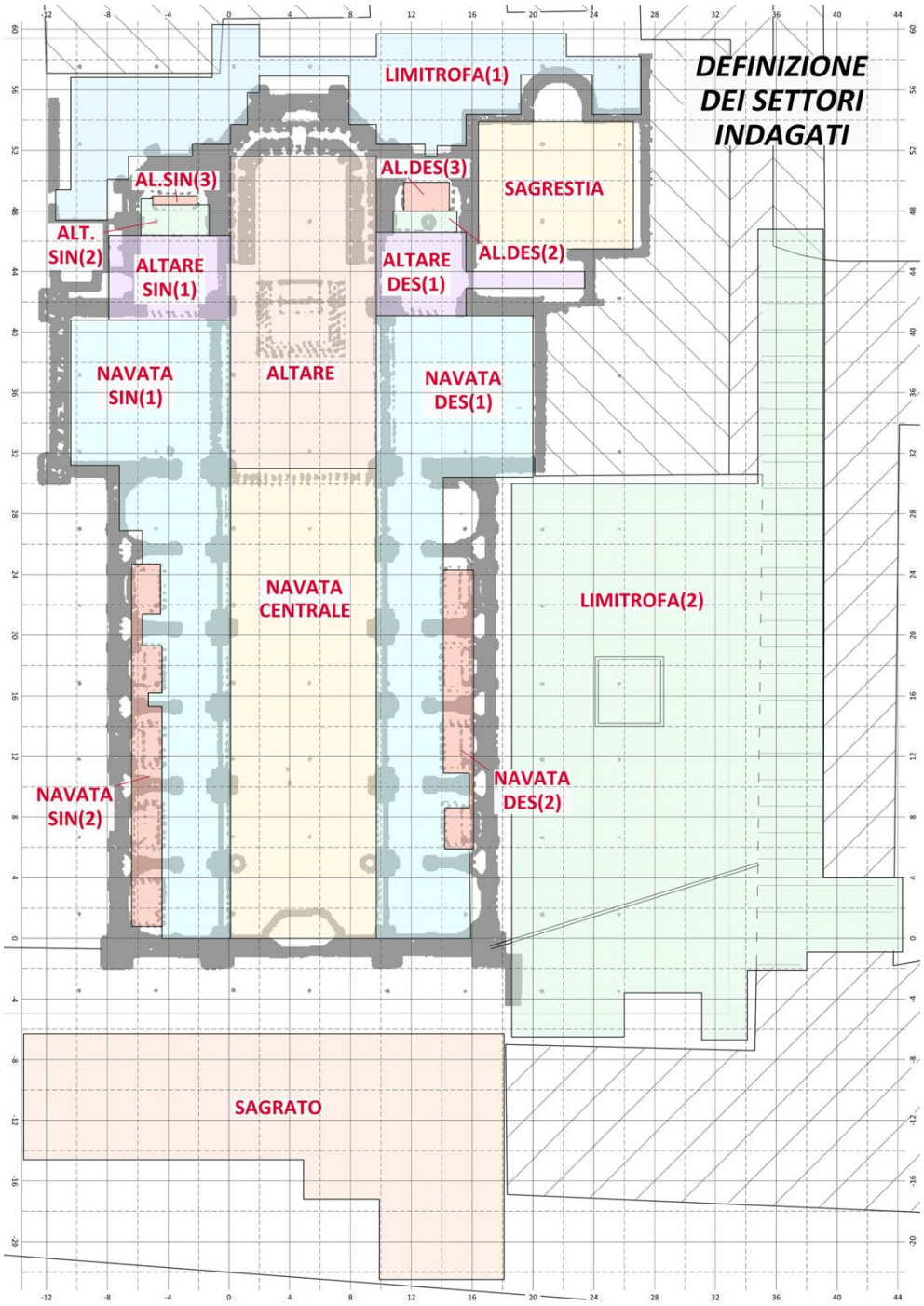


Fig. 2
Schema settori analizzati con il rilievo radar

L'elaborazione dei dati radarstratigrafici è stata sviluppata secondo lo schema rappresentato in Fig. 2; la suddivisone in settori è motivata da aspetti logistici e/o quote della pavimentazione differente.

Nella tabella seguente per ogni settore viene riportato il piano di riferimento e la quota relativa.

Locazione	Settore	Piano riferimento
Interno Chiesa	Navata Centrale	Piano Pavimento Navata centrale
	Navate sinistra e destra (1)	Piano Pavimento Navata centrale (+0.15m)
	Navate sinistra e destra (2)	Piano Pavimento Navata centrale (+0.45m)
	Altare centrale	Piano Pavimento Navata centrale (+0.60m)
	Altari sinistro e destro (1)	Piano Pavimento Navata centrale (+0.30m)
	Altari sinistro e destro (2)	Piano Pavimento Navata centrale (+0.45m)
	Altari sinistro e destro (3)	Piano Pavimento Navata centrale (+0.60m)
	Sagrestia	Piano Pavimento Navata centrale (+0.30m)
Esterno Chiesa	Sagrato	Piano Campagna locale
	Aree limitrofe	

2 RILIEVI RADARSTRATIGRAFICI

La metodologia GPR (Ground Probing Radar), consente, attraverso l'utilizzo di onde elettromagnetiche, la definizione delle caratteristiche interne al mezzo indagato.

In particolare è possibile identificare superfici di separazione tra livelli dotati di differente resistività e costante dielettrica.

Tali parametri sono legati a fattori fisici, quali il grado di compattazione, la posizione e le caratteristiche di eventuali manufatti sepolti, la presenza di zone umide o non cementate.

Un impulso elettromagnetico della durata di pochi nanosecondi, inviato nel mezzo tramite un'antenna trasmittente, è riflesso in parte dalle interfacce tra livelli in contrasto elettromagnetico e in parte trasmesso nei livelli sottostanti (Fig. 3).

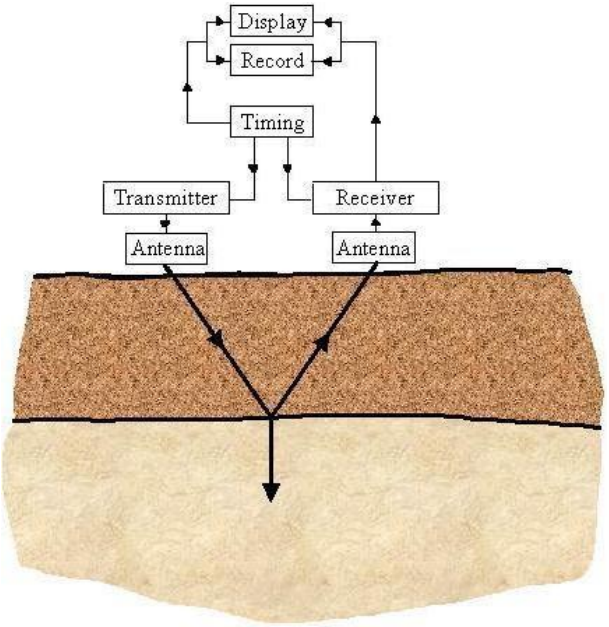


Fig. 3 - Schema di funzionamento del Georadar

I segnali riflessi sono ricevuti in superficie tramite un'antenna ricevente; quest'ultima può essere la stessa utilizzata per la trasmissione (configurazione monostatica, utilizzata nell'indagine in oggetto), o separata da questa di una certa distanza (configurazione bistatica).

La scelta della configurazione, in funzione degli scopi della ricerca, è basata sulla profondità massima d'indagine e sul livello di dettaglio richiesto.

Questi a loro volta contribuiscono alla scelta della frequenza: a una bassa frequenza corrisponde un'elevata penetrazione del segnale in profondità, ma con uno scarso dettaglio delle anomalie riscontrabili (risoluzione bassa); al contrario, ad alte frequenze corrispondono elevati livelli risolutivi con però scarsa penetrazione del segnale.

La frequenza di trasmissione è determinata dalle caratteristiche costruttive dell'antenna stessa e può variare da 14 MHz a oltre 2,5 GHz (in questo studio è stata utilizzata un'antenna da 400 MHz).

I profili sono stati acquisiti secondo direzione longitudinale e trasversale rispetto alla navata centrale della chiesa, lungo reticoli a distanze regolari di 1x1metro, per le aree esterne il reticolo di acquisizione è stato di 2x2metri, consentendo la ricostruzione dell'andamento dei livelli dotati di differenti caratteristiche elettromagnetiche tramite sezioni verticali radarstratigrafiche.

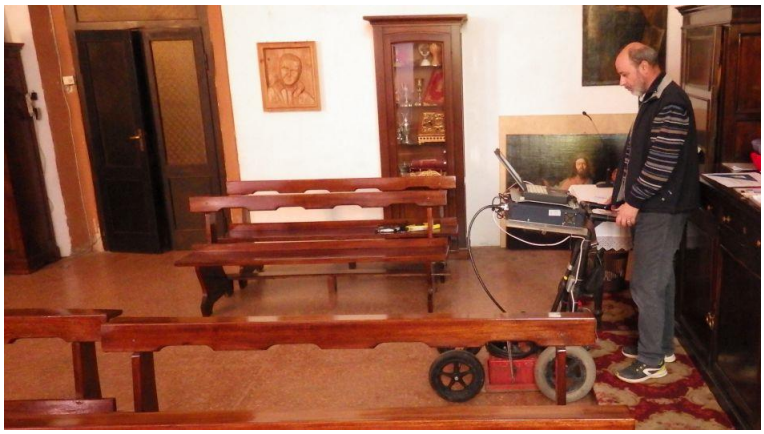


Fig. 4 Esecuzione profilo radar con antenna 400 MHz, a sinistra area interna della chiesa, a destra in sagrestia.

Fig. 5 - Esecuzione profilo radar con antenna 400 MHz nell'aree esterne della chiesa, in alto nel sagrato della chiesa, a destra in aree limitrofe

Fig. 6 - Apparecchiatura montata e pronta per l'uso

Per l'indagine è stato utilizzato il radar SIR 20 di North Salem U.S.A. (GSSI, Geophysical Survey System Inc.), raffigurato in Fig. 6, costituito da:

- unità centrale di controllo
- PC portatile
- antenna ricetrasmittente monostatiche
- un carrello porta strumenti dotato di contametri.

Nell'unità centrale di controllo è generato il segnale inviato alla sezione trasmittente dell'antenna ed è elaborato il segnale ricevuto dalla sezione ricevente dell'antenna stessa (Fig. 3).

Il PC portatile consente tutte le operazioni di calibrazione del sistema e l'impostazione dei parametri di acquisizione, quali: tempo di registrazione, guadagno e tipi di filtro da applicare ai segnali elettromagnetici.

Lo stesso PC consente inoltre la visualizzazione del profilo durante l'acquisizione, permettendo una prima rapida valutazione della qualità dei segnali registrati già durante le operazioni di campo.

All'unità centrale di controllo, tramite un cavo multipolare, è collegata l'antenna (collocata nella parte bassa del carrello, e appoggiata sulla superficie da indagare) che ha il compito di trasmettere i segnali elettromagnetici all'interno del sottosuolo e di riceverne le eventuali riflessioni dovute alle interfacce elettromagnetiche presenti alle diverse profondità d'indagine.

Nel caso dell'indagine in oggetto, è stata utilizzata un'antenna con frequenza centrala di 400 MHz e un tempo di registrazione rispettivamente di 50 nanosecondi; le profondità medie raggiunte sono state di circa 2.5 /3.0 metri.

2.1 Elaborazione 2D del rilievo radar: sezioni verticali / orizzontali

Durante la registrazione dei dati radarstratigrafici, mediante la taratura dell'antenna eseguita prima dell'inizio di ogni registrazione si opera una prima pulizia del dato acquisto. Già in campagna, in linea generale, osservando le sezioni tempi acquisite è possibile visualizzare ed individuare la presenza di eventuali zone anomale (presunte cavità, strutture interrate o zone umide o non cementate, ecc.).

Nell'elaborazione delle sezioni verticali 2D i dati di campagna grezzi sono interpolati con programmi di "gridding" a celle di dimensioni di 0.015x0.004m e graficizzati come sezioni tempi mediante palette di colori costruite ad hoc con lo scopo di evidenziare le strutture anomale, anche quelle non visibili ad una prima osservazione.

L'elaborazione dei profili, acquisiti lungo reticoli a distanze variabili, consente la ricostruzione dell'andamento dei livelli dotati di differenti caratteristiche elettromagnetiche, fornendo come output sezioni verticali radarstratigrafiche ricampionate.

La migrazione dalla sezione tempi (*il campionamento delle registrazioni radar è effettuato nel dominio temporale*) a quella in profondità (h) si ottiene utilizzando la seguente formula:

$$h = \frac{ct_r}{2\sqrt{\varepsilon_r}}$$

dove:

- c velocità della luce nel vuoto ($3x10^8$ m/s),
- ε_r costante dielettrica relativa, dipendente dalla litologia.
- t tempo intercorso tra l'emissione e la ricezione dell'impulso.

Nella fase di migrazione viene effettuato un ulteriore filtraggio dei dati registrati che permette di eliminare / attenuare il rumore di fondo, permettendo in questo modo di far risaltare le eventuali zone anomale. I dati sono graficizzati con delle sezioni in profondità (Fig. 7), la cui ubicazione è riportata nella planimetria di riferimento.

Le sezioni profondità sono rappresentative dei valori di contrasto delle proprietà elettromagnetiche in termini di distanza (metri) e di profondità (metri dal rispettivo Piano di Riferimento).

In Fig. 7 a titolo esemplificativo si riportano alcune sezioni di profondità allegate nel CD), ove sono evidenziate le potenziali strutture anomale. Le riflessioni generate a partire dalla superficie e indicate dalle frecce non sono da considerarsi di interesse archeologico in quanto prodotte dal passaggio dell'antenna sui profili metallici presenti nel pavimento della navata centrale.

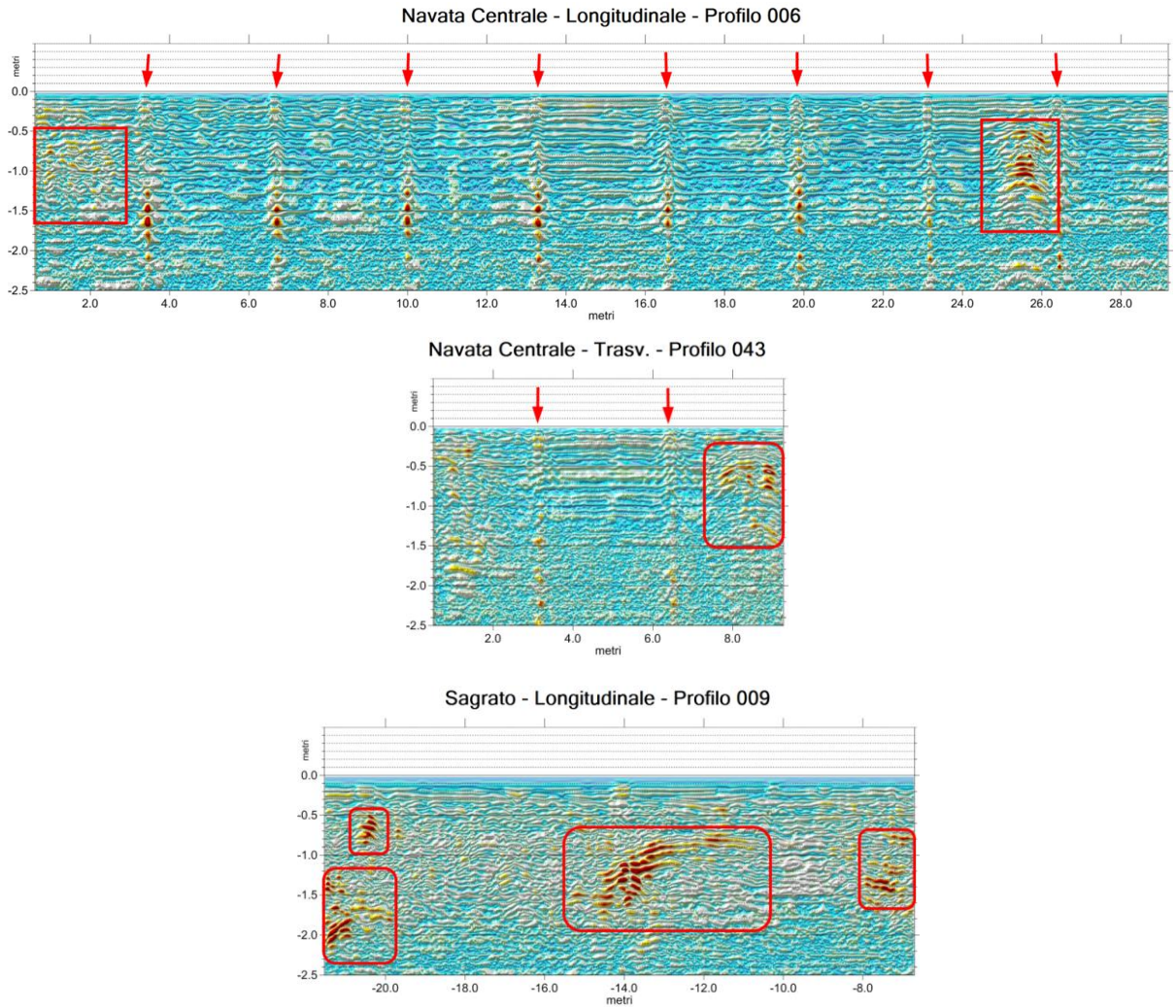


Fig. 7 – Esempi di sezioni radarstratigrafiche in profondità con evidenziati in rosso le anomalie

Sulla base delle litologie presenti ad ogni nanosecondo corrisponde circa un spessore di 0.6 cm.

Tutte le elaborazioni, applicando la trasformazione sopra indicata, sono state trattate in termini di profondità come metri dal Piano di Riferimento secondo la tabella riportata in Premessa.

Lo sviluppo areale dei profili radar registrati è mostrato in Fig. 8.

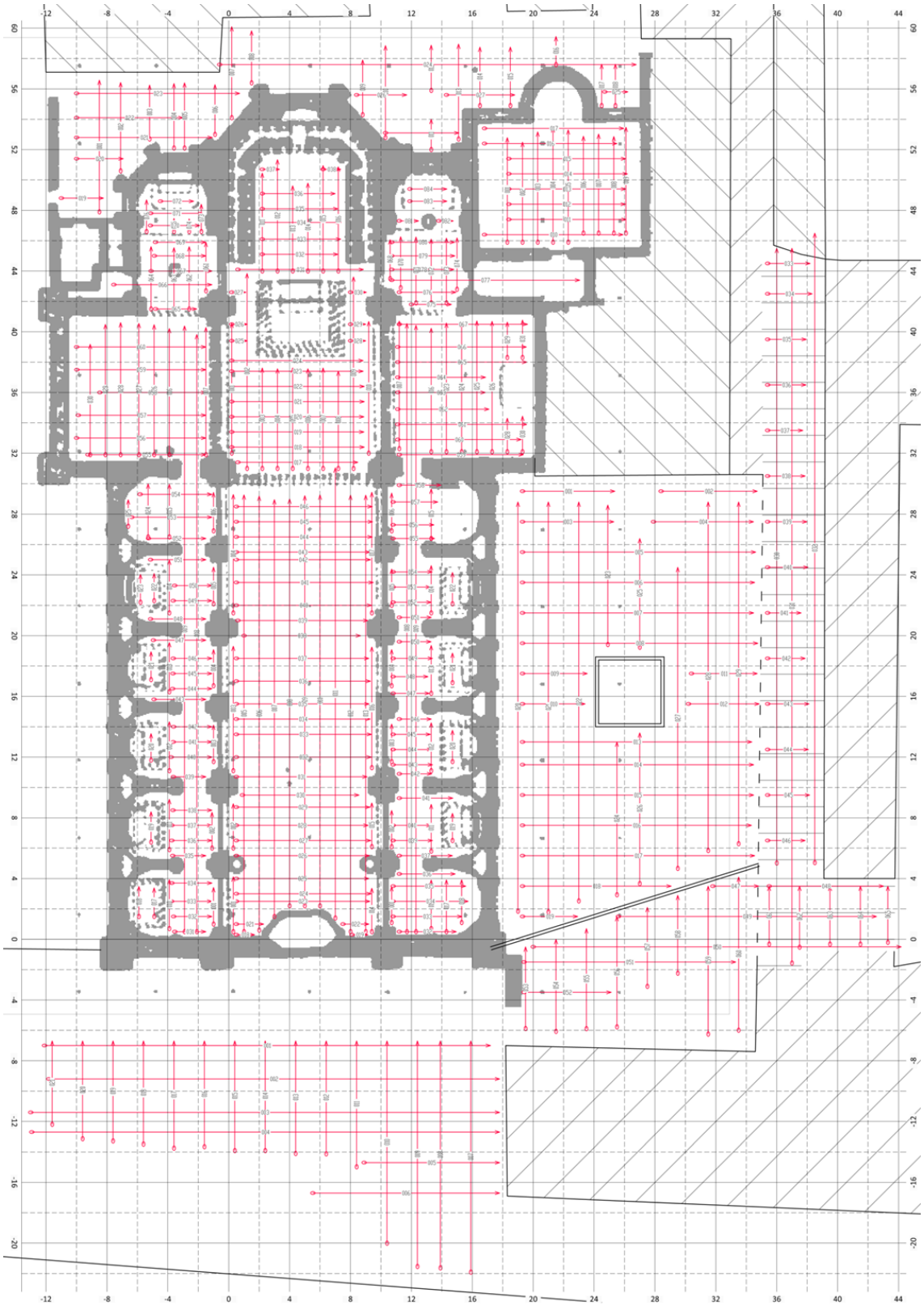


Fig. 8 Profili radar realizzati – visione d'insieme

Le rappresentazioni areali (elaborazione 2D sul piano XY) sono state ottenute calcolando il valore medio del contrasto delle proprietà elettromagnetiche in orizzonti ricavati dalle sezioni verticali migrate in profondità, alle seguenti quote:

+0.30, 0.00, -0.30, -0.60, -0.90, -1.20, -1.50, -1.80, -2.10 e **-2.40**
(in m rispetto al piano di riferimento)

Il numero di campionamenti verticali utilizzati per l'estrazione del valore medio è stato di +7/-7 rispetto alla quota considerata, pari ad uno spessore di circa 8.5 cm.

Il nuovo "SET di dati" ottenuto è stato quindi elaborato con il programma di geostatistica "SURFER 14" della Golden Software con il metodo di interpolazione Kriging al fine di ottenere un "grid" a celle regolari di 0.1x0.1metri.

L'approccio elaborativo sopra descritto è stato applicato in maniera disgiunta ai profili radar longitudinali e trasversali, utilizzando come filtro per la composizione dei dati di ingresso la direzione degli stessi, ottenendo così "grid" specifici per i profili longitudinali e per i trasversali.

Per avere una visione d'insieme delle anomalie e allo stesso tempo ridurre l'interferenza del rumore di fondo, ad ogni singolo "grid" è stato applicato l'**Operatore Laplaciano** usandolo come "filtro omogeneizzante", ottenendo così dei "grid puliti" sommabili tra loro (longitudinali e trasversali) per ottenere un unico "grid" rappresentativo del settore indagato (Fig. 9).

Il valore medio ottenuto non sempre rappresenta statisticamente la migliore sintesi di un insieme di valori. Al fine di minimizzare la perdita di informazioni dovute al "valor medio" si è proceduto a calcolare un indice di variabilità mediante lo **Scarto Quadratico Medio** (SQM), sempre quantificato a partire dalle misure di contrasto delle proprietà elettromagnetiche negli orizzonti precedentemente definiti.

Come per la precedente elaborazione, anche in questo caso sono stati calcolati nuovi "DATA SET" sul piano XY, suddivisi per quota e in base alla direzione dei profili (longitudinali e trasversali). Di nuovo, sono stati interpolati in un "grid" a celle regolari con maglia 0.1x0.1m e quindi sommati (trasversali e longitudinali per ogni quota esaminata) al fine di ottenere "grid" rappresentativi delle diverse quote del settore analizzato (Fig. 10).

I PDF degli elaborati sono salvati nel CD nel seguente percorso:
B_Sezioni_orizzontali_Laplaciano_SQM

Fig. 9 Operatore Laplaciano

Quota di riferimento -0.90m

esempio di output grafico ottenuto

Fig. 10 Indice di variabilità SQM

Quota di riferimento -0.90m

esempio di output grafico ottenuto

2.2 Elaborazione 3D del rilievo radar

Mediante il pacchetto software Earth Volumetric Studio della C Tech si è provveduto ricostruire un volume di valori Laplaciani e SQM nello spazio XYZ, dove Z rappresenta la quota in metri rispetto al piano di riferimento. I volumi "Laplace" e "SQM" sono stati ottenuti utilizzando l'algoritmo Kriging con il quale l'insieme delle sezioni orizzontali alle diverse quote considerate (paragrafo 2.1) sono state interpolate in un unico "Grid 3D".

Nelle rappresentazioni 3D di seguito allegate e/o inserite nel CD, i volumi Laplace (colore beige pieno) e SQM (colore marroncino trasparente) sono stati "fusi" insieme. Gli output 3D prodotti sono stati suddivisi in base al piano di riferimento, per cui l'area interna ed esterna della Chiesa e la Cripta si sviluppano secondo distinte rappresentazioni.

Nel CD allegato sono presenti due tipi di visualizzazioni volumetriche, fornite attraverso il formato PDF di Adobe:

1. **Visualizzazione 3D di sintesi**
   Sono dei PDF 3D dinamici con i quali nella visualizzazione è possibile utilizzare tutti gli strumenti 3D che Adobe Acrobat dispone.
   Si riporta di seguito (Fig. 11, Fig. 12) la schermata iniziale dei tre file PDF presenti nel CD.

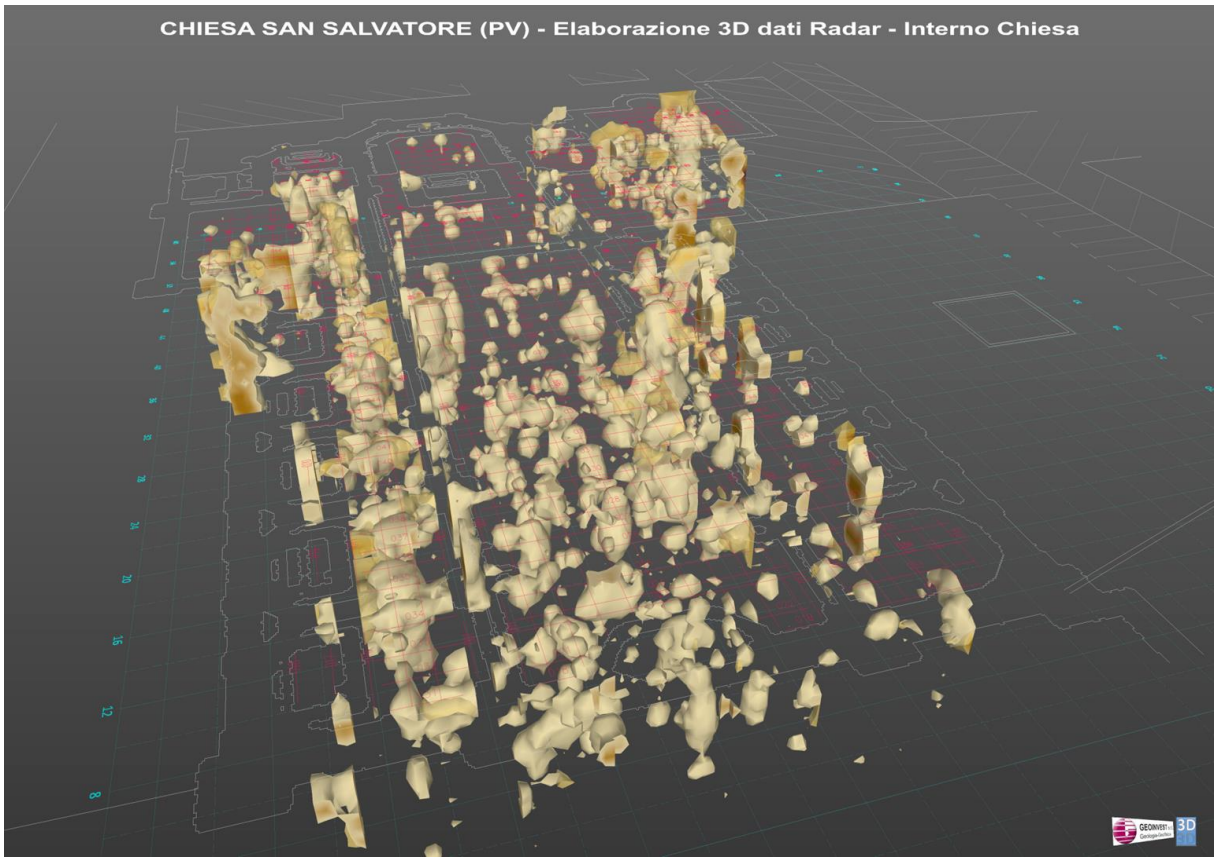


Fig. 11 – Visualizzazione 3D di sintesi – settore interno della Chiesa

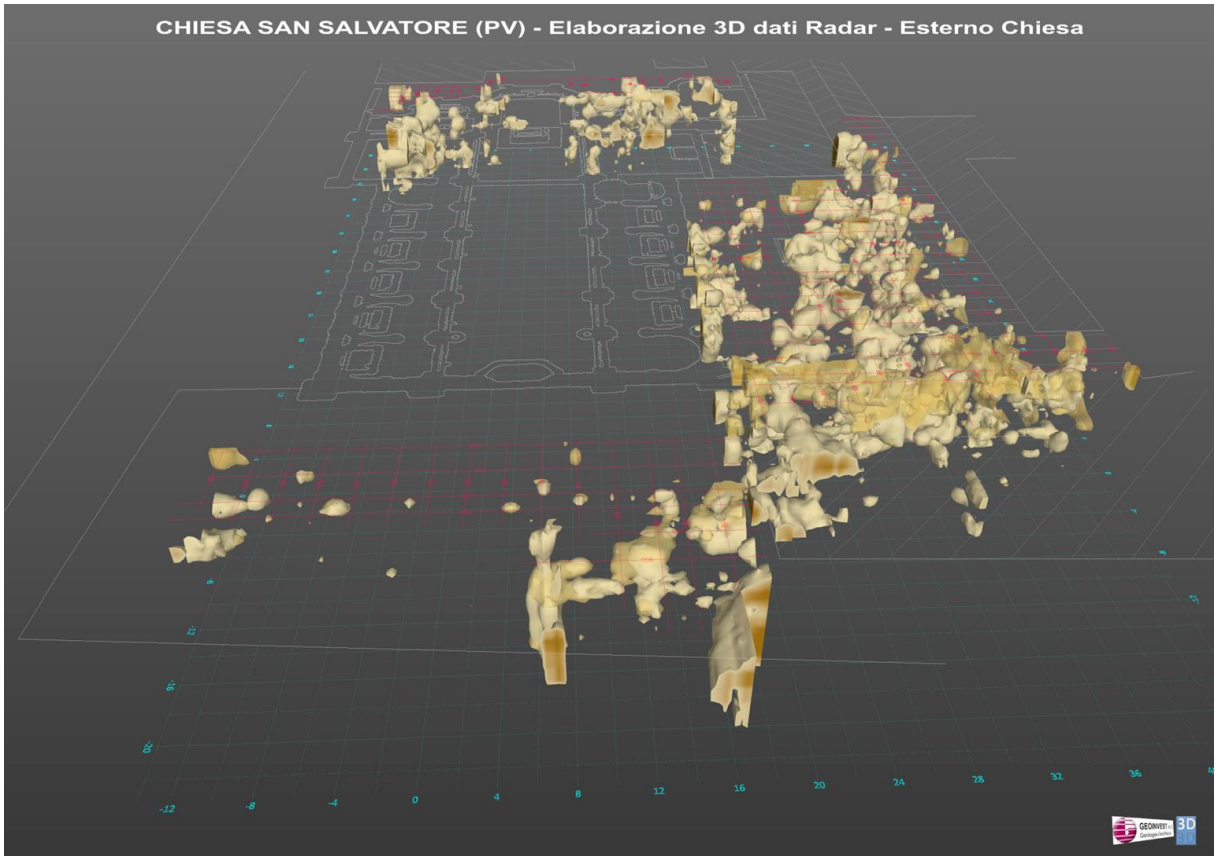


Fig. 12 - Visualizzazione 3D di sintesi – settore esterno della Chiesa

2. Visualizzazione 3D su piani XY

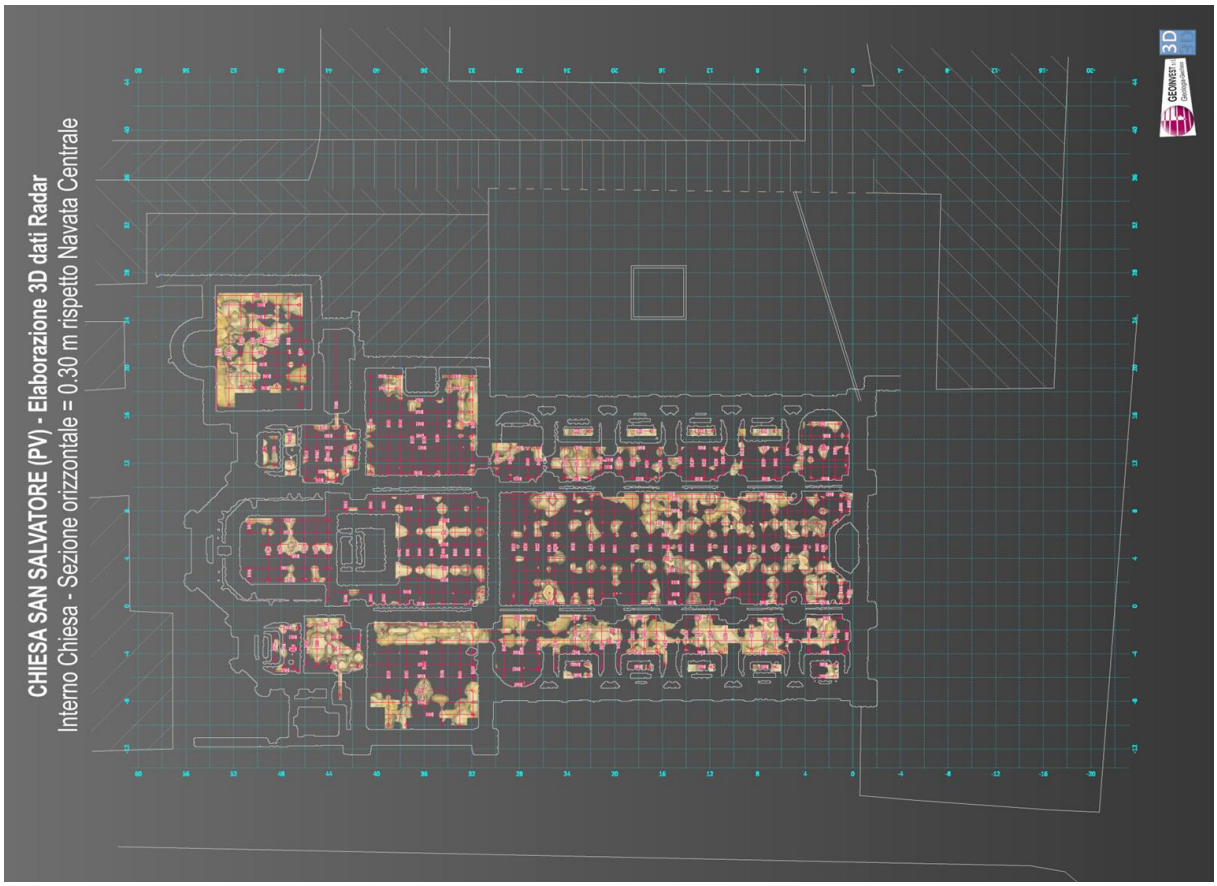
Sono dei PDF statici e rappresentano gli isovolumi Laplaciano e SQM a tagli regolari ogni 0.30 m a partire dal piano più elevato sino a quello più profondo.

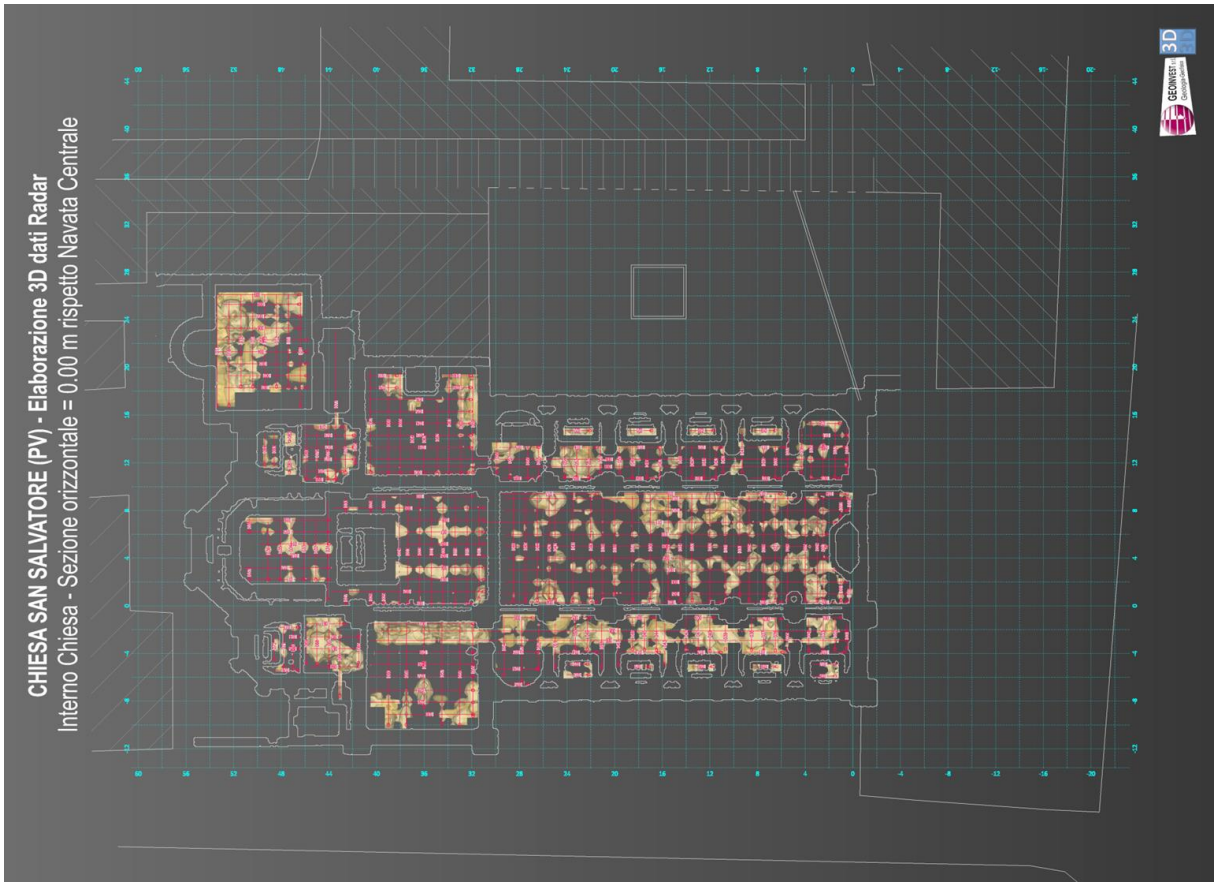
Le serie di PDF prodotti sono suddivisi per settori omogenei in base alla comune quota di riferimento.

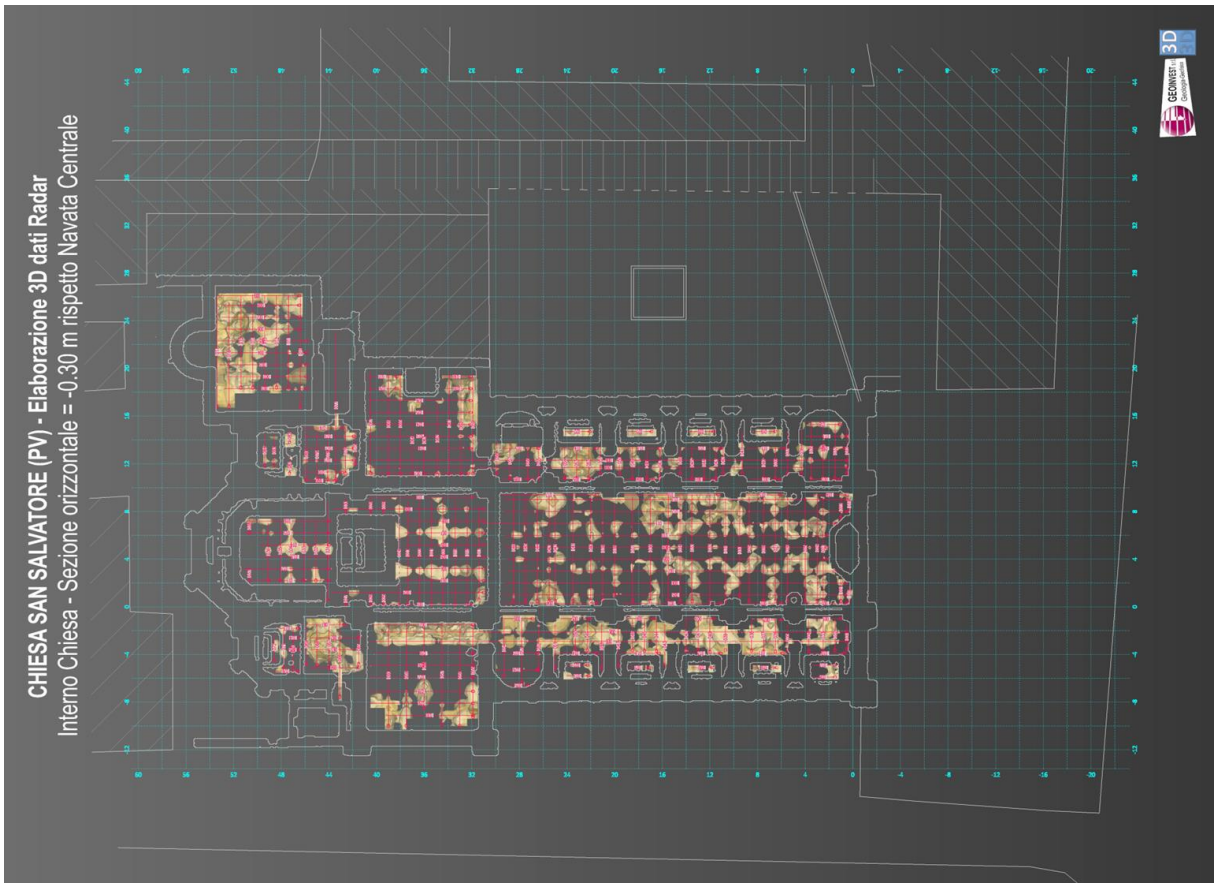
Di seguito si riportano tutte le immagini generate secondo i piani XY considerati, cioè

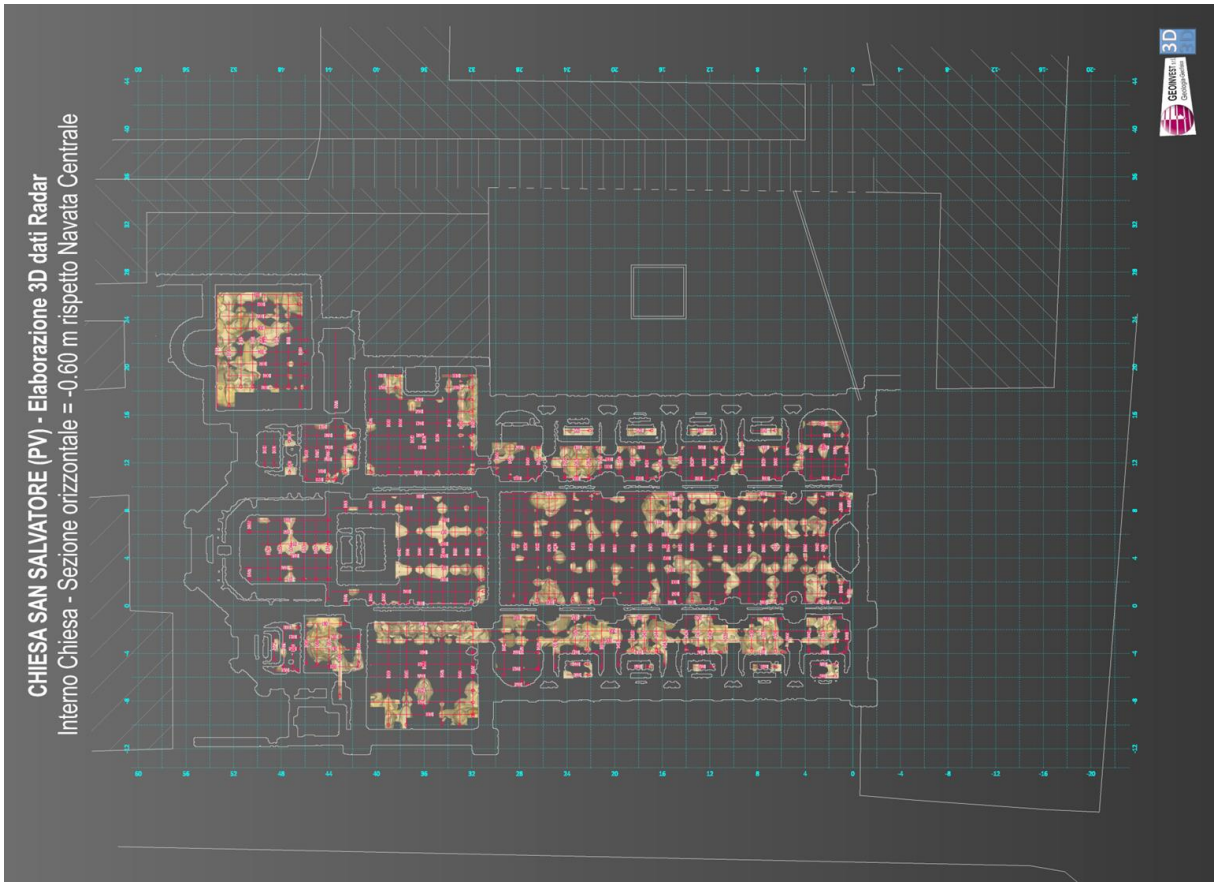
0.00, **-0.30**, **-0.60**, **-0.90**, **-1.20**, **-1.50**, **-1.80**, **-2.10** e **-2.40**
(in m rispetto al piano di riferimento)

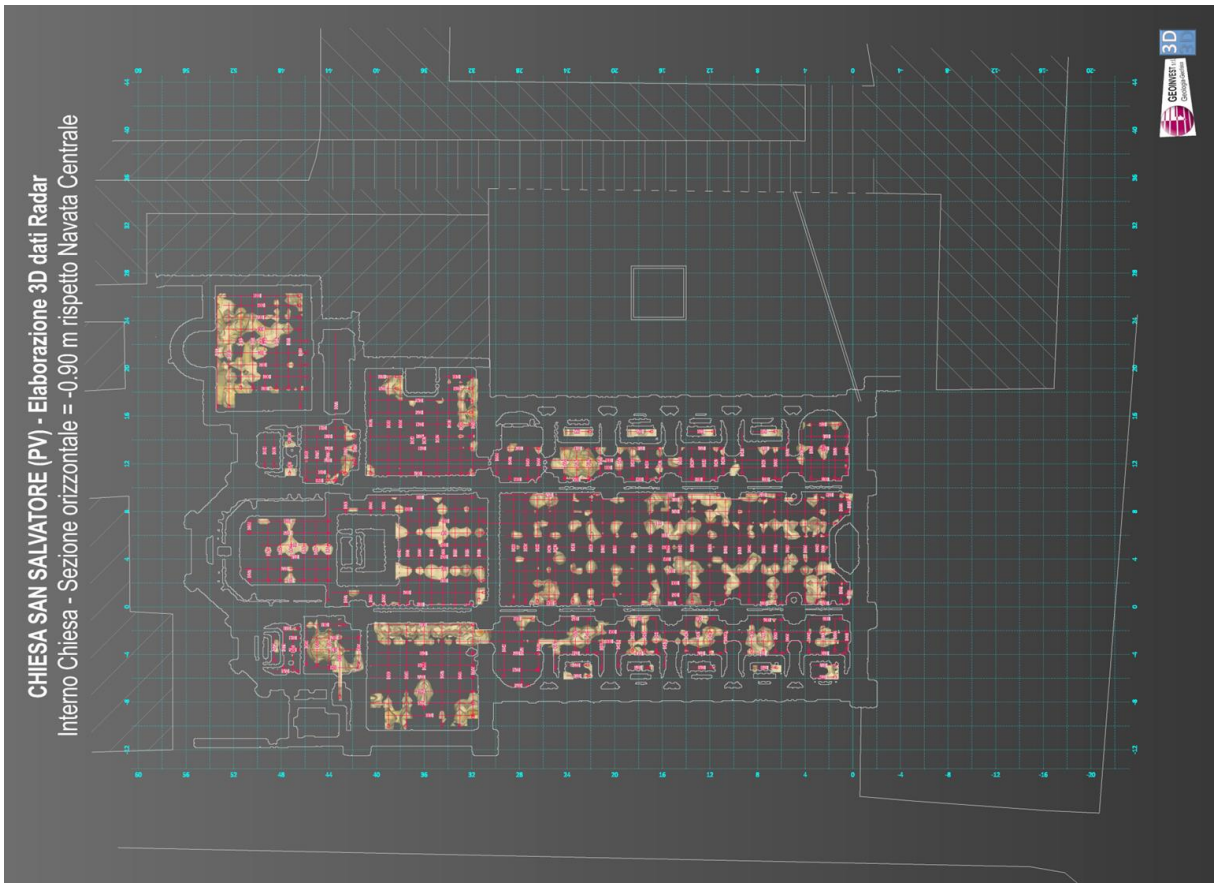
Serie Area Interna Chiesa

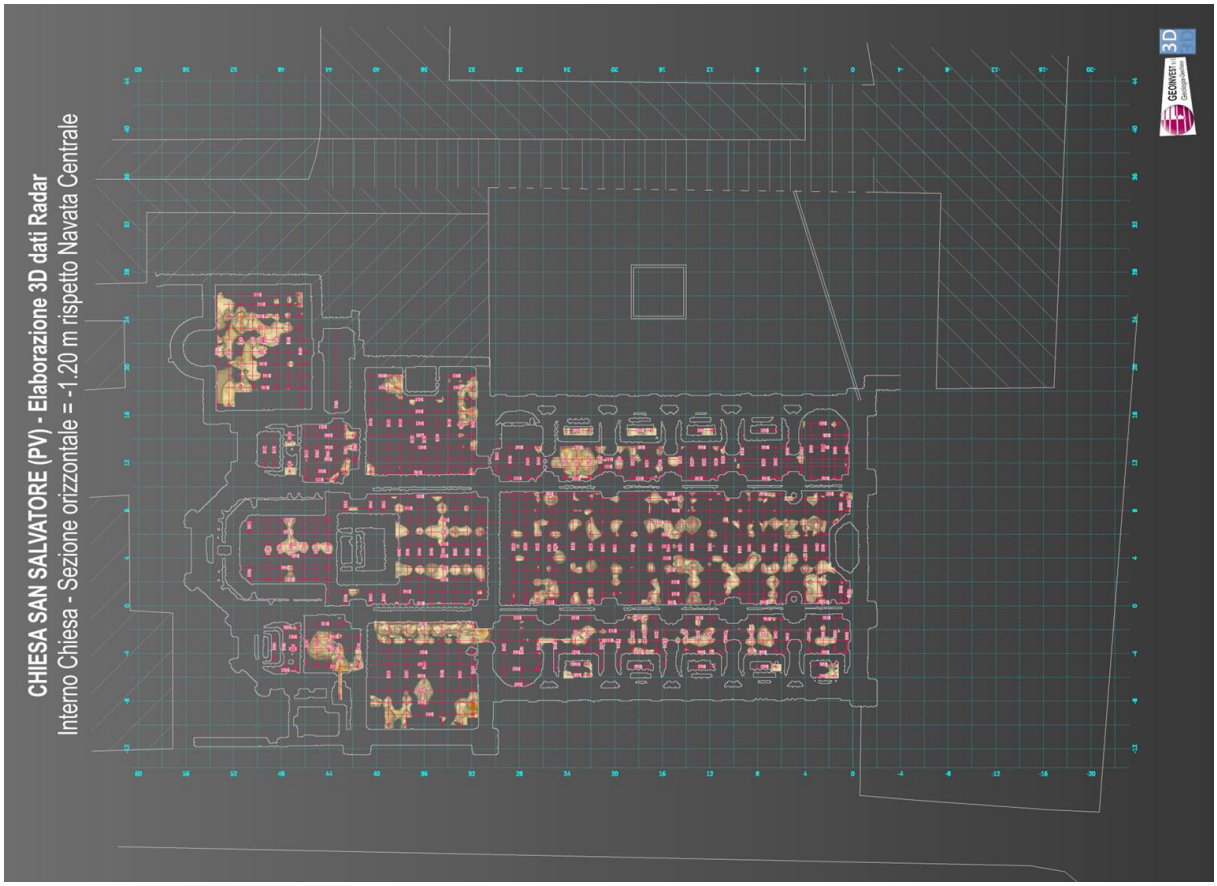


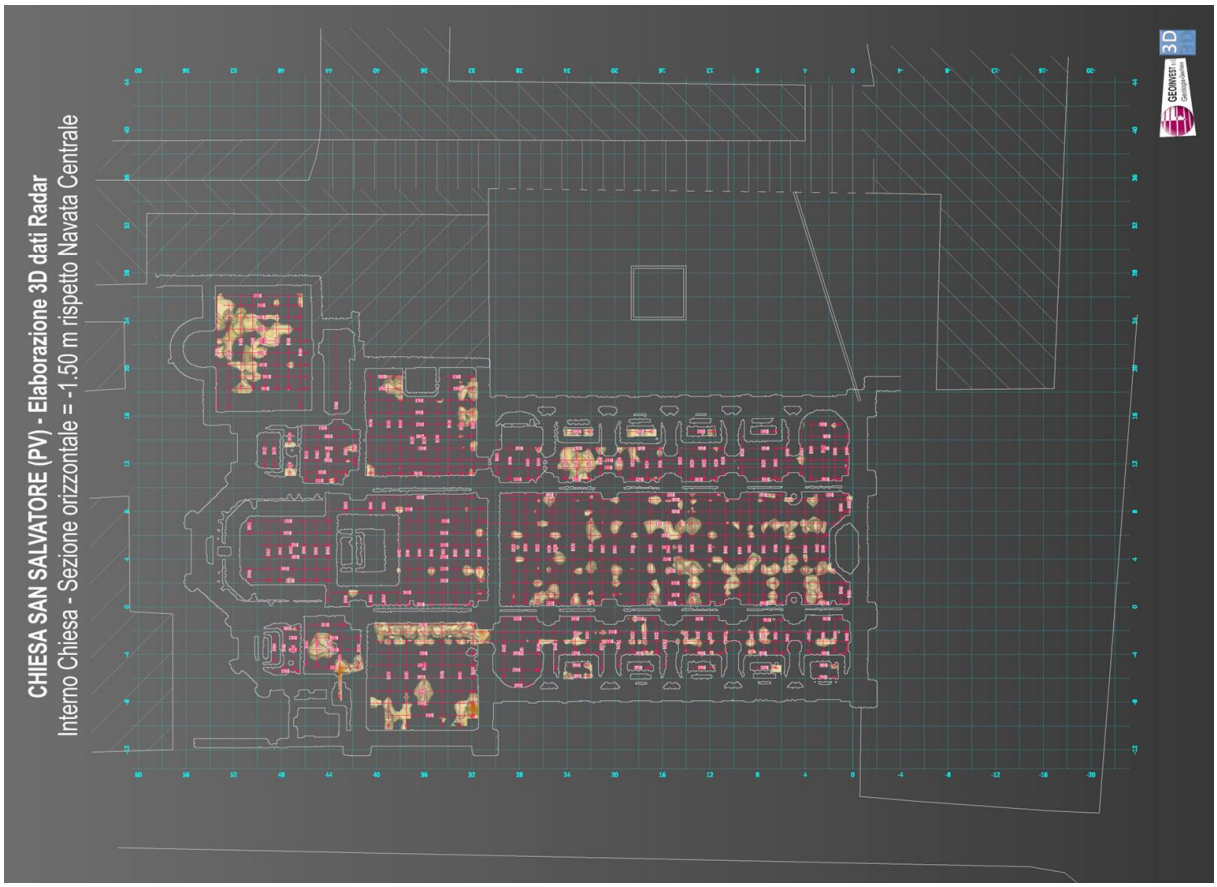

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Interno Chiesa - Sezione orizzontale = 0.00 m rispetto Navata Centrale
3D
GEOINVEST

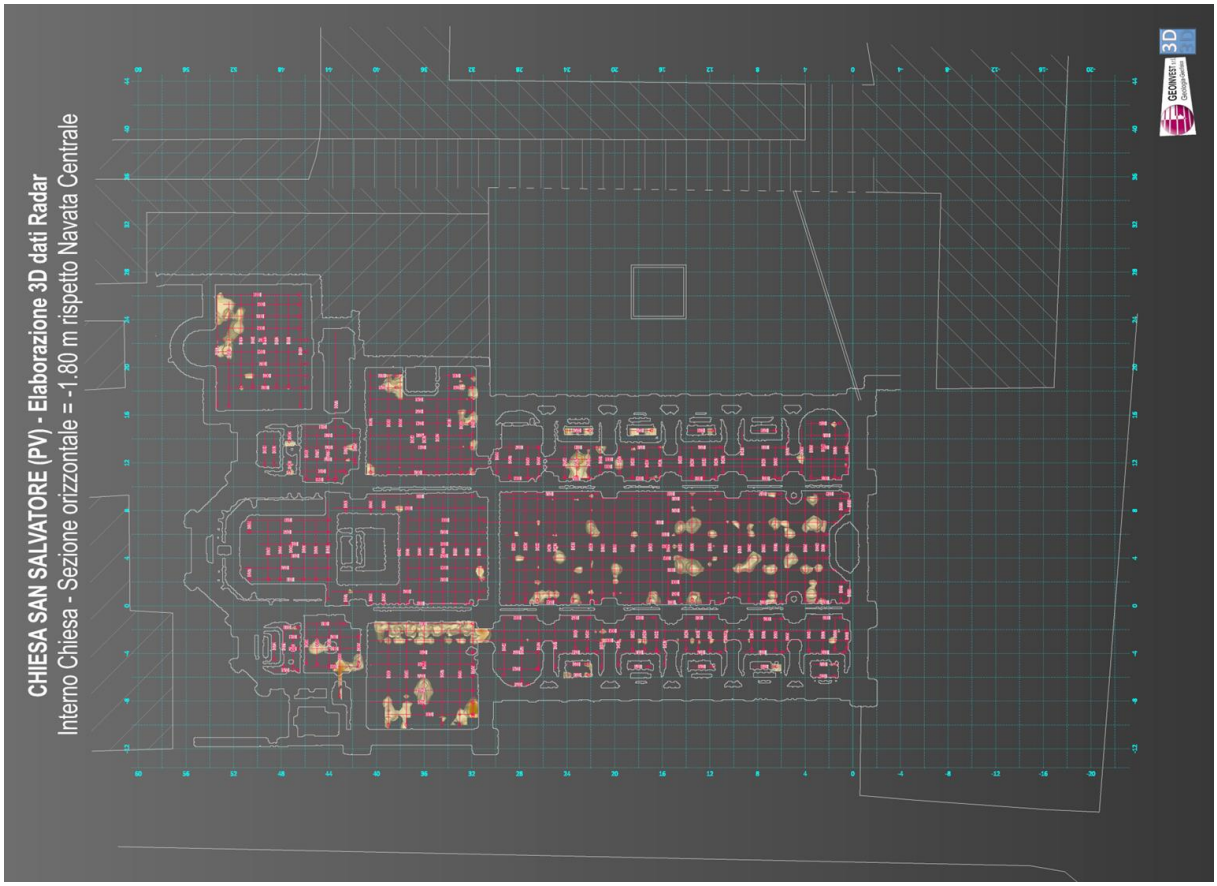

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Interno Chiesa - Sezione orizzontale = -0.30 m rispetto Navata Centrale
3D
GEOINVEST

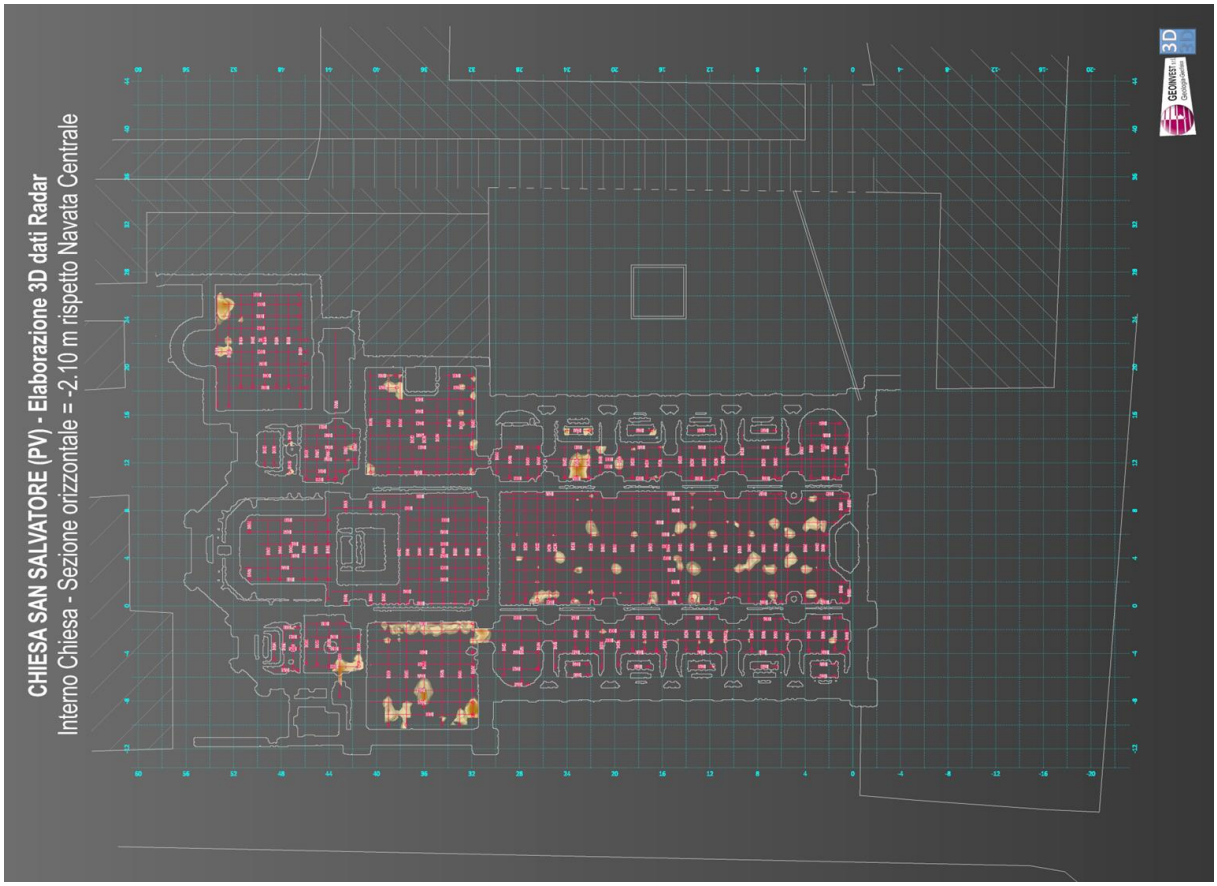

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Interno Chiesa - Sezione orizzontale = -0.60 m rispetto Navata Centrale
3D
GEOINVEST

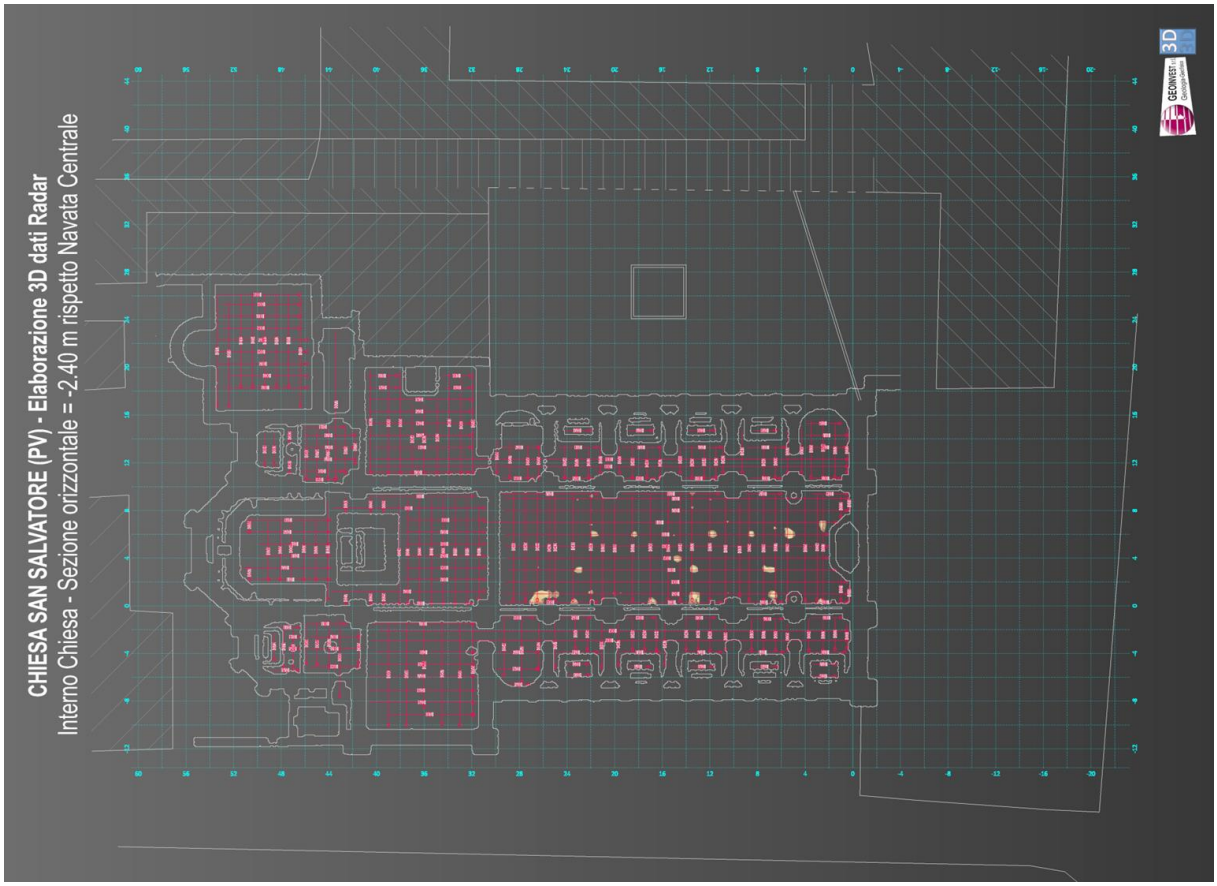

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Interno Chiesa - Sezione orizzontale = -0.90 m rispetto Navata Centrale
3D
GEOINVEST


CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Interno Chiesa - Sezione orizzontale = -1.20 m rispetto Navata Centrale
3D
GEOINVEST

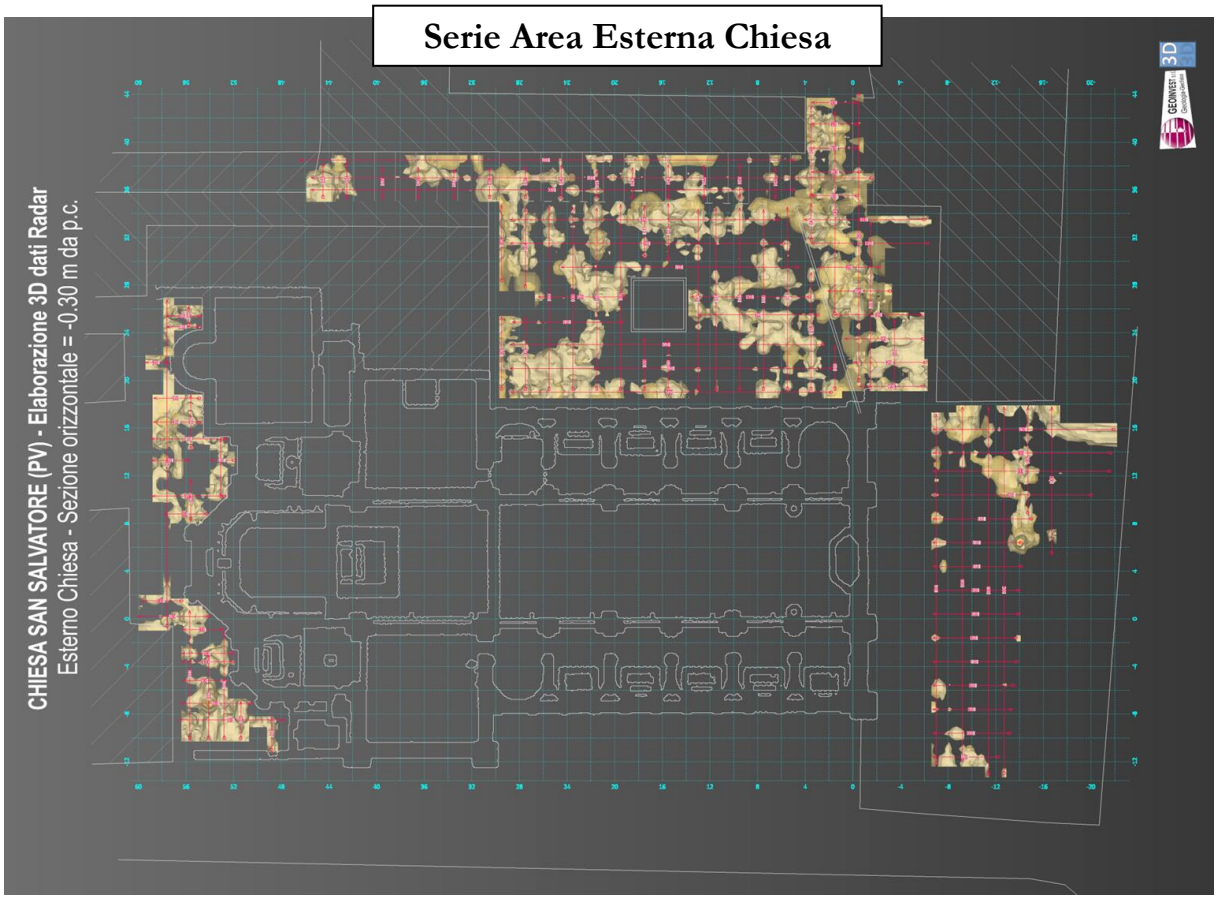

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Interno Chiesa - Sezione orizzontale = -1.50 m rispetto Navata Centrale
3D
GEOINVEST

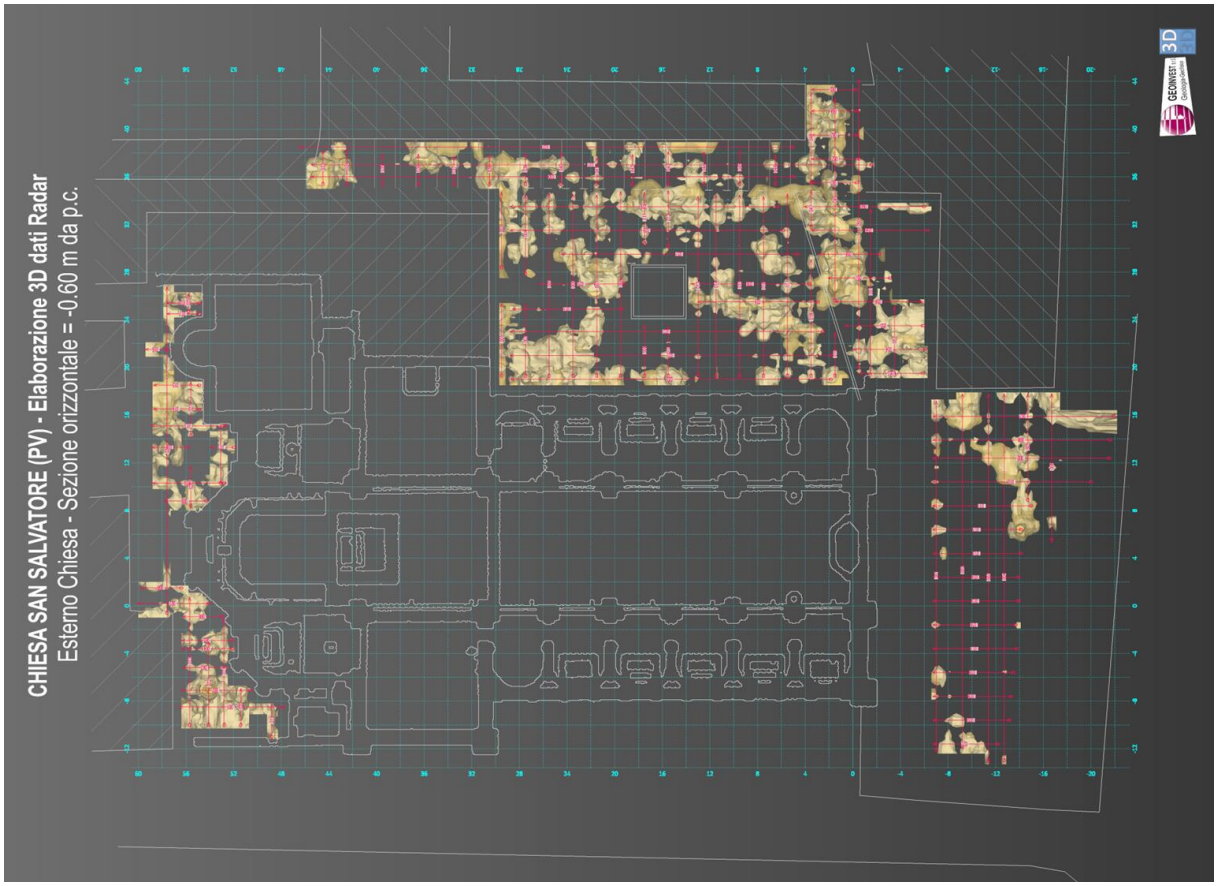

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Interno Chiesa - Sezione orizzontale = -1.80 m rispetto Navata Centrale
3D
GEOINVEST

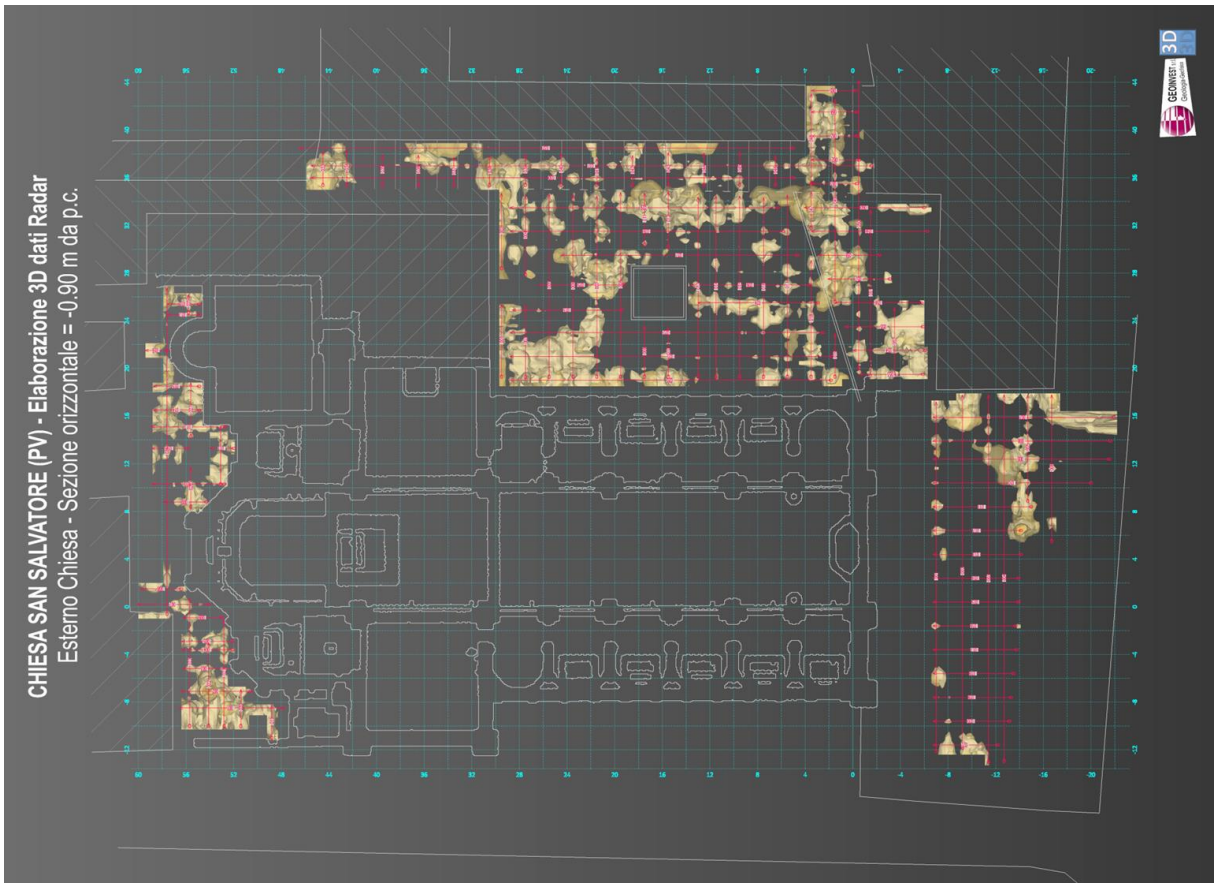

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Interno Chiesa - Sezione orizzontale = -2.10 m rispetto Navata Centrale
3D
GEOINVEST

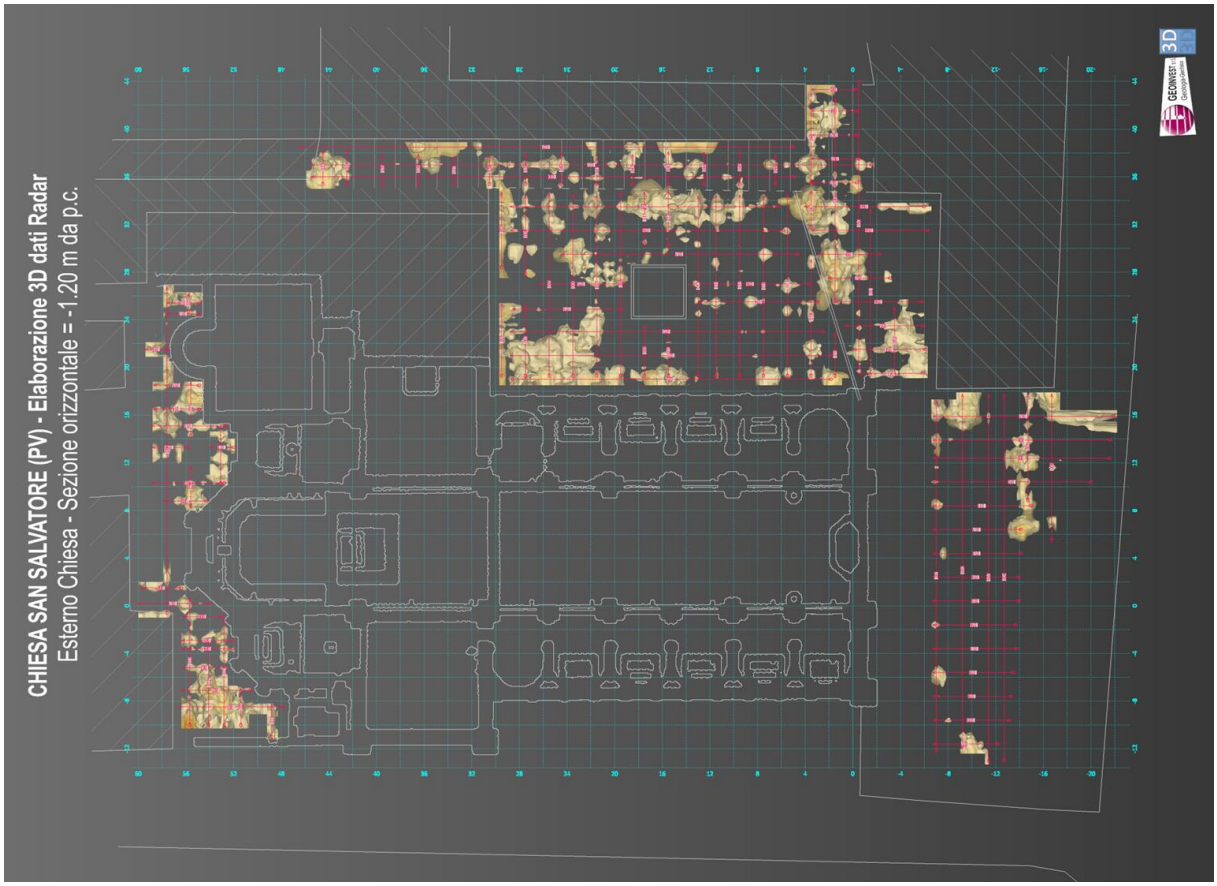


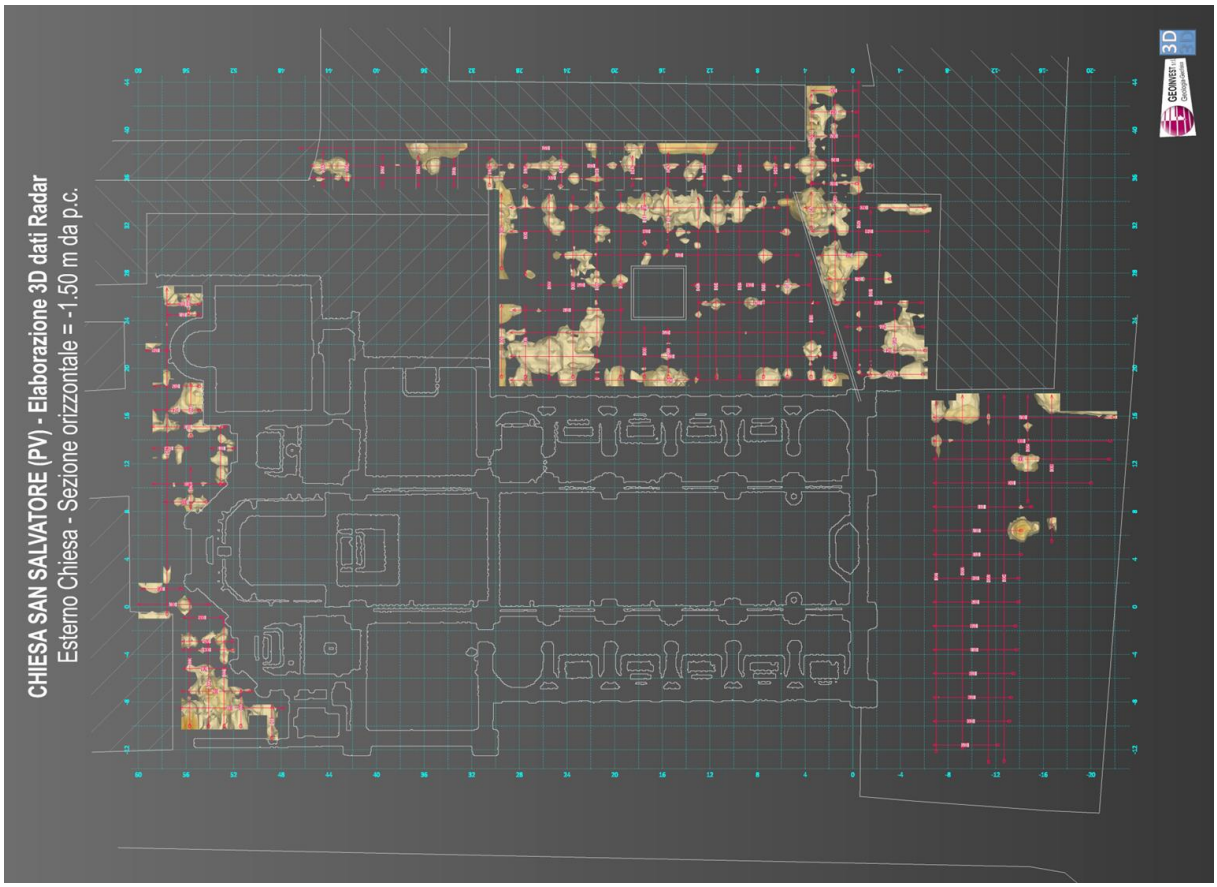
Serie Area Esterna Chiesa

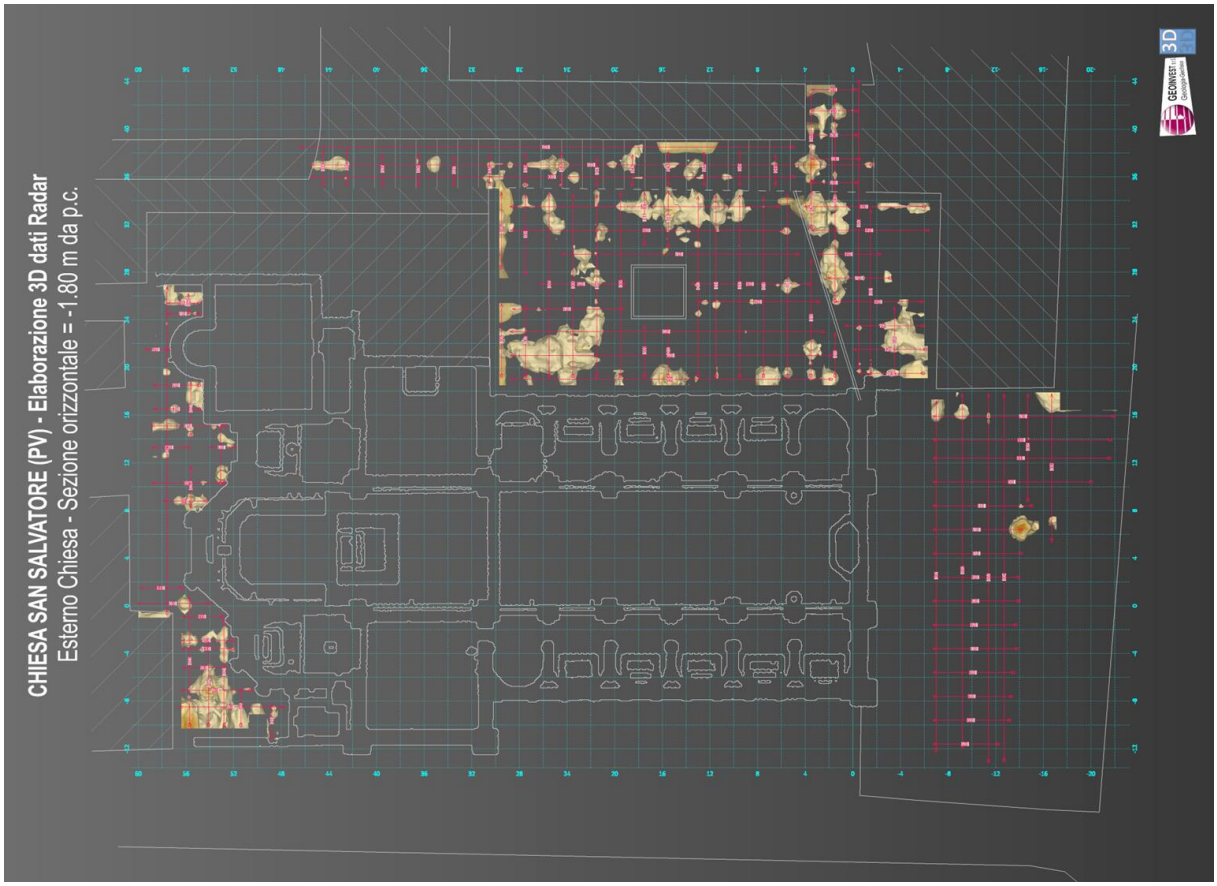


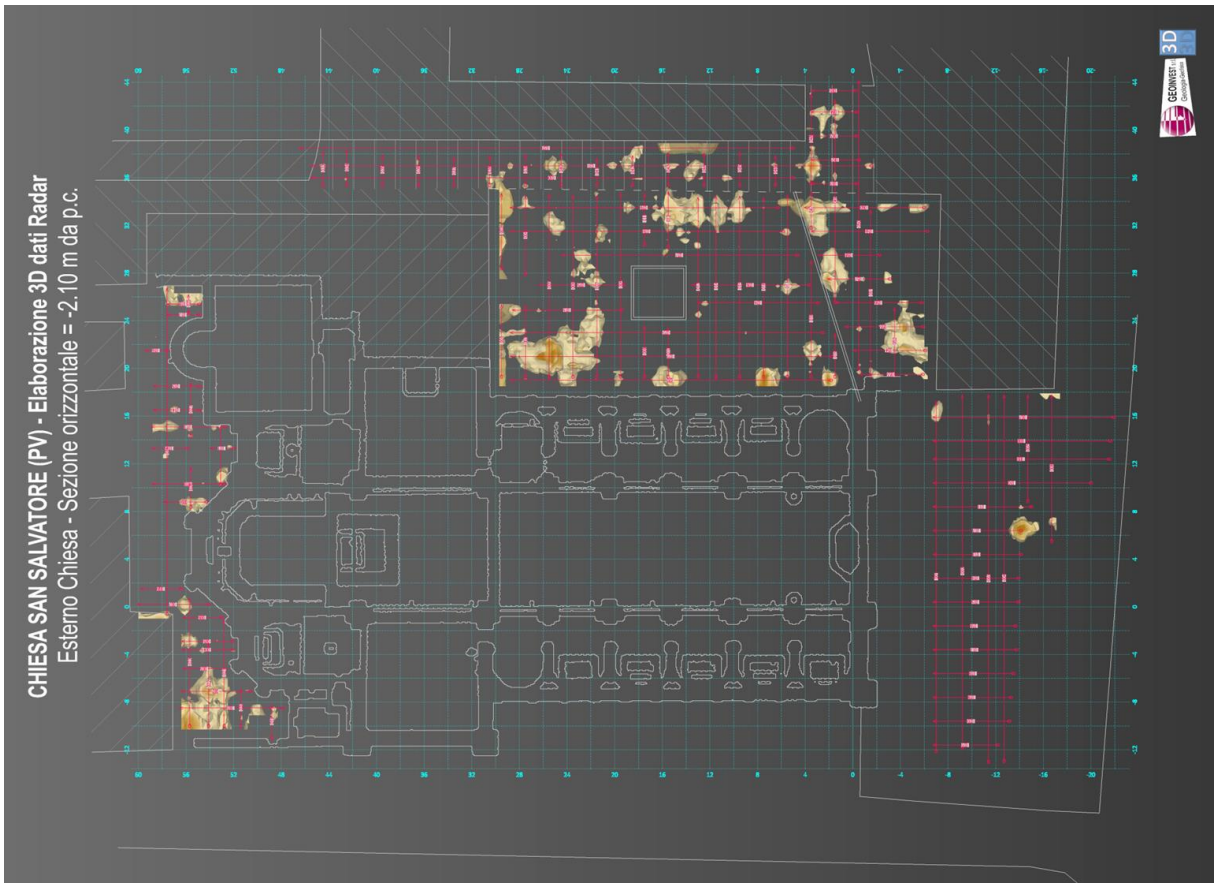

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Esterno Chiesa - Sezione orizzontale = -0.60 m da p.c.
3D
GEOINVEST s.r.l.

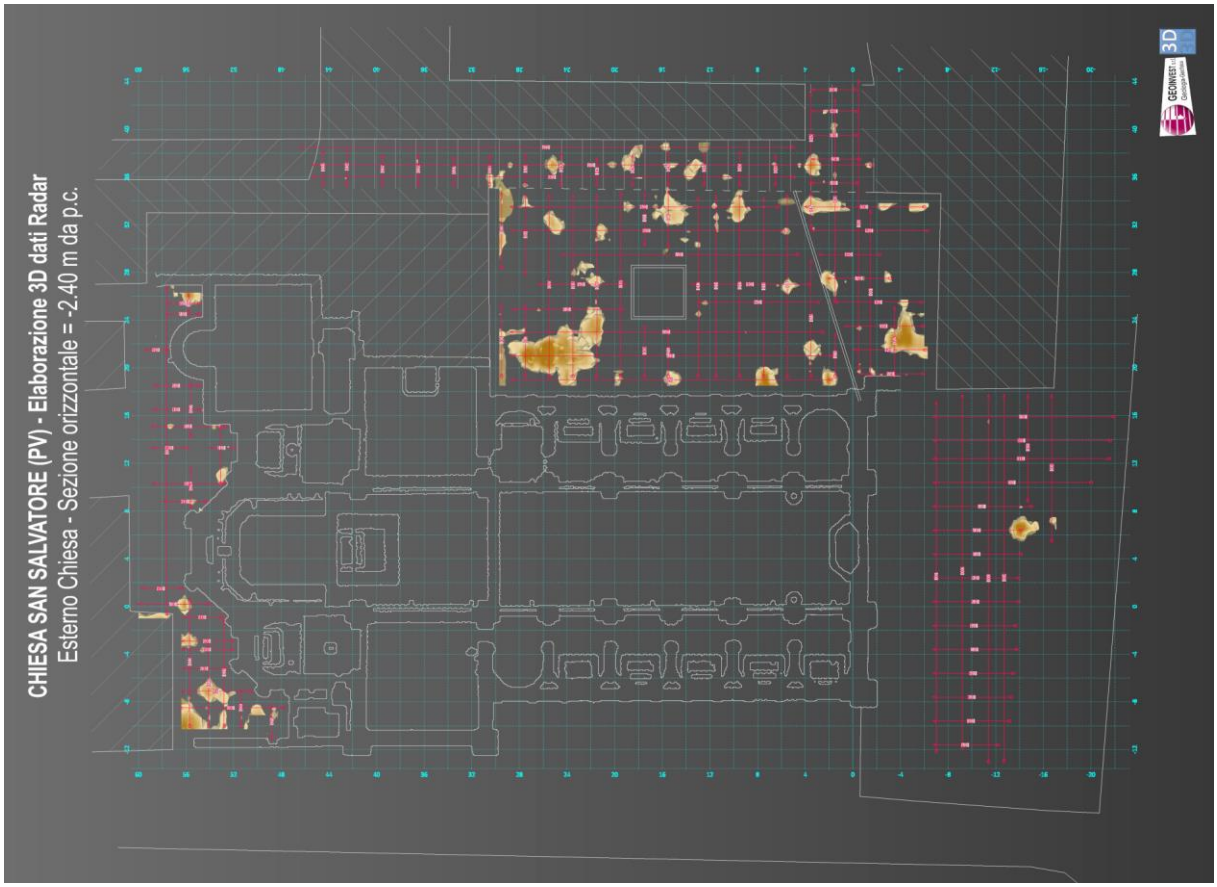

CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Esterno Chiesa - Sezione orizzontale = -0.90 m da p.c.
3D
GEOINVEST s.r.l.


CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Esterno Chiesa - Sezione orizzontale = -1.20 m da p.c.
3D
GEOINVEST


CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Esterno Chiesa - Sezione orizzontale = -1.50 m da p.c.
3D
GEOINVEST


CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Esterno Chiesa - Sezione orizzontale = -1.80 m da p.c.
3D


CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Esterno Chiesa - Sezione orizzontale = -2.10 m da p.c.
3D


CHIESA SAN SALVATORE (PV) - Elaborazione 3D dati Radar
Esterno Chiesa - Sezione orizzontale = -2.40 m da p.c.
3D
GEOINVEST

2.3 Rilievi sulla controfacciata

All'interno della chiesa, oltre ai rilievi radarstratigrafici verticali eseguiti sulle pavimentazioni, sono stati realizzate sei acquisizioni orizzontali sulle controfacciate della navata centrale.

Per ogni controfacciata sono state registrate tre radarstratigrafie alle quote +0.60, +1.00 e +1.40 metri dal pavimento, per una lunghezza di circa 2 metri ciascuna. In Fig. 13 è visibile l'acquisizione più alta, mentre in Fig. 14 è ripresa l'acquisizione intermedia.

Fig. 13 Acquisizione radar della linea 1, controfacciata destra.

Fig. 14 Acquisizione radar della linea 2, controfacciata sinistra.

In Fig. 15 è possibile osservare i risultati ottenuti; particolarmente degna di nota è risultata essere la sezione radar "002 destra", eseguita al di sopra della lapide murata visibile in Fig. 13, che mostra una forte riflessione di segnale.

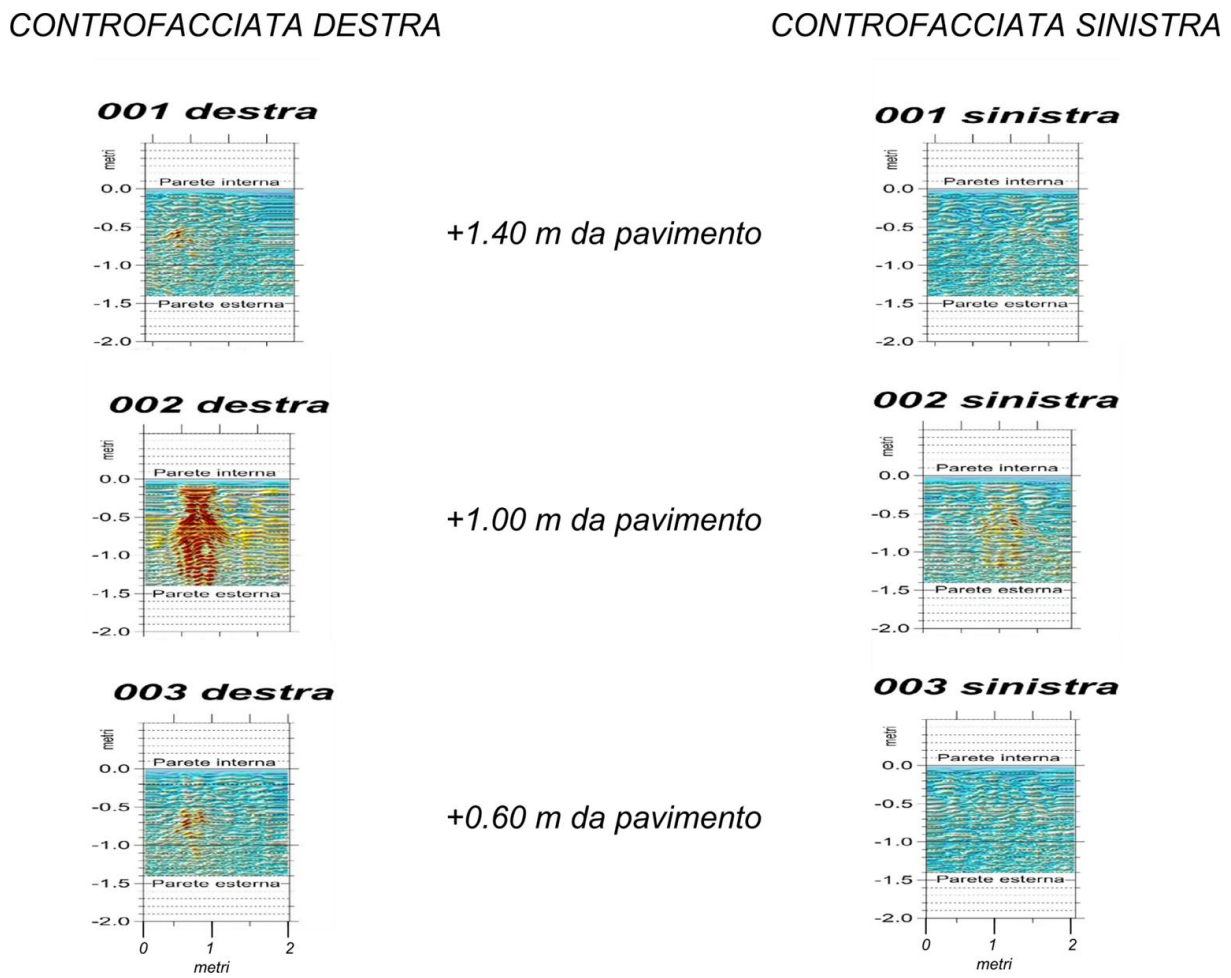


Fig. 15. Radarstratigrafie ottenute lungo le sei sezioni orizzontali delle controfacciate.

3 COMMENTO DEI RISULTATI

Come riportato negli elaborati precedentemente descritti, gli elementi anomali più significativi sono rappresentati da allineamenti particolari nell'area esterna (da verificare se di origine "moderna", es. sottoservizi o caditoie), oltre ad alcune anomalie più concentrate e riscontrabili su più profondità (osservabili per esempio nella navata destra o nell'altare sinistro).

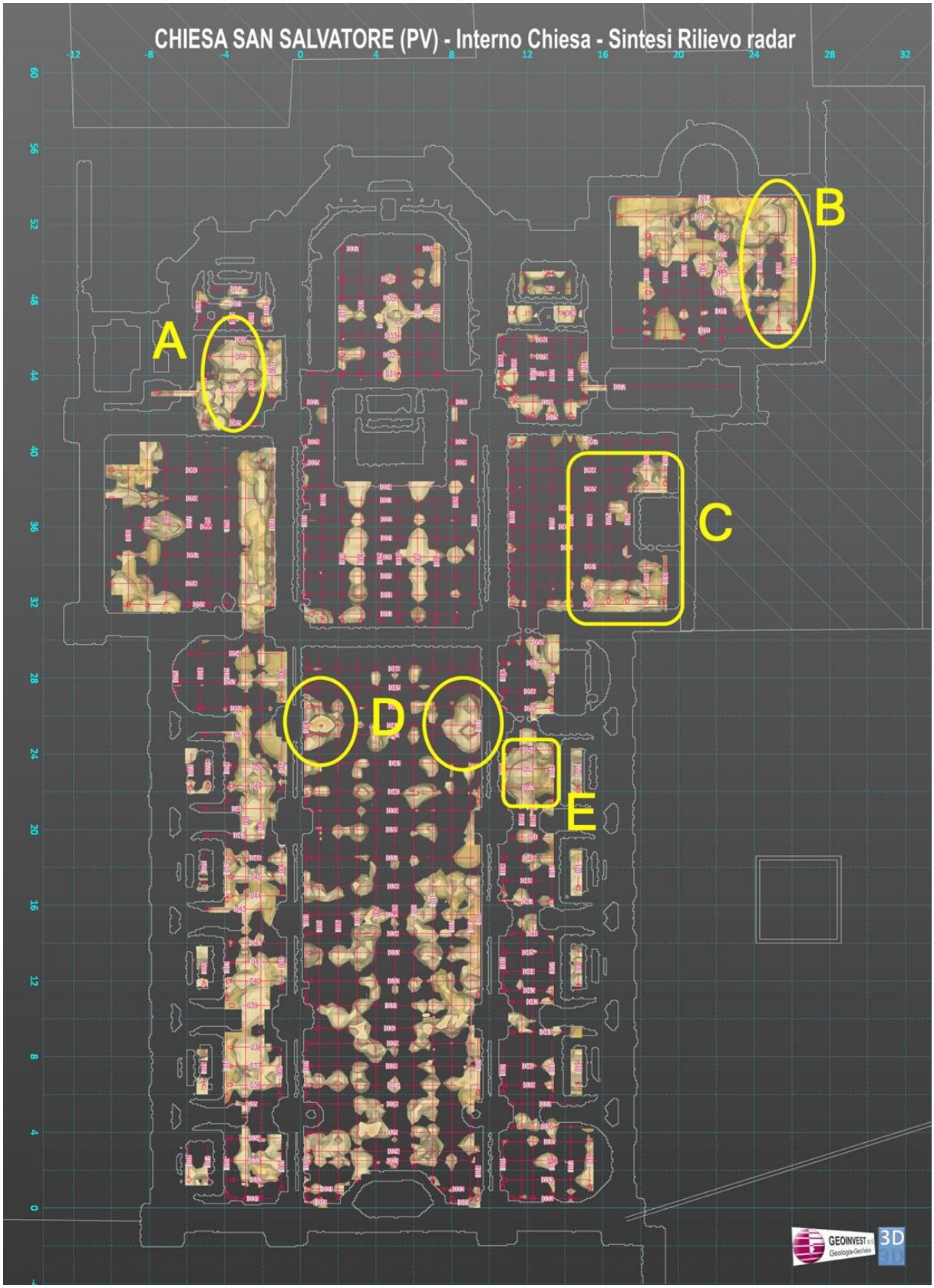


Fig. 16. Interno Chiesa - Individuazione elementi anomali più significativi

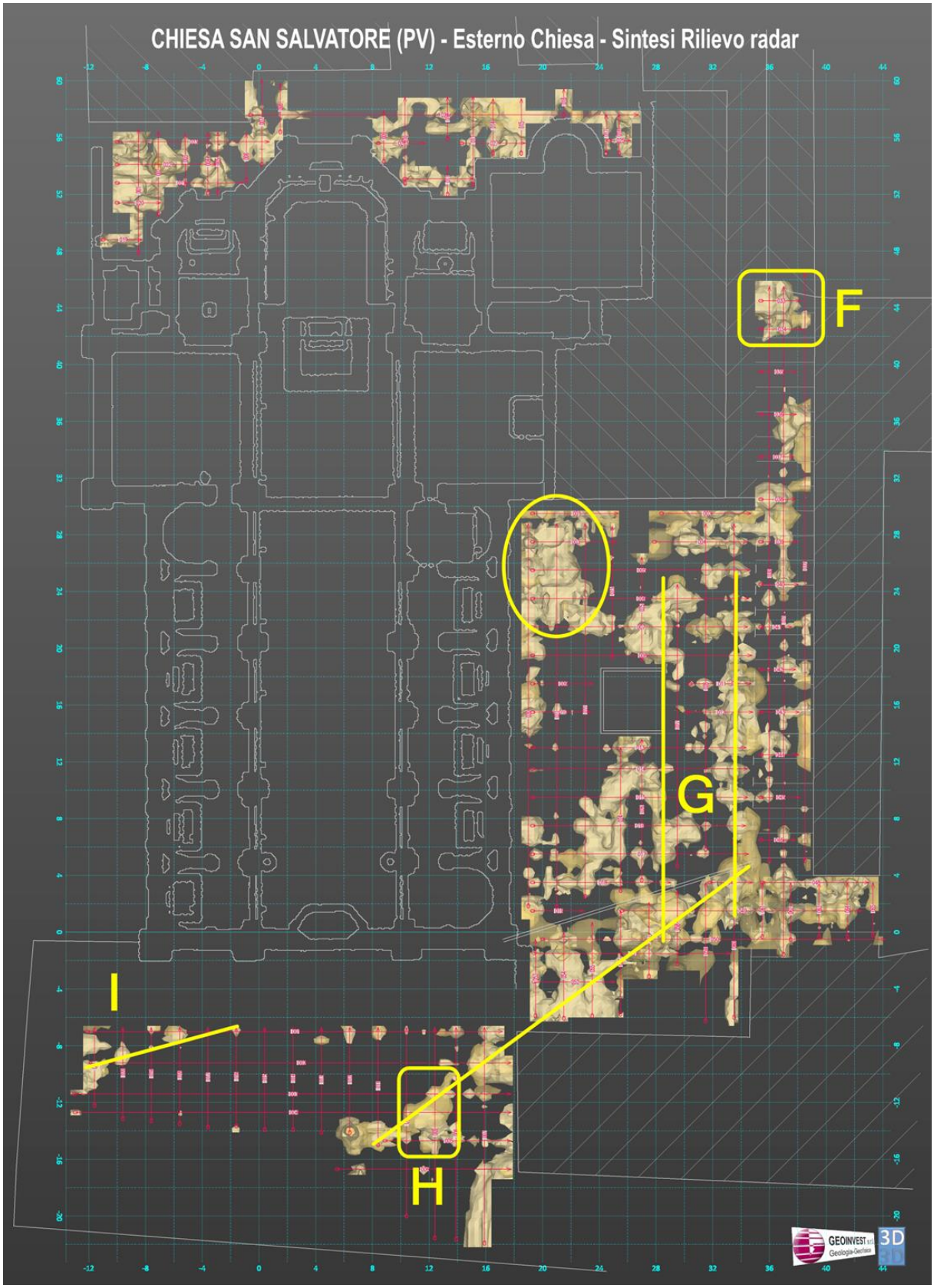


Fig. 17. Esterno Chiesa - Individuazione elementi anomali più significativi.

Come riportato negli elaborati precedentemente descritti si individuano gli elementi anomali più significativi:

Interno Chiesa (Fig. 16)

A – Altare Sinistro 1, Profili 063-066-067-068-069;

B – Sagrestia, Profili 009-010---017;

C – Navata Destra 1, Profili 059-060-061, 065-066;

D – Navata Centrale, Profili 004-005-006, 012-013-017, 042-043-044;

E – Navata Destra 1, Profili 005-008-009-014;

Settori Esterni (Fig. 17)

F – Limitrofa 2, Profili 030-031-032;

G – Limitrofa 2, presenza di un nucleo anomalo e di diversi allineamenti longitudinali, oltre ad un allineamento obliquo che congiunge questo settore con l'anomalia H;

H – Sagrato, Profili 008-009-010-011;

I – Sagrato, allineamento obliquo di anomalie passante per i profili 016-017-018-019-020;

Controfacciate

Le radarstratigrafie orizzontali eseguite hanno mostrato significativi contrasti e riflessioni, in particolare sulla controfacciata destra a +1.0 metri dal pavimento (Fig. 15), ma in parte riconoscibile anche sulle due sezioni superiore e inferiore.