



**STOGIT:
STUDIO DI FATTIBILITA'
RETE MICROSISMICA DI SUPERFICIE
CAMPO DI ALFONSINE (RA)
(Integrazioni Ottobre 2018)**

Studio eseguito da:

Giulia Barisione
Fabio Ogliani

Schlumberger
SIS-Data Services
Continental Europe

SOMMARIO

Premessa.....	3
Scopo del lavoro.....	4
Parte prima.....	5
1 - STAZIONI DELLA RETE IN PROGETTO.....	5
2 - MODELLO DI VELOCITA'.....	6
3 - ANALISI DEL RUMORE AMBIENTALE DELLE STAZIONI.....	11
4 - SCALE DI MAGNITUDO ADOTTATE.....	30
Parte seconda: modellizzazione della risposta microsismica.....	32
Conclusioni.....	99

Premessa

A seguito della presentazione da parte di Stogit di istanza di avvio della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale relativa al progetto di sviluppo allo stoccaggio del giacimento di Alfonsine (RA), il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, con comunicazione Prot. n. 0002356 del 27 giugno 2016, ha richiesto documentazione integrativa al fine di espletare la suddetta procedura.

Questa relazione tecnica costituisce un aggiornamento dell'analogo documento inviato con comunicazione Stogit Prot. n. 883 del 25 ottobre 2017, e fa seguito alla richiesta di integrazioni pervenuta con comunicazione Prot. n. DVA.REGISTRO UFFICIALE.U.009451 del 23 aprile 2018.

Tutta la documentazione fornita si riferisce alla seguente richiesta formulata al Punto 20 della citata comunicazione del 27 giugno 2016, ossia:

“Si chiede di presentare una proposta di monitoraggio sismico delle attività correlate all'esercizio dello stoccaggio, che tenga conto delle seguenti considerazioni:

- *dovrà essere realizzata una rete sismica locale che permetta di valutare la sismicità naturale e di verificare tempestivamente eventuali anomalie sismiche dovute alle attività di esercizio; tale rete di monitoraggio dovrà essere realizzata prima della perforazione dei pozzi in previsione, in maniera da misurare la sismicità naturale in atto e le eventuali altre vibrazioni ambientali presenti (quindi definire l'attività sismica di fondo);*
- *tale rete di monitoraggio sismico dovrà garantire un monitoraggio di qualità uniforme ed essere in grado di rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale ML compresa tra 0 e 1 ($0 \leq ML \leq 1$), con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro di alcune centinaia di metri all'interno del target;*
- *considerato l'elevato rumore sismico di fondo presente in superficie nella Pianura Padana, alcuni strumenti dovranno essere installati in foro (a profondità di almeno m 100 da p.c.); tale soluzione permetterà di valutare tempestivamente eventuali anomalie sismiche indotte dalle attività di esercizio (prelievo e/o reiniezione)”.*

Sulla base dello studio intrapreso è stata definita una configurazione geometrica teorica della rete di monitoraggio microsismico rispondente ai criteri formulati nelle linee-guida per i monitoraggi delle attività minerarie di sottosuolo pubblicate dal Ministero dello Sviluppo Economico nel novembre 2014. In particolare è stata definita una configurazione della rete costituita da 5 stazioni in grado di coprire l'area interessata dal giacimento e dal Dominio Interno e una rete di 11 stazioni per tutta l'area corrispondente al Dominio Esteso.

Le integrazioni contenute nel presente documento riportano i risultati di analisi condotte con un modello di velocità, descritto nella prima parte al Capitolo 2, in parte differente da quello considerato nel precedente rapporto del 2017.

La seconda parte del documento riporta gli esiti delle nuove simulazioni condotte. Le simulazioni effettuate mostrano come le prestazioni della rete siano principalmente influenzate dal rumore ambientale delle singole stazioni.

In generale si evidenzia quanto segue:

- Livello di rumore minimo a profondità di 5 km: nel Dominio Interno la soglia di localizzazione aumenta da 0.7 a 1.3, mentre nel Dominio Esteso le soglie di detezione e di localizzazione diminuiscono fino a 1.2
- Livello di rumore massimo: nei due domini le soglie di detezione e localizzazione rimangono sostanzialmente invariate

La rete progettata raggiunge le prestazioni richieste dalle Linee Guida ($ML < 1$) in presenza di livelli minimi di rumore ambientale, conseguibili da geofoni posti sul terreno in condizioni di quiete tipiche delle ore notturne.

SCOPO DEL LAVORO

Questo studio intende rispondere all'interesse per una futura realizzazione di un rete microsismica di dettaglio nel campo a gas di Alfonsine, non lontano da Ravenna.

La microsismica è una tecnica geofisica di tipo passivo, in cui, cioè, non viene emesso alcun segnale artificiale e i cui sensori semplicemente registrano i segnali sismici che possono provenire dal sottosuolo. In particolare 'si tende l'orecchio' verso quegli eventi a bassa intensità che sono avvertibili solo con strumentazione adatta (in pratica verso gli eventi sismici di magnitudo inferiore a 3).

La microsismica è essenzialmente una tecnica di geofisica ambientale perché permette di verificare al loro insorgere potenziali effetti geodinamici qualora si svolgano operazioni industriali in sottosuolo.

Nel caso presente, la rete microsismica di dettaglio viene intesa come contributo allo svolgimento in sicurezza di future operazioni di stoccaggio e recupero di gas naturale nel campo attualmente esaurito di Alfonsine.

Poiché in un esperimento di microsismica non è possibile controllare la sorgente di energia acustica (generata da microsismi che avvengono in natura in qualsiasi punto sotto la superficie) occorre modellizzare in anticipo l'efficacia della rete in progetto, in relazione alle proprietà della rete stessa e del luogo in cui si colloca.

La prima parte di questo rapporto descrive le condizioni di contorno entro cui si muove l'indagine:

- Le stazioni riceventi della rete in progetto, definite secondo le linee guida del MISE
- Il modello di velocità del sottosuolo
- Il rumore ambientale alle stazioni che può contrastare la ricezione dei segnali sismici di interesse.
- Le scale di magnitudo adottate.

La seconda parte del rapporto contiene le simulazioni che descrivono le magnitudo minime degli eventi che possono essere riconosciuti dalla rete, sia in termini di semplice detezione, sia in termini di localizzazione degli ipocentri in coordinate spaziali. La localizzabilità è accompagnata dalla possibile incertezza che le può caratterizzare.

Data la complessità della predizioni, queste vengono decritte da mappe situate a profondità caratteristiche del sottosuolo: 1500 m, 3000 m, 5000 m e 11000 m.

PARTE PRIMA:

- 1- STAZIONI DELLA RETE IN PROGETTO**
- 2- MODELLO DI VELOCITA'**
- 3- ANALISI DEL RUMORE AMBIENTALE DELLE STAZIONI**
- 4- SCALE DI MAGNITUDO ADOTTATE**

1 STAZIONI DELLA RETE

Come prima operazione sono state definite 11 stazioni che possono ospitare i geofoni ricevitori della rete microsismica in progetto (Figura 1, Tab 1). La committente Stogit ha preso cura dell'ubicazione delle stazioni tenendo conto delle linee guida per monitoraggio microsismico predisposte da MISE accompagnate da considerazioni pratiche di tipo logistico.

Cinque delle undici stazioni, occupano l'area definita come 'Dominio interno di rilevazione'. Il dominio segue l'estensione del giacimento proiettata in superficie e allargata verso l'esteso con una fascia di circa 2 km. Si ritiene che fenomeni indesiderati, quali sismicità indotta o deformazione del suolo, possano verificarsi nel Dominio interno che quindi deve essere sottoposto a monitoraggio accurato.

Le stazioni di questo dominio hanno distanza media di 5 km l'una dall'altra e sono numerate da 1 a 5 con l'aggiunta del suffisso -Di. Solo la stazione 1Di e' collocata al di sopra del giacimento, mentre le altre si situano al di fuori dello stesso, all'incirca ai margini della concessione.

Le rimanenti sei stazioni sono collocate nel 'Dominio esteso di rilevazione', un'area allargata rispetto alla precedente per ulteriori 5 km e collocata oltre la concessione (stazioni da 6De a 11 De).

La funzione di queste stazioni di ricezione e' essenzialmente di controllo e contestualizzazione delle informazioni raccolte nel dominio interno.

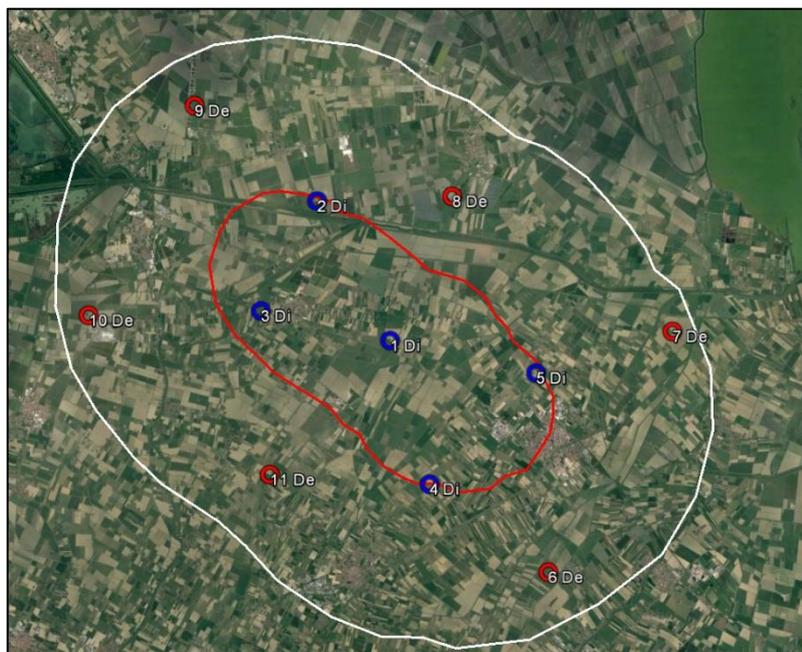


Figura 1. Ubicazione delle stazioni della rete in progetto in relazione al dominio interno di rilevazione (delimitato in rosso) e quello esteso (delimitato in bianco).

Tabella 1: Coordinate stazioni Dominio interno Dominio esteso

STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE
1 Di	44°31'59.8141"	11°58'29.8805"
2 Di	44°34'33.1103"	11°56'41.9101"
3 Di	44°32'30.3903"	11°55'23.2403"
4 Di	44°29'31.1604"	11°59'27.2902"
5 Di	44°31'13.2003"	12°02'29.6602"
6 De	44°27'59.9004"	12°02'18.9001"
7 De	44°32'09.4104"	12°05'18.0402"
8 De	44°34'29.3404"	11°59'59.6002"
9 De	44°36'55.6103"	11°53'49.9702"
10 De	44°32'25.4302"	11°51'14.2002"
11 De	44°29'40.7202"	11°55'36.3802"

2 MODELLO DI VELOCITA'

Il modello di velocità elastiche impiegato in questo studio (2018) è sviluppato dal modello 2017 con opportune modifiche che tengono conto di nuove informazioni dalla letteratura recente (Bragato et al. 2011, Vua, et al. 2011, Malagnini et al. 2012, Molinari et al. 2015).

Il nuovo modello si differenzia dal precedente in due intervalli in particolare:

- alle quote superficiali, comprese tra 0 e 2000 m, si definiscono velocità P inferiori alle precedenti e vicine alla media delle velocità proposte dagli autori.
- Tra le quote 4000-5500 m, inoltre, si inserisce una velocità P più alta rispetto a quella del modello precedente. La nuova velocità è conforme a quelle degli autori e sostanzialmente corrisponde all'intervallo stratigrafico del Paleocene che segna la transizione tra le formazioni clastiche del Terziario e quelle carbonatiche (più veloci) del Mesozoico. Il top di queste ultime formazioni viene fissato alla quota di 5500 m.

I restanti caratteri del modello non si distaccano fortemente da quelli del modello precedente.

Le interfacce che producono contrasti di velocità sono poste a quote relativamente lontane da quelle delle mappe descritte in seguito, in modo da evitare instabilità nella previsione delle magnitudo.

Le velocità S sono state derivate dalle velocità P seguendo la relazione di Brocher (2005) utilizzata da Molinari et al. (2015) e già adottata nel precedente modello. Nei due strati più superficiali il rapporto VPVS è stato limitato a 3 e 3.1.

Le densità sono state definite secondo la relazione

$$\text{Densità}(g/cc) = 0.148 * VP(km/s) + 1.85$$

osservata empiricamente su vari pozzi della pianura padana e comunque vicina alle formulazioni di Gardner et al. (1974) e Brocher (2005).

Infine, le proprietà descritte sono associate all'attenuazione non-elastica funzione del fattore Q. Come nel caso del modello precedente, il valore di Q viene fissato al valore generalizzato di 80, tipico di formazioni sedimentarie mediamente consolidate.

Tabella 2: profondità e proprietà di strato del modello di velocità

Prof da liv.mare (top strato)	Velocita' P	Velocita' S	Densita'	QP	QS
m	m/s	m/s	g/cc		
0	1718.4	374.9	2.10	80	80
200	1860.4	550.8	2.13	80	80
500	1990.0	687.8	2.14	80	80
800	2171.0	861.7	2.17	80	80
2000	2766.3	1371.5	2.26	80	80
3400	3600.0	2009.0	2.38	80	80
3900	4603.0	2693.0	2.53	80	80
6000	5431.5	3190.7	2.65	80	80
9000	6230.6	3614.2	2.77	80	80
20000	6686.6	3834.5	2.84	80	80
40000	7000.0	3979.7	2.89	80	80

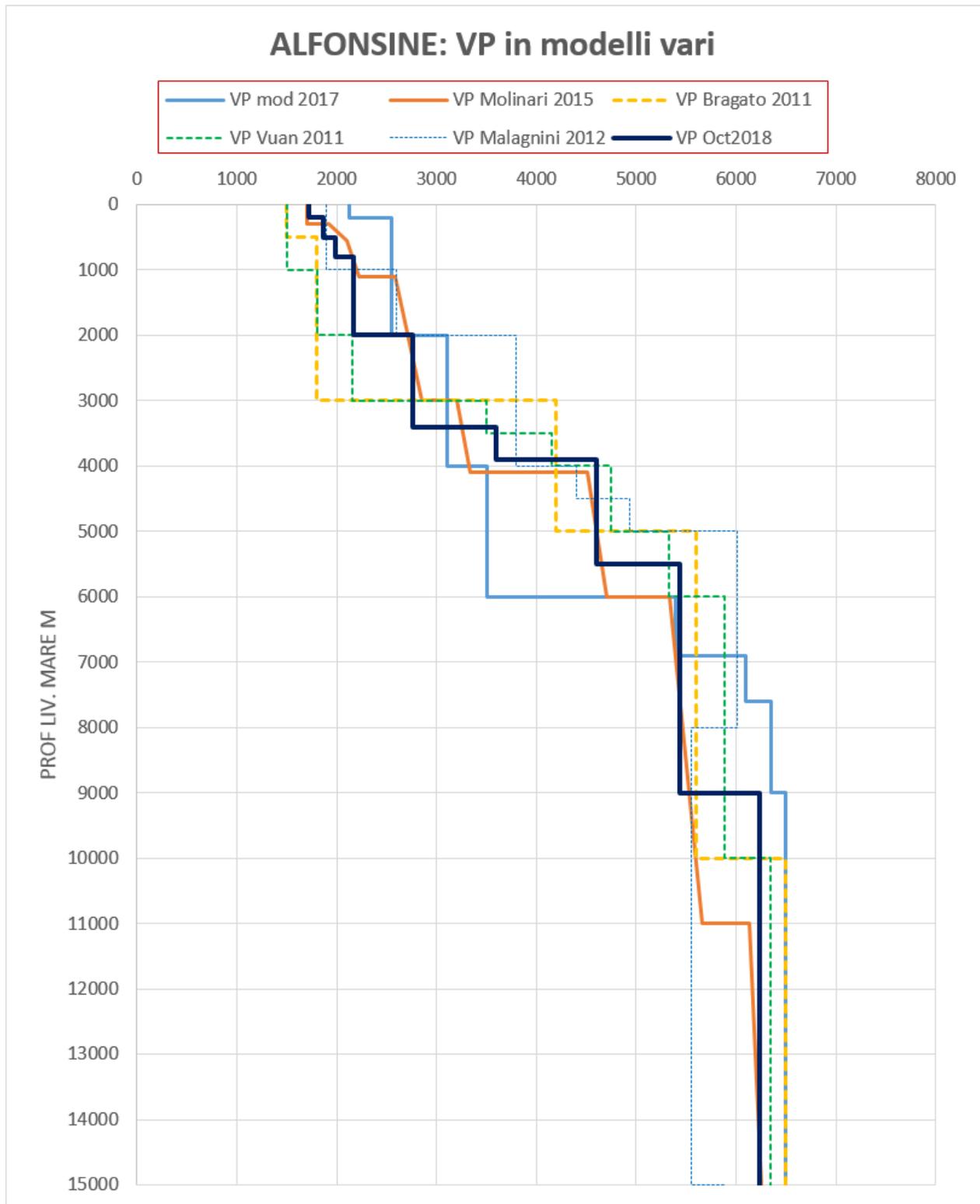


Figura 2. Profili di velocità P in vari modelli applicabili al campo di Alfonsine. La curva in blu scuro si riferisce al modello finale impiegato in queste simulazioni.

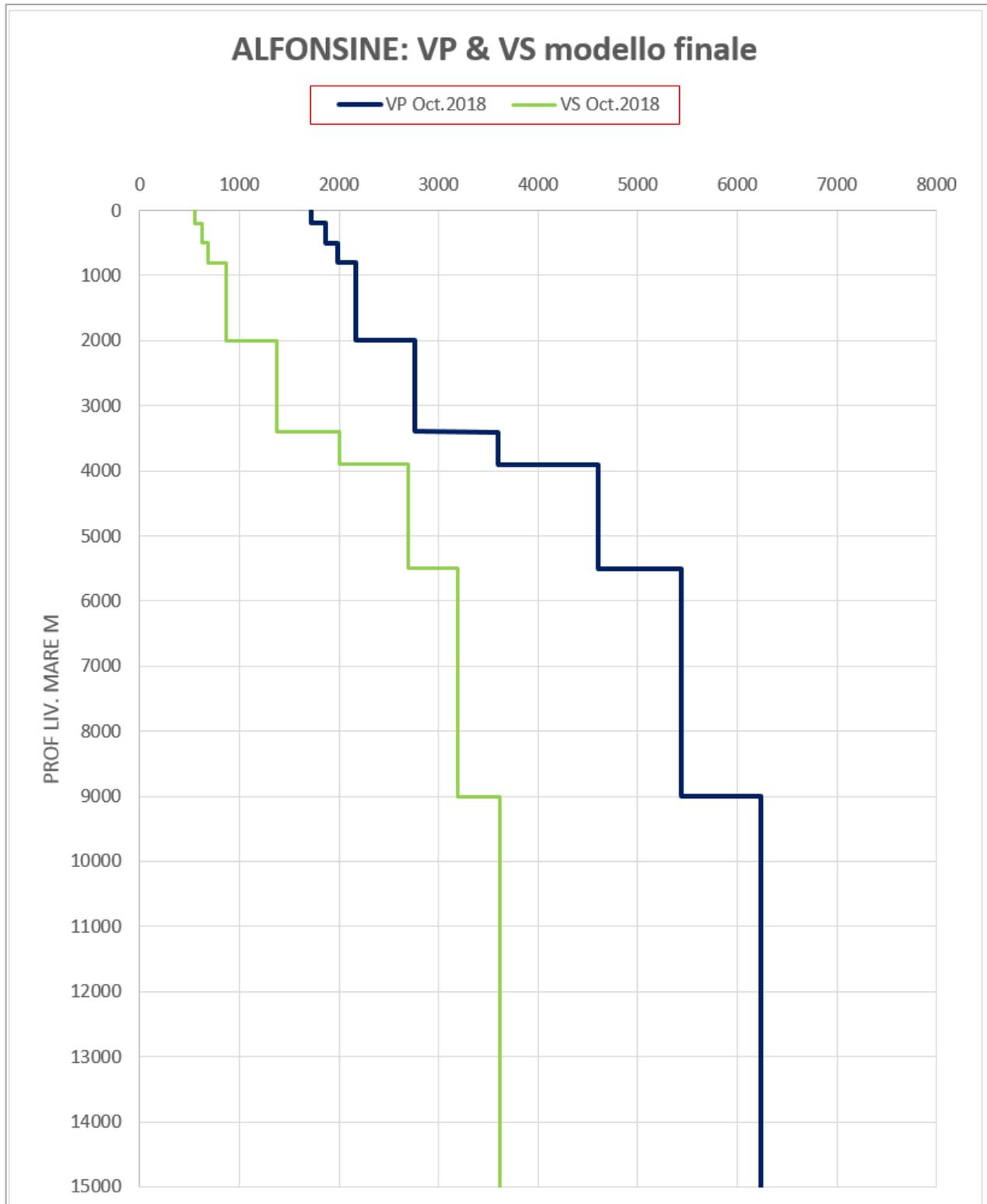


Figura 3. Profili finali di velocita' P e S costituenti il modello di Alfonsine impiegato in queste simulazioni.

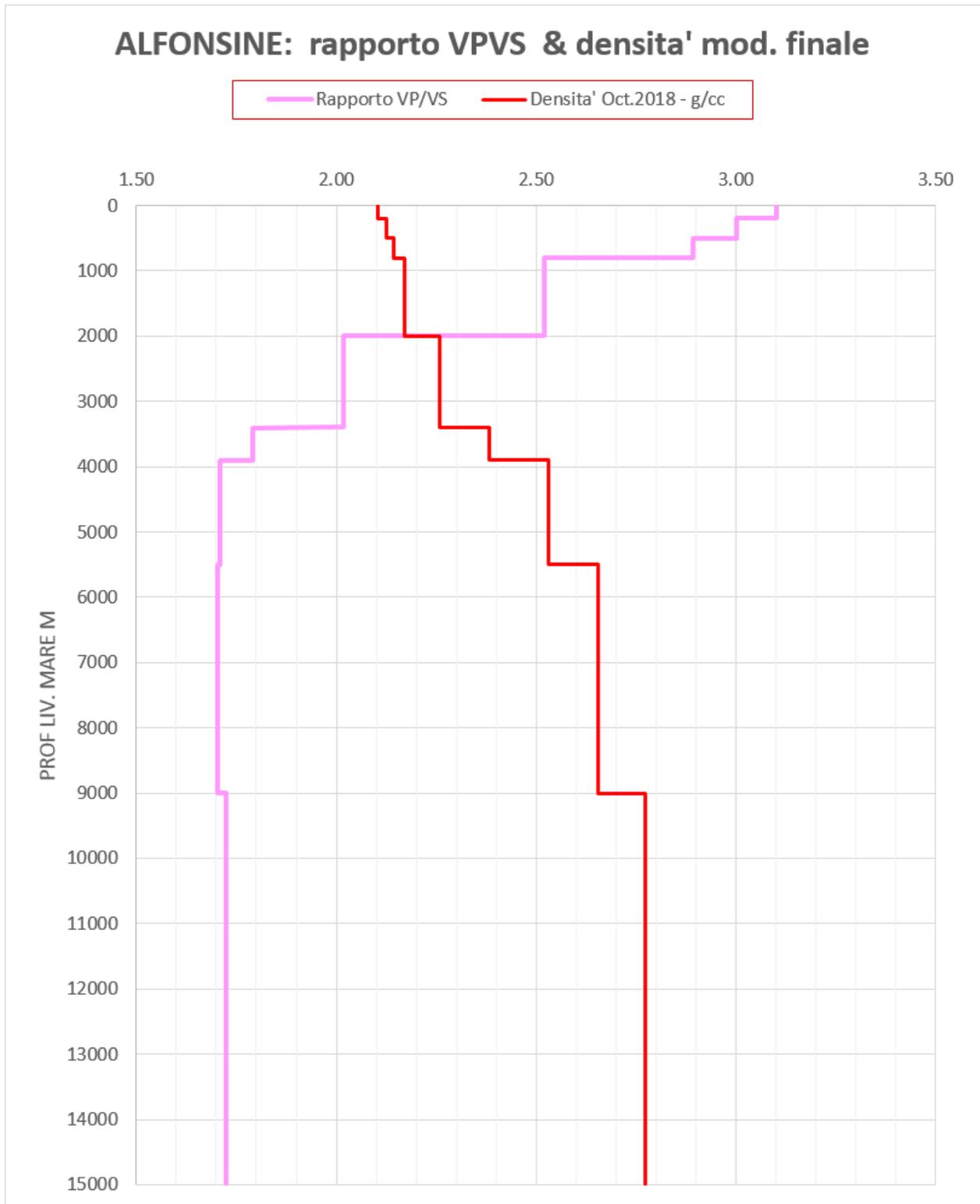


Figura 4. Profili finali di rapporto VP/VS e di Densita' costituenti il modello finale di Alfonsine impiegato in queste simulazioni.

3 ANALISI DEL RUMORE AMBIENTALE

In una simulazione della risposta microsismica di una rete in progetto, e' necessario quantificare il rumore ambientale (o rumore sismico di fondo) che insiste su ogni stazione ricevente. In generale, a parita' di altre condizioni, una stazione che risente di debole rumore ambientale fornisce registrazioni in cui un segnale sismico di sottosuolo puo' stagliarsi ed essere riconosciuto con certezza, anche a piccole ampiezze. Viceversa, se la stazione risente di un forte rumore ambientale, lo stesso segnale sismico viene sommerso dall'attivita' di fondo della traccia registrata.

La definizione di questo parametro cosi' importante e' stata effettuata da piccole acquisizioni ad hoc sui siti designati per le varie stazioni. Le acquisizioni sono state condotte dagli esecutori di questo studio con la supervisione di personale Stogit nei giorni 17-19 luglio 2017.

In ogni sito e' stato collocato un geofono Lennartz 'LE-3D/1s-lite-MKIII' di proprieta' del trattatista e sono stati acquisiti dati per circa 30 minuti in condizioni di puro ascolto senza sollecitazioni. Il geofono viene appoggiato sul terreno compatto in modo da assicurare un buon accoppiamento e posto in condizioni di orizzontalita' per garantire una risposta fedele con sensore Z in verticale. I sensori X e Y vengono allineati lungo le direttrici Est e Nord rispettivamente.

Le tracce X, Y, e Z vengono registrate da acquirente Taurus-Nanometrics in formato 'Seed' con passo di campionamento di 10 ms.



Figura 5. Esempio di acquisizione sul campo del rumore sismico di fondo.

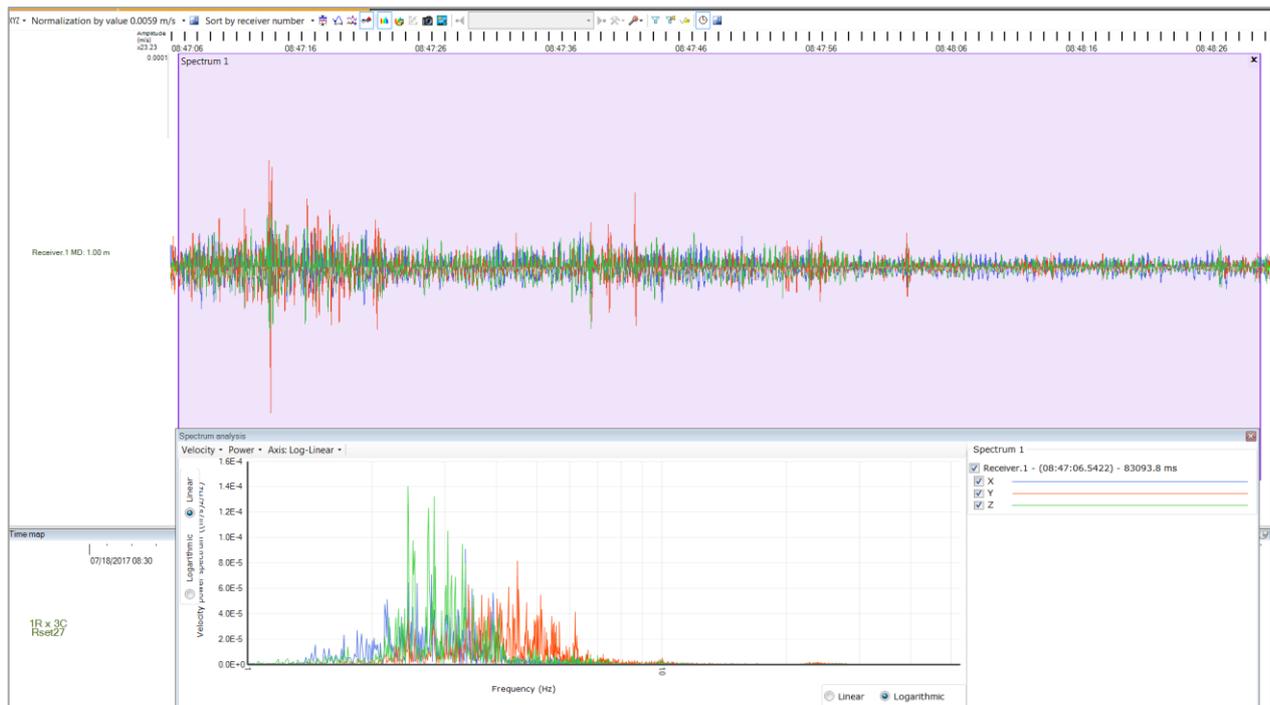


Figura 6. Esempio di tracce acquisite sulla stazione 1-Di, per circa 80 secondi, con relativa analisi di frequenza.

Nell'analisi del rumore, vengono calcolate le ampiezze quadratiche medie (RMS) in ogni secondo di dato (6 campioni). La buona qualità dei dati non richiede operazioni preliminari di filtraggio delle tracce. Le quantità di interesse sono le ampiezze RMS minime e massime (Min_Noise e Max_Noise) risultanti dall'insieme delle tre componenti per ogni secondo di dato:

I risultati lungo i 30 minuti di registrazione vengono analizzati come:

- serie temporali del Min e Max_Noise.
- istogrammi di frequenza degli stessi
- diagrammi di densità spettrale delle componenti di registrazione X, Y e Z, che non appaiono significative probabilmente a causa delle forti variazioni di ampiezza.

Tutti questi risultati concordano nel mostrare che l'attività del rumore è fortemente variabile

- a) da stazione a stazione
- b) entro una stessa stazione con alternanze apparentemente irregolari tra momenti di quiete e momenti rumorosi.

Si è deciso dunque di assegnare ad ogni stazione due valori tipici di rumore di fondo per le due diverse condizioni ambientali.

Il valore minimo di rumore viene facilmente calcolato mediando i valori dei 15 sec., 30 sec. e 60 secondi ad ampiezze più basse del canale Min_Noise. Per controllo, il valore ottenuto coincide con l'estremo inferiore degli istogrammi dello stesso canale.

In via teorica, si interpreta che il valore di rumore minimo rappresenti la condizione limite ottimale di ogni stazione, tale da produrre registrazioni ad alto rapporto segnale/disturbo e cogliere eventi sismici anche di bassa magnitudo.

In pratica, si puo' tendere a queste condizioni nelle ore notturne e alloggiando i geofoni in pozzetti superficiali alla profondita' indicativa di 100 m.

Il valore massimo di rumore e' identificabile con minor ovvieta' del precedente. Gli istogrammi del canale Max_Noise hanno distribuzione asimmetrica estesa verso i valori alti. Si interpreta che i valori piu' alti possano corrispondere a fonti sonore riconoscibili che nella pratica tendono ad essere evitate nell' installazione di una stazione sismica. Al contrario, i valori di picco degli istogrammi Max_Noise possono essere significativi in quanto espressione di rumore di fondo indistinto non evitabile. In pratica, il picco del canale di Max_Noise puo' essere associato alla ricezione diurna di una stazione posta sul piano campagna o a pochissimi metri di profondita'.

In sintesi, i valori ottenuti di rumore ambientale minimo e massimo esprimono due condizioni limite che nelle simulazioni che seguono, portano a predire eventi di magnitudo relativamente bassa o alta. Questi due estremi di magnitudo delimitano una fascia entro cui si possono realisticamente predire gli eventi sismici registrabili da una futura rete microsismica.

Tabella 3: valori del rumore di fondo minimo e massimo ottenuti dalle registrazioni in Alfonsine.

STAZIONE	Rumore di fondo	
	Minimo $\mu\text{m/s}$	Massimo $\mu\text{m/s}$
1-Di	0.35	2.24
2-Di	0.36	5.62
3-Di	1.11	4.47
4-Di	0.72	2.51
5-Di	1.34	3.98
6-De	0.88	7.08
7-De	0.37	2.00
8-De	1.12	12.59
9-De	1.59	5.62
10-De	1.66	7.08
11-De	0.47	1.58

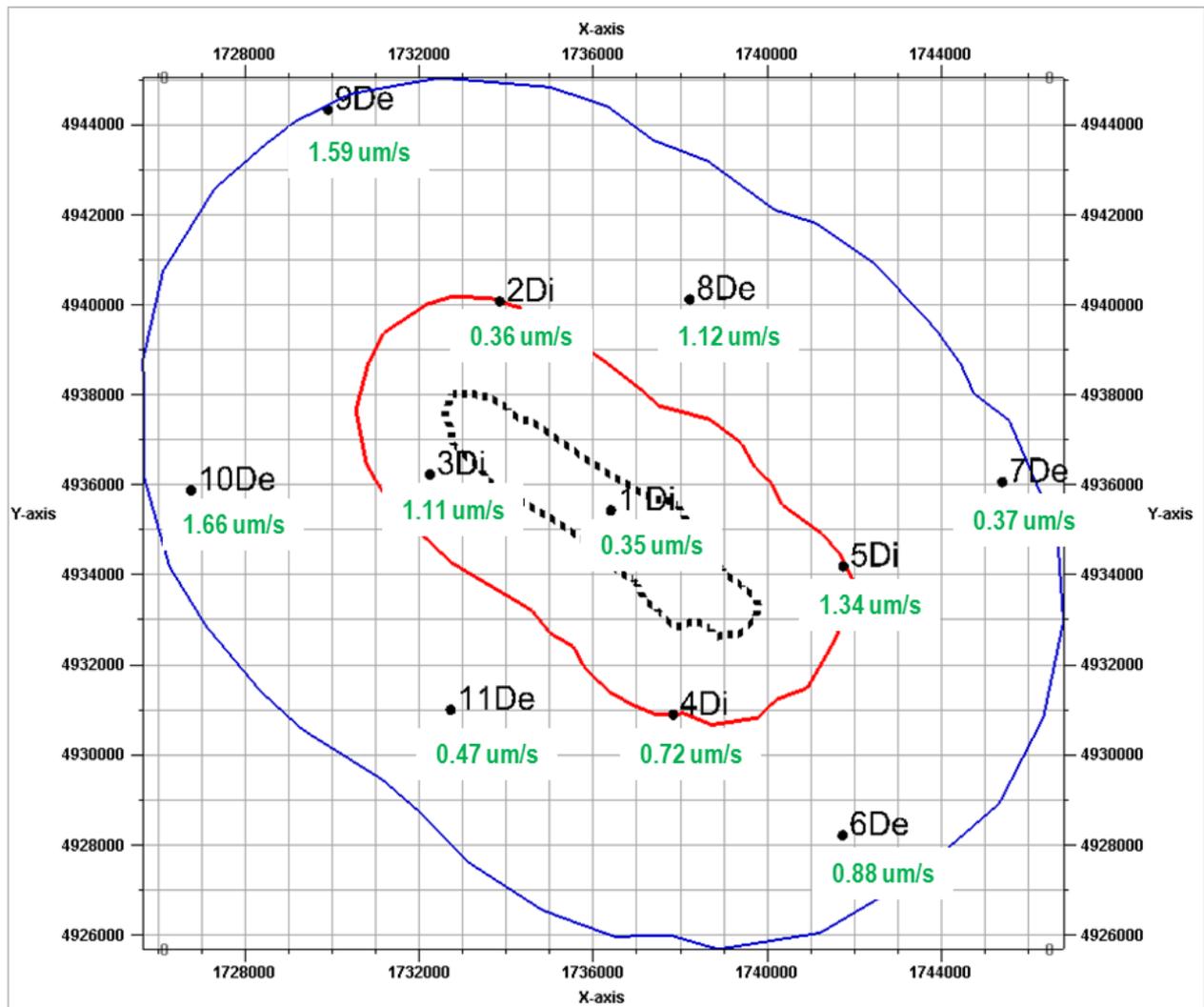


Figura 7. valori del rumore di fondo minimo per singola stazione.

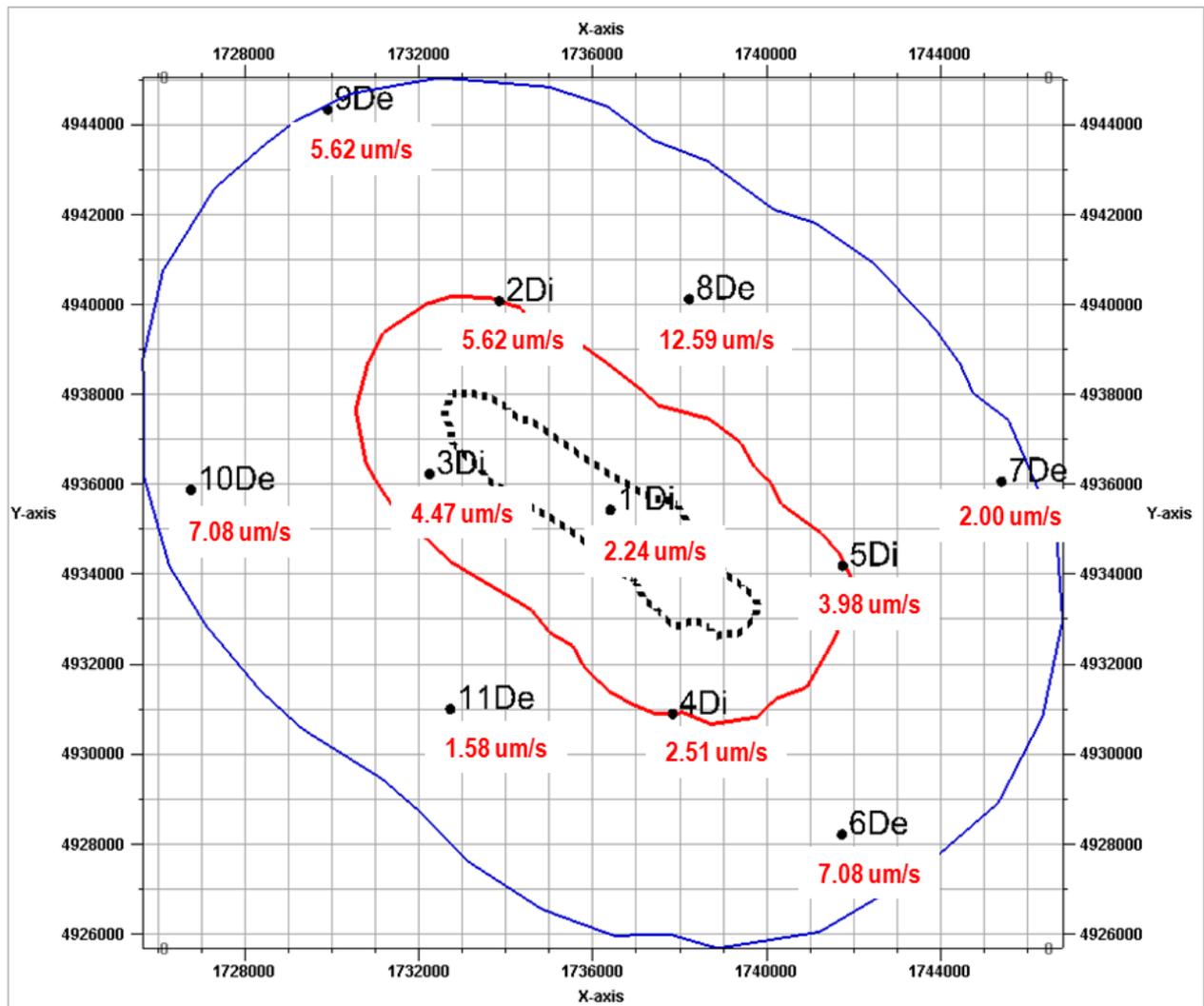


Figura 8. valori del rumore di fondo massimo per singola stazione.

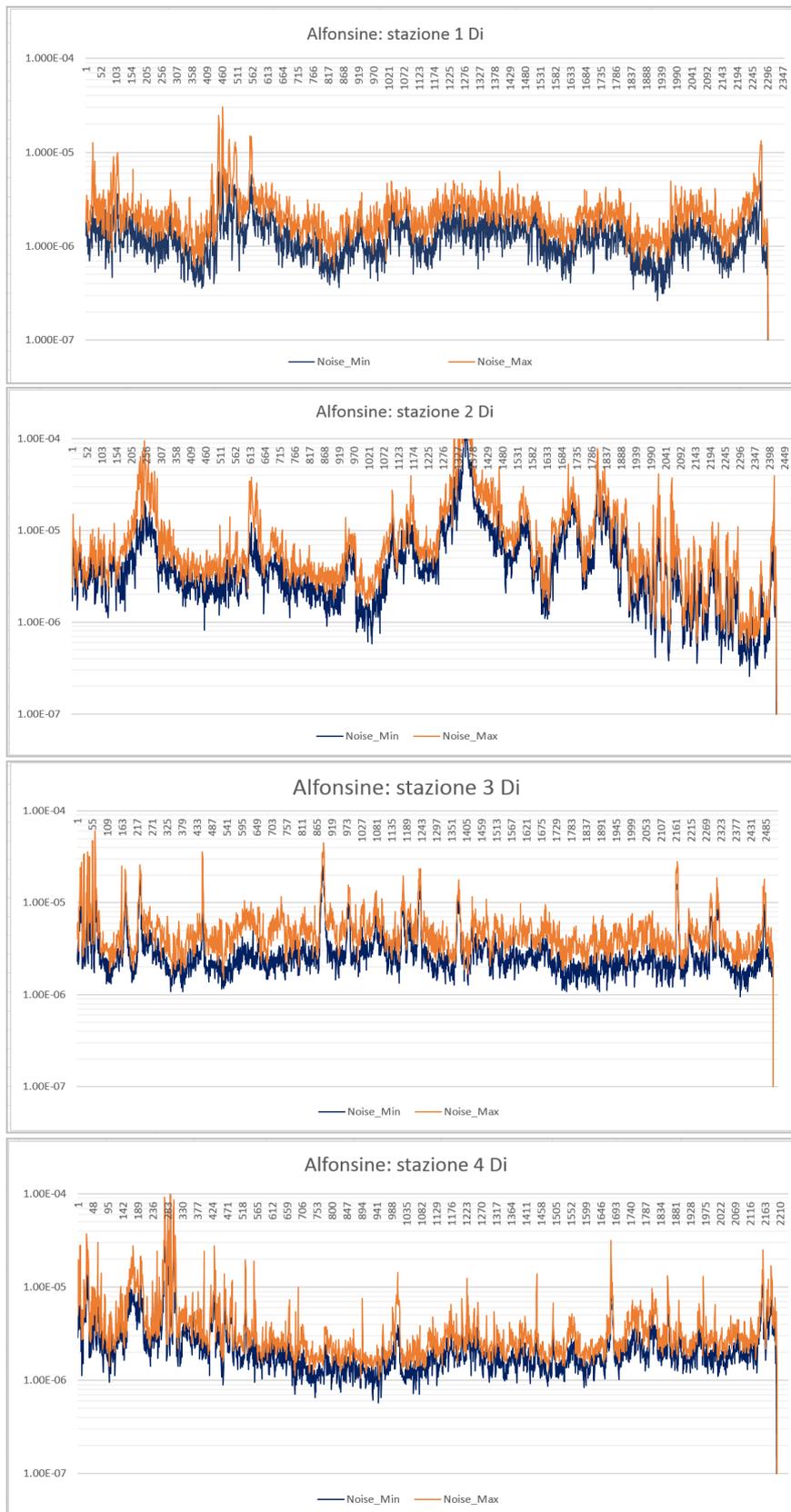


Figura 9a. Serie temporale del rumore di fondo minimo e massimo (Min_Noise in blu, Max_Noise in arancione) lungo i 30 minuti di registrazione: stazioni 1Di, 2Di, 3Di e 4 Di.

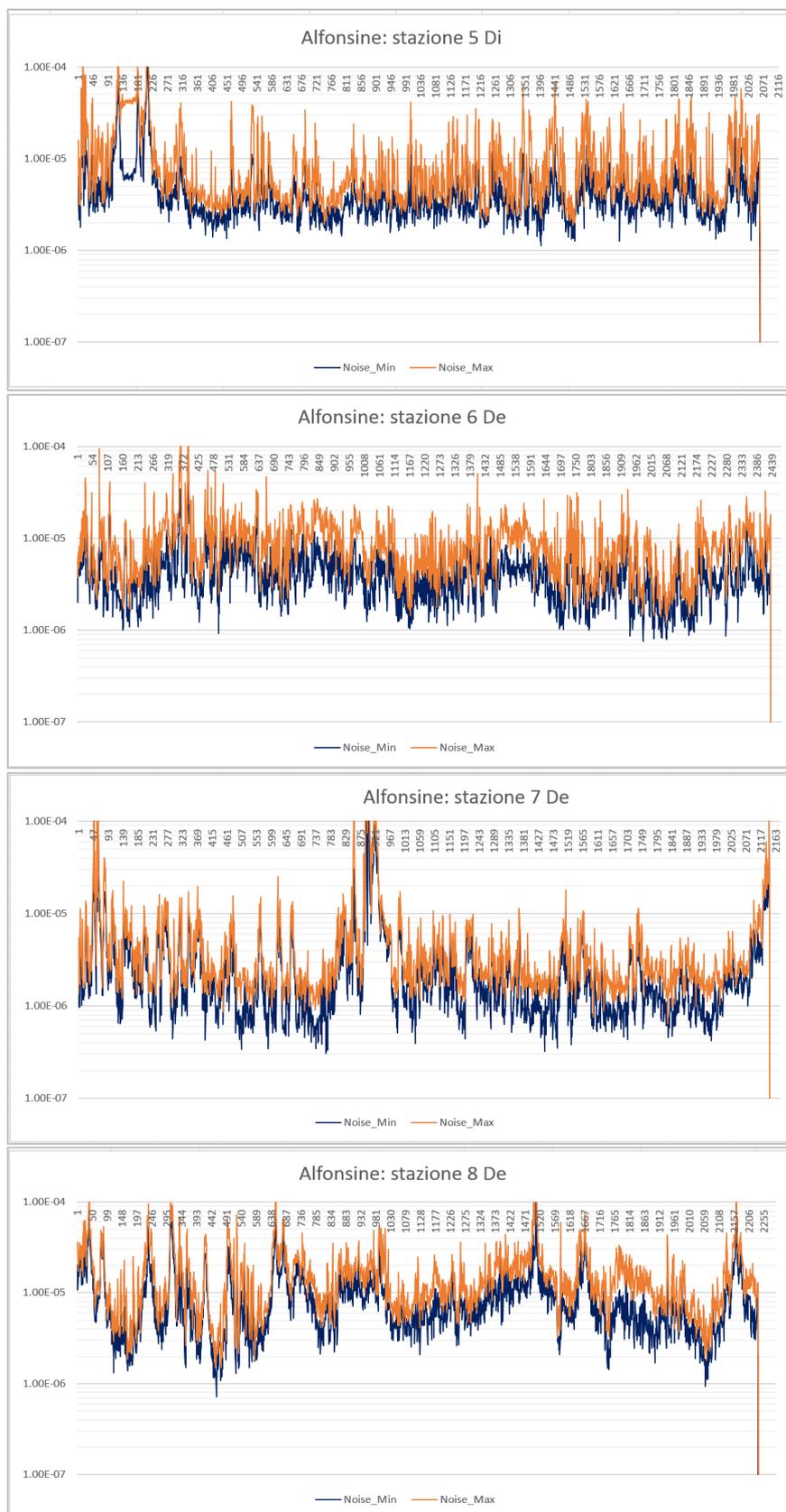


Figura 9b. Serie temporale del rumore di fondo minimo e massimo (Min_Noise in blu, Max_Noise in arancione) lungo i 30 minuti di registrazione: stazioni 5Di, 6De, 7De e 8De.

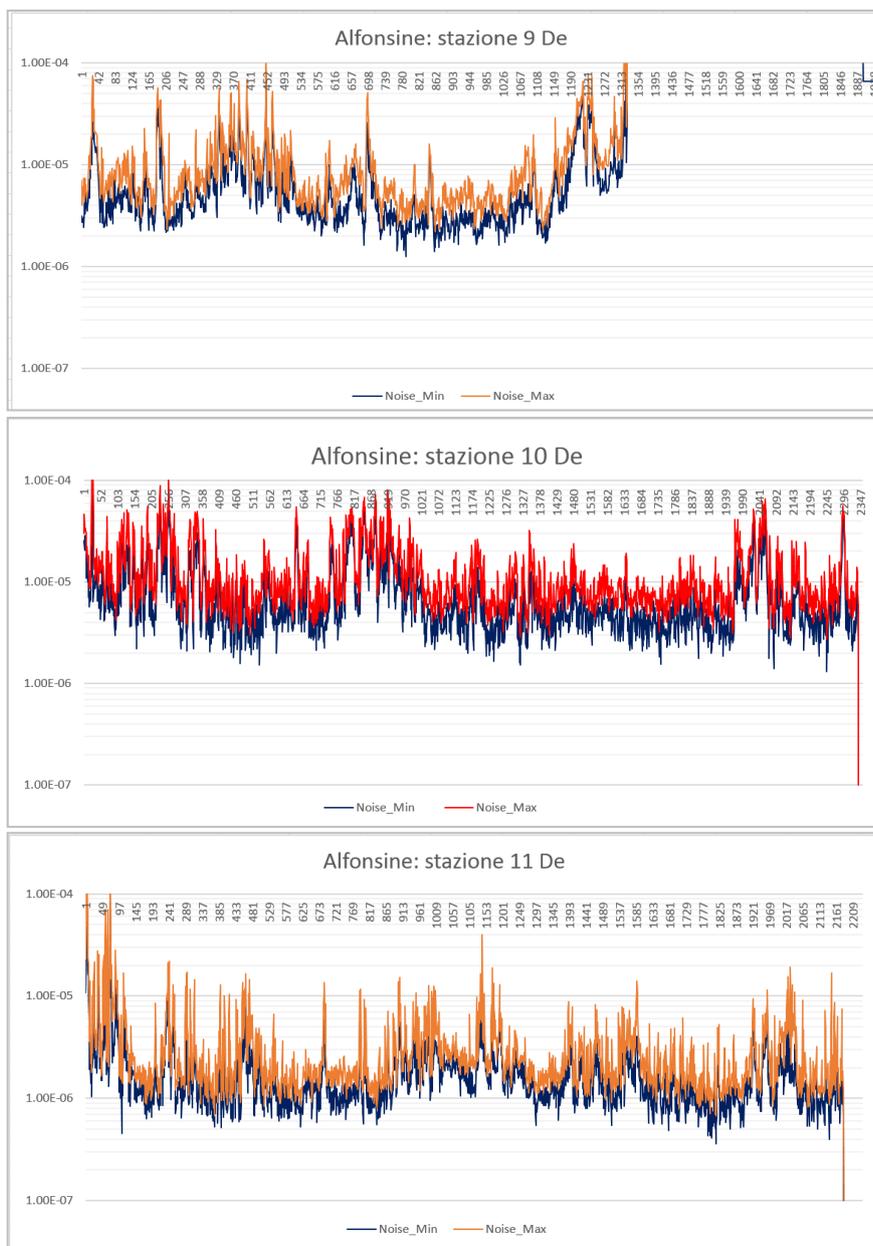


Figura 9c. Serie temporale del rumore di fondo minimo e massimo (Min_Noise in blu, Max_Noise in arancione) lungo i 30 minuti di registrazione: stazioni 9De, 10De e 11De.

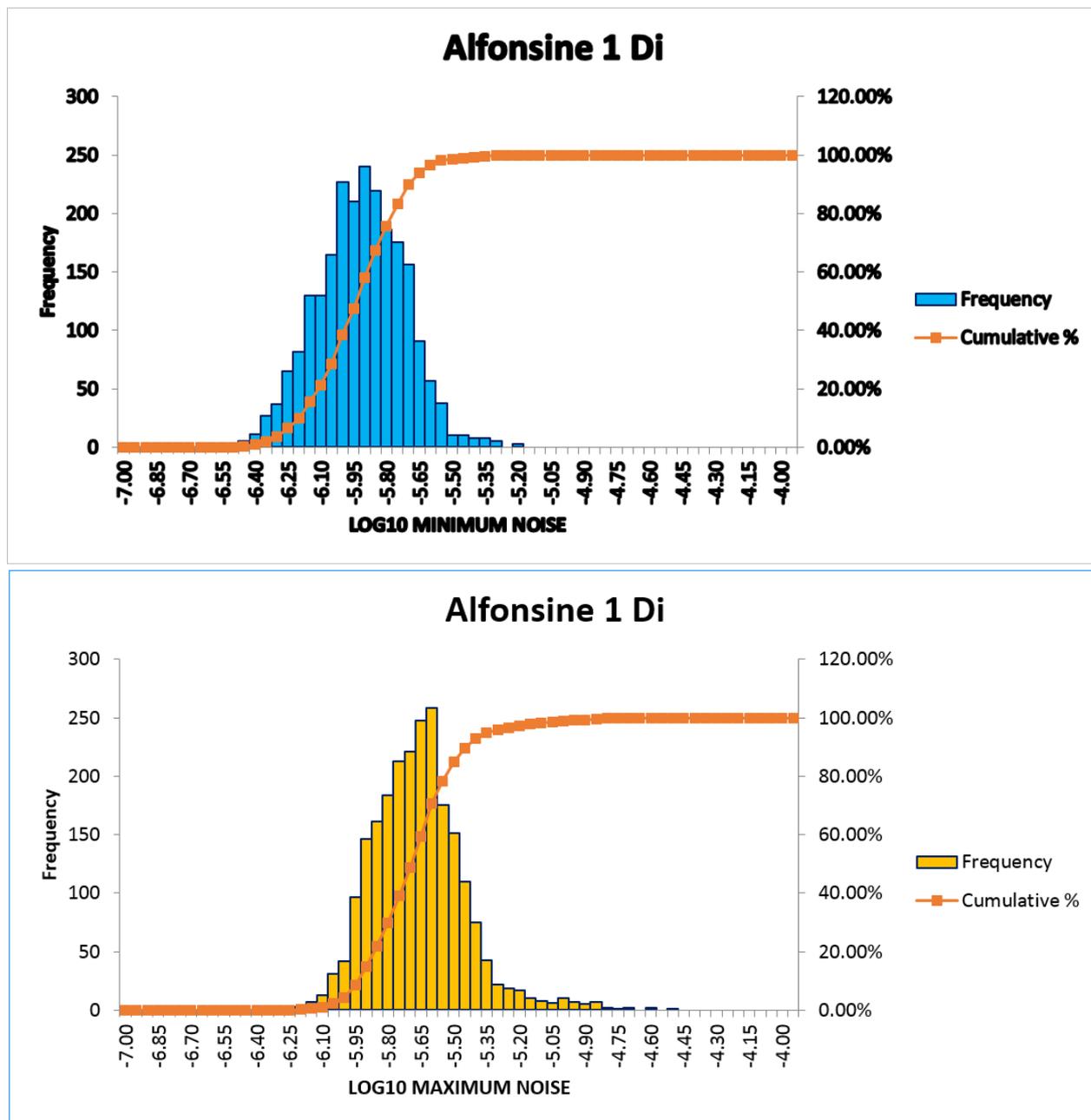


Figura 10a. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 1Di.

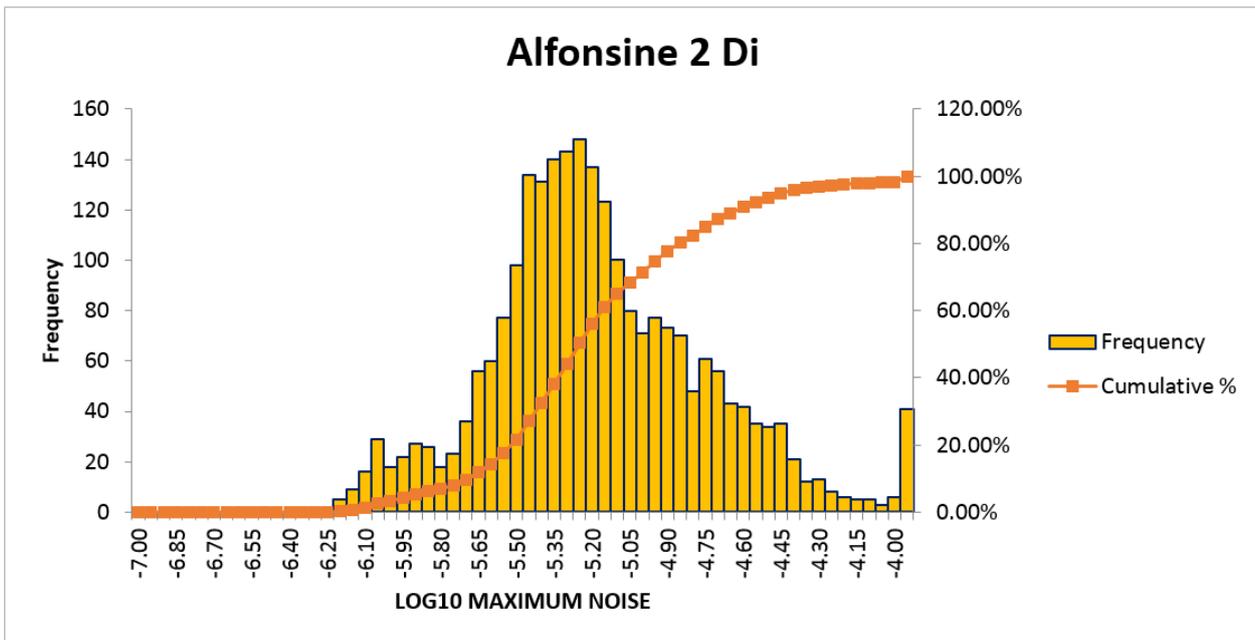
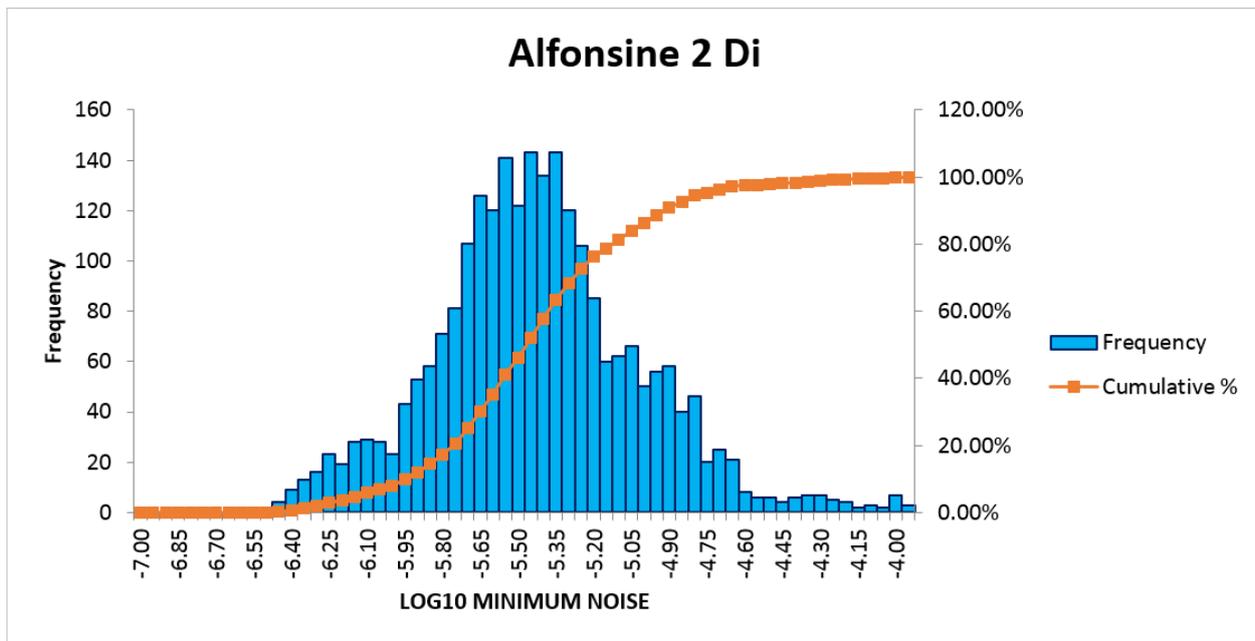


Figura 10b. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 2Di.

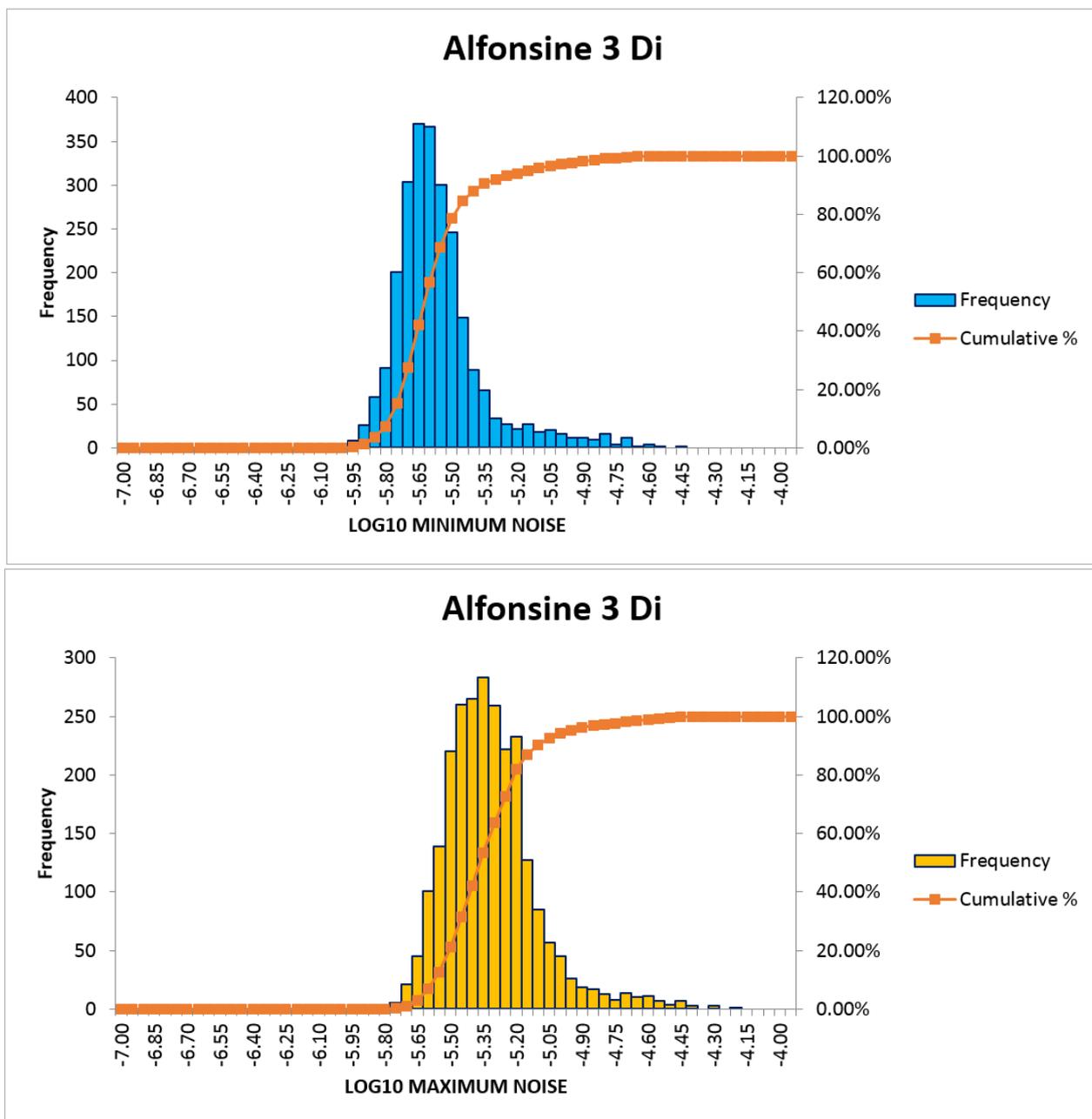


Figura 10c. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 3Di.

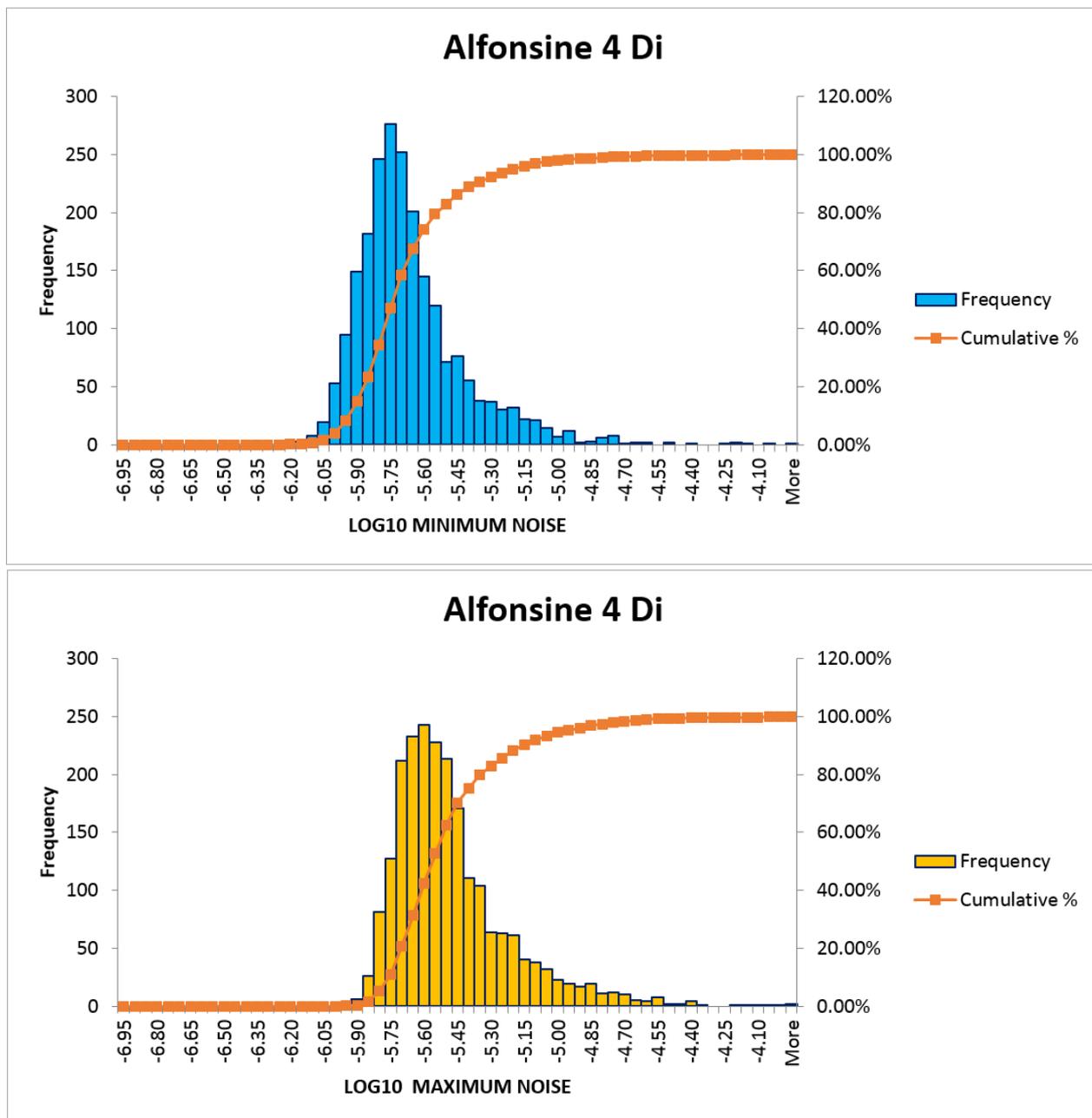


Figura 10d. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 4Di.

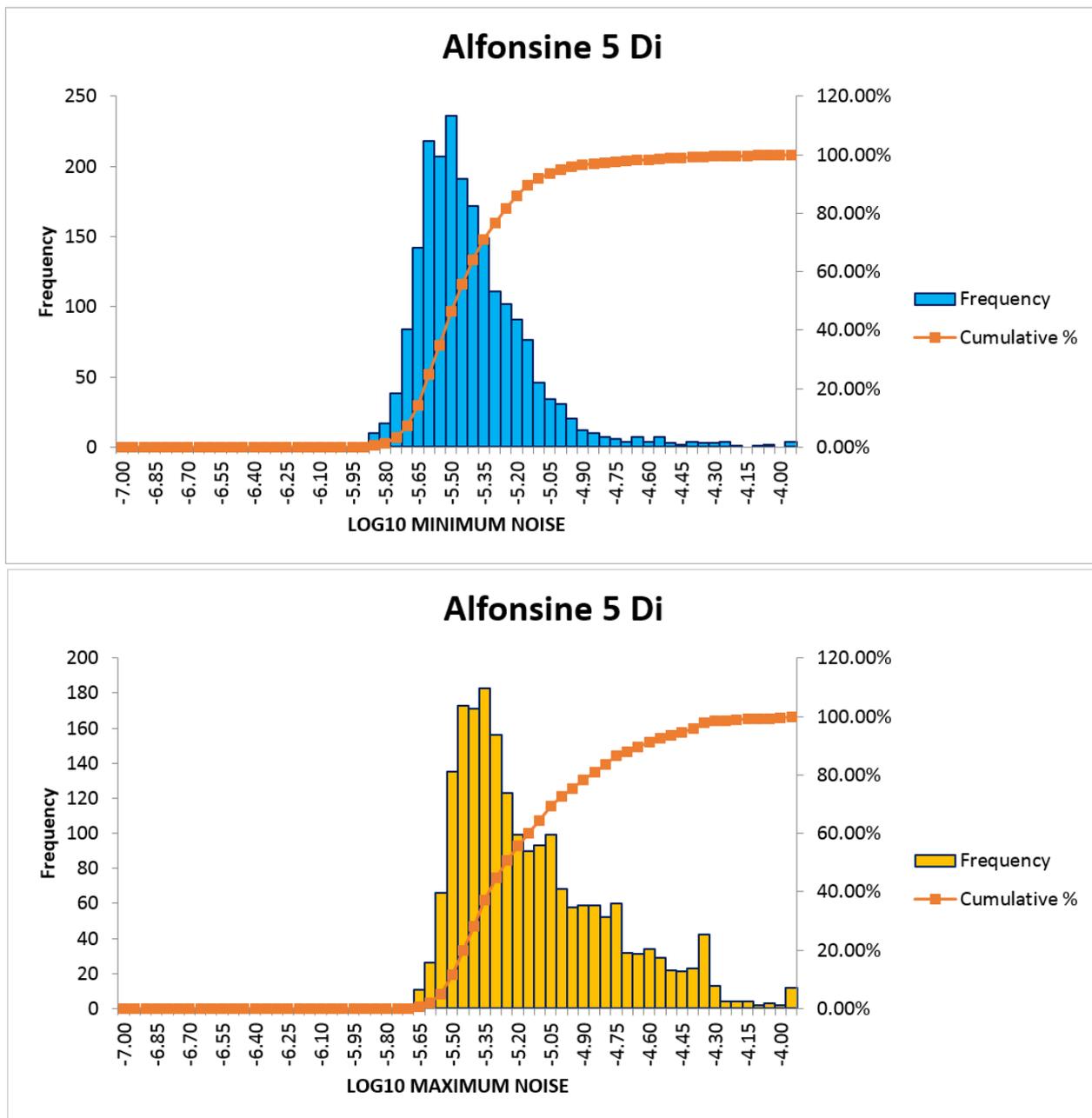


Figura 10e. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 5Di.

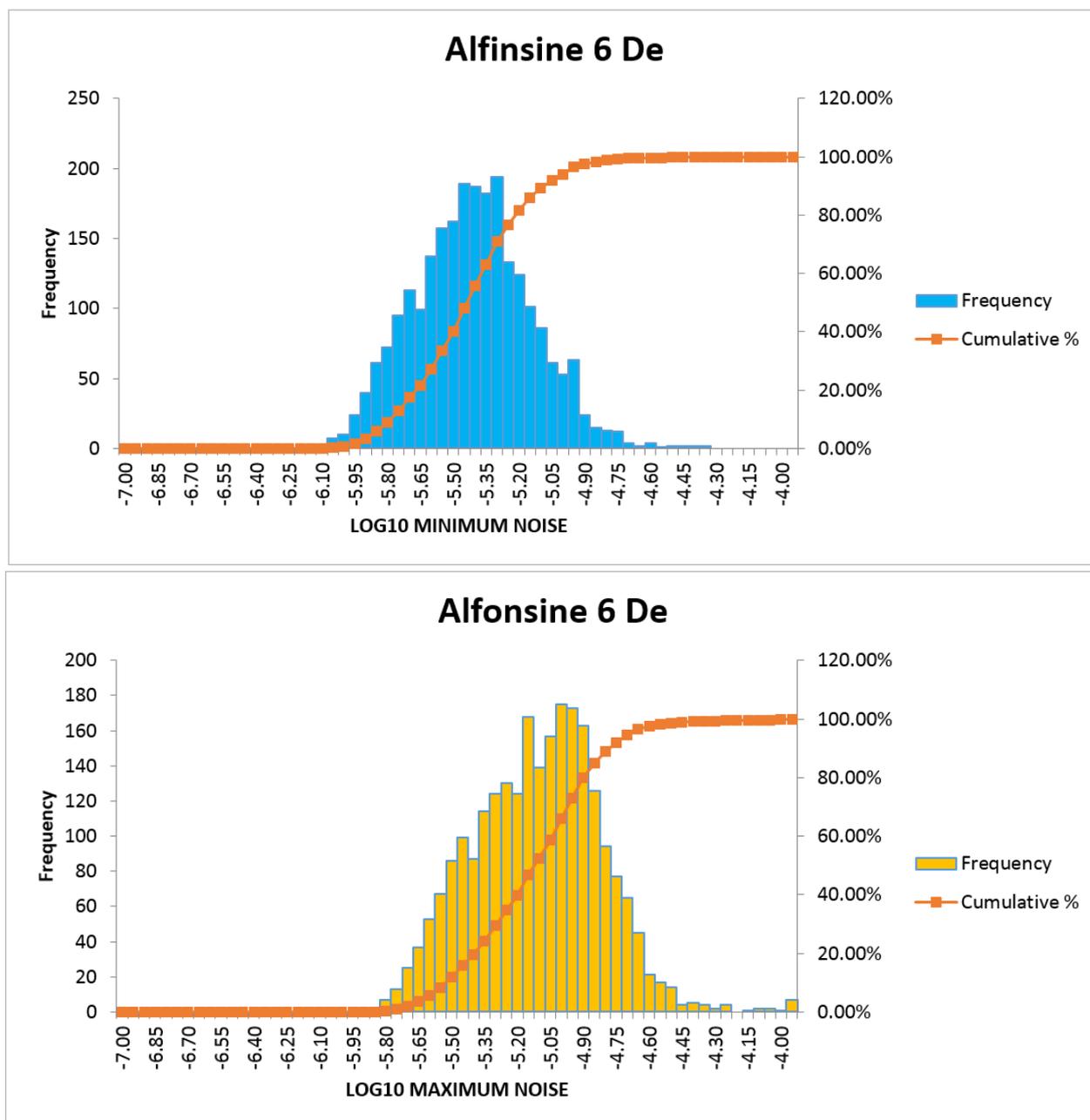


Figura 10f. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 6De.

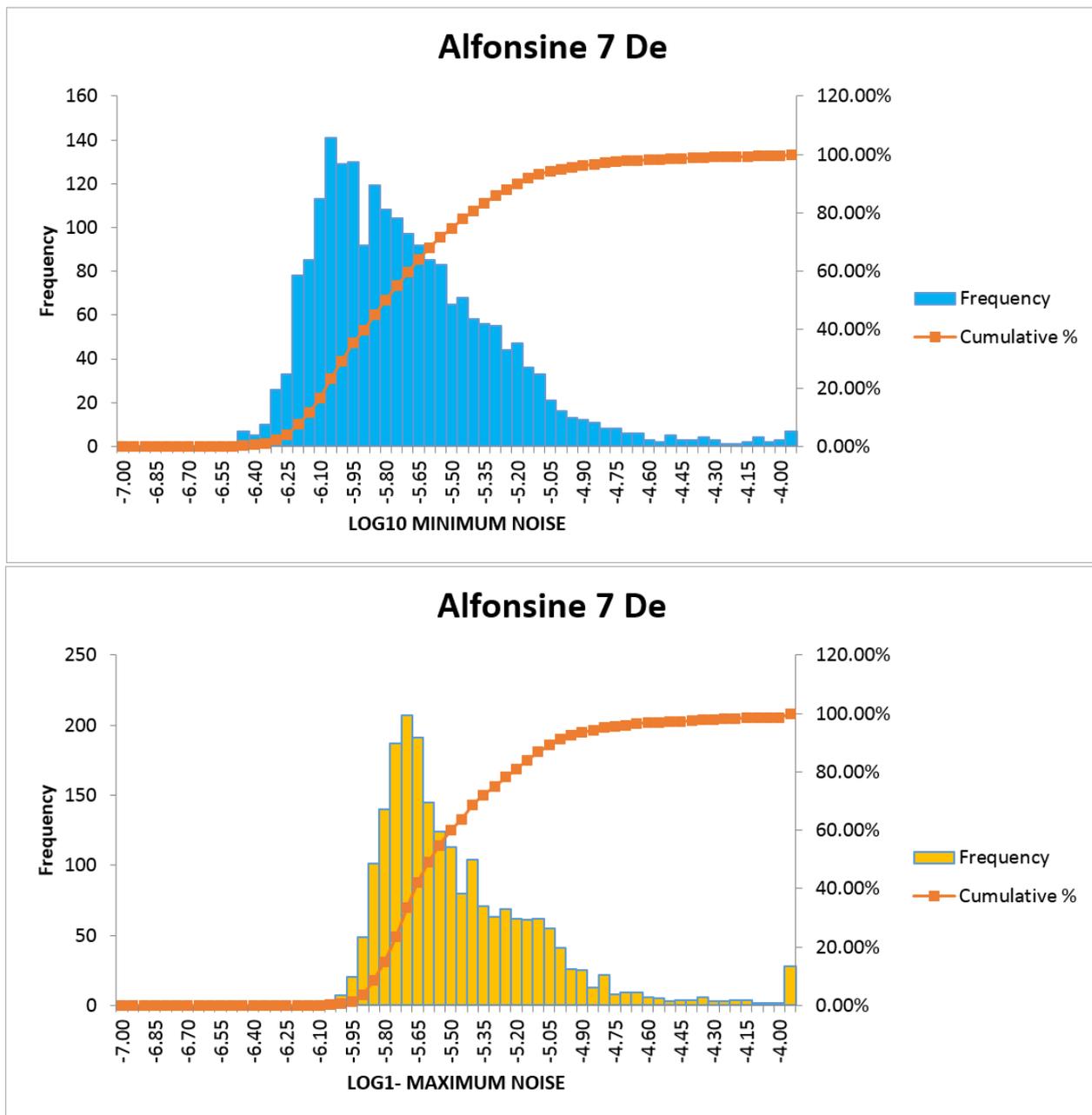


Figura 10g. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 7De.

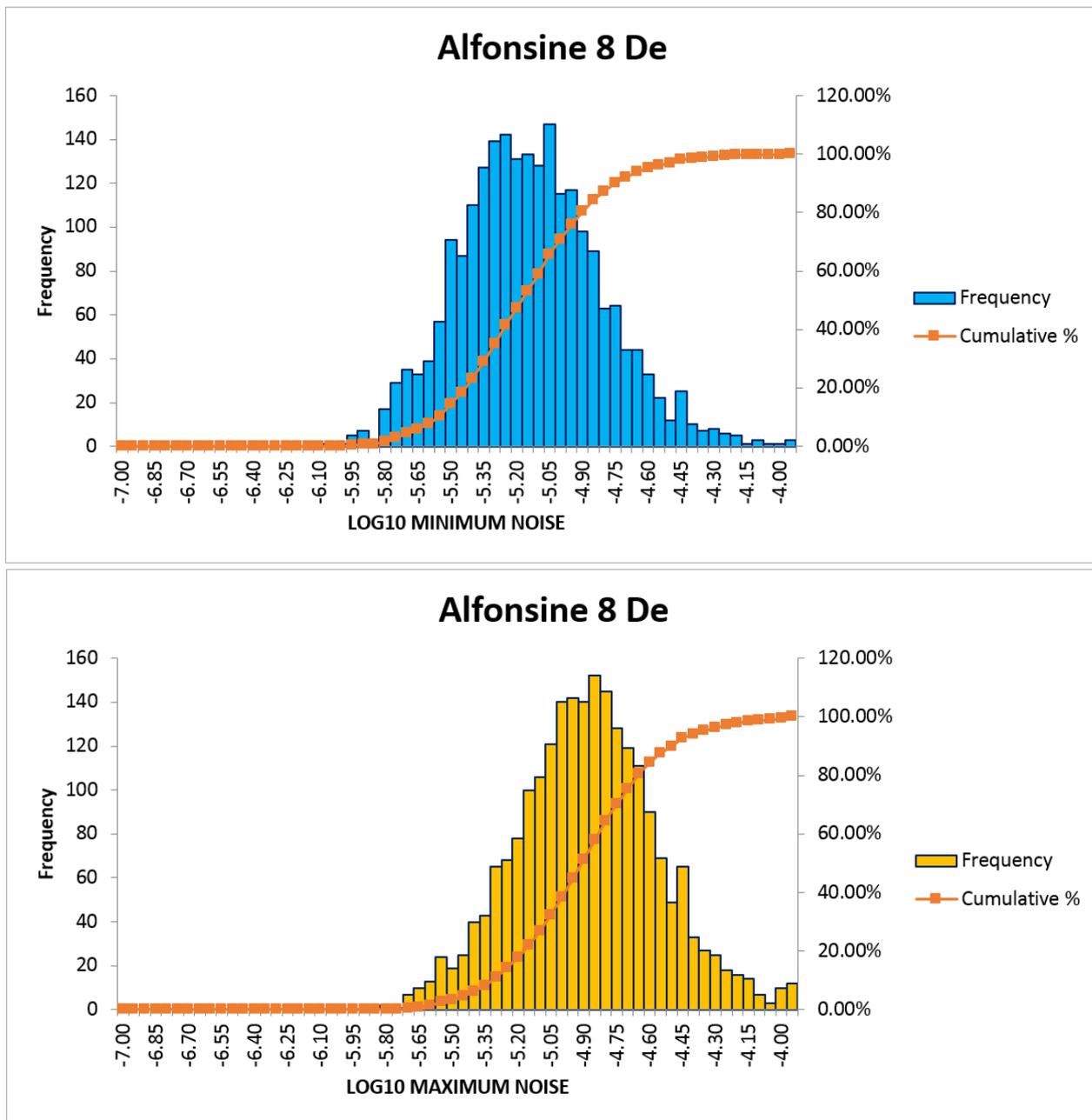


Figura 10h. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 8De.

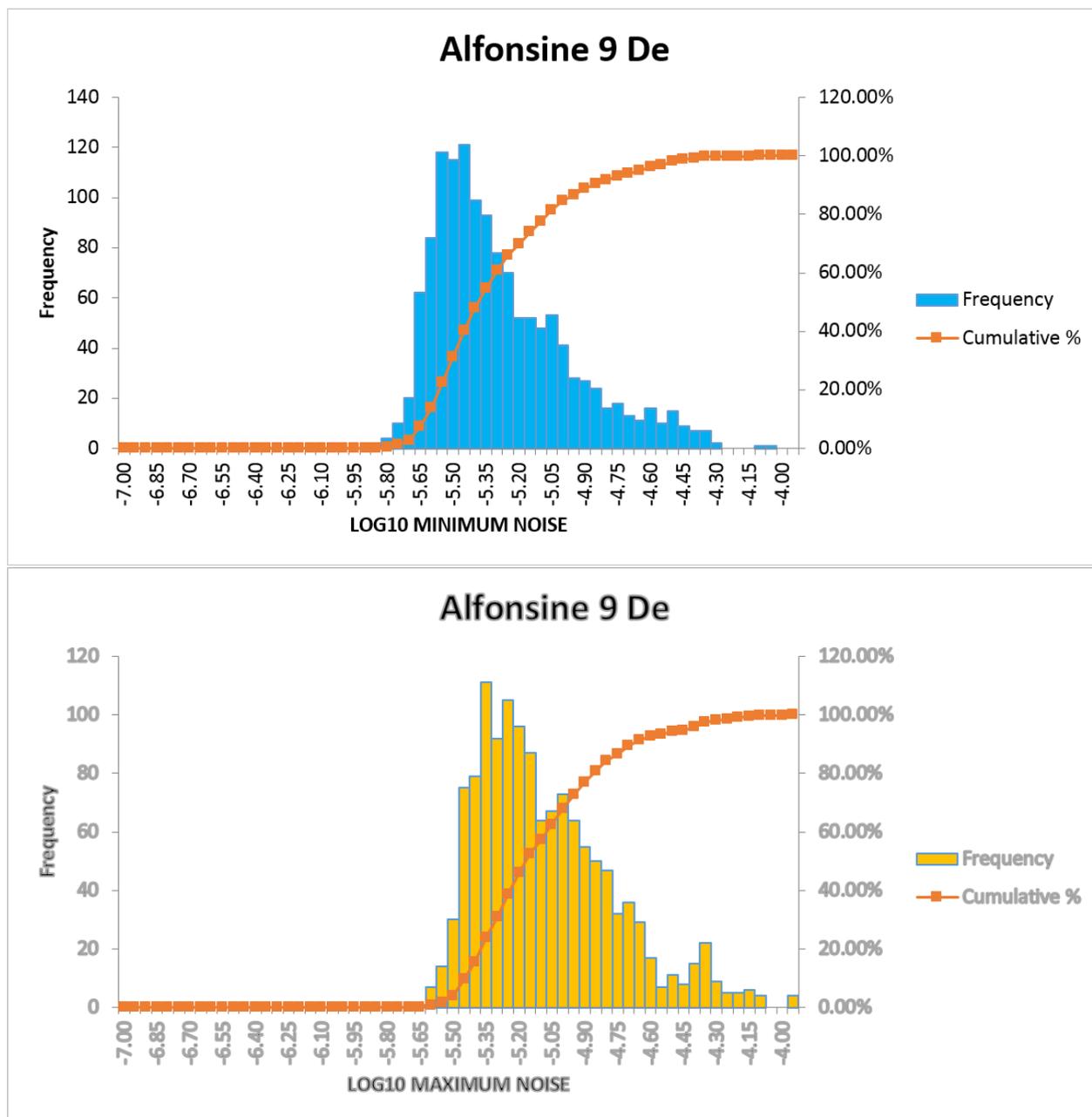


Figura 10i. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 9De.

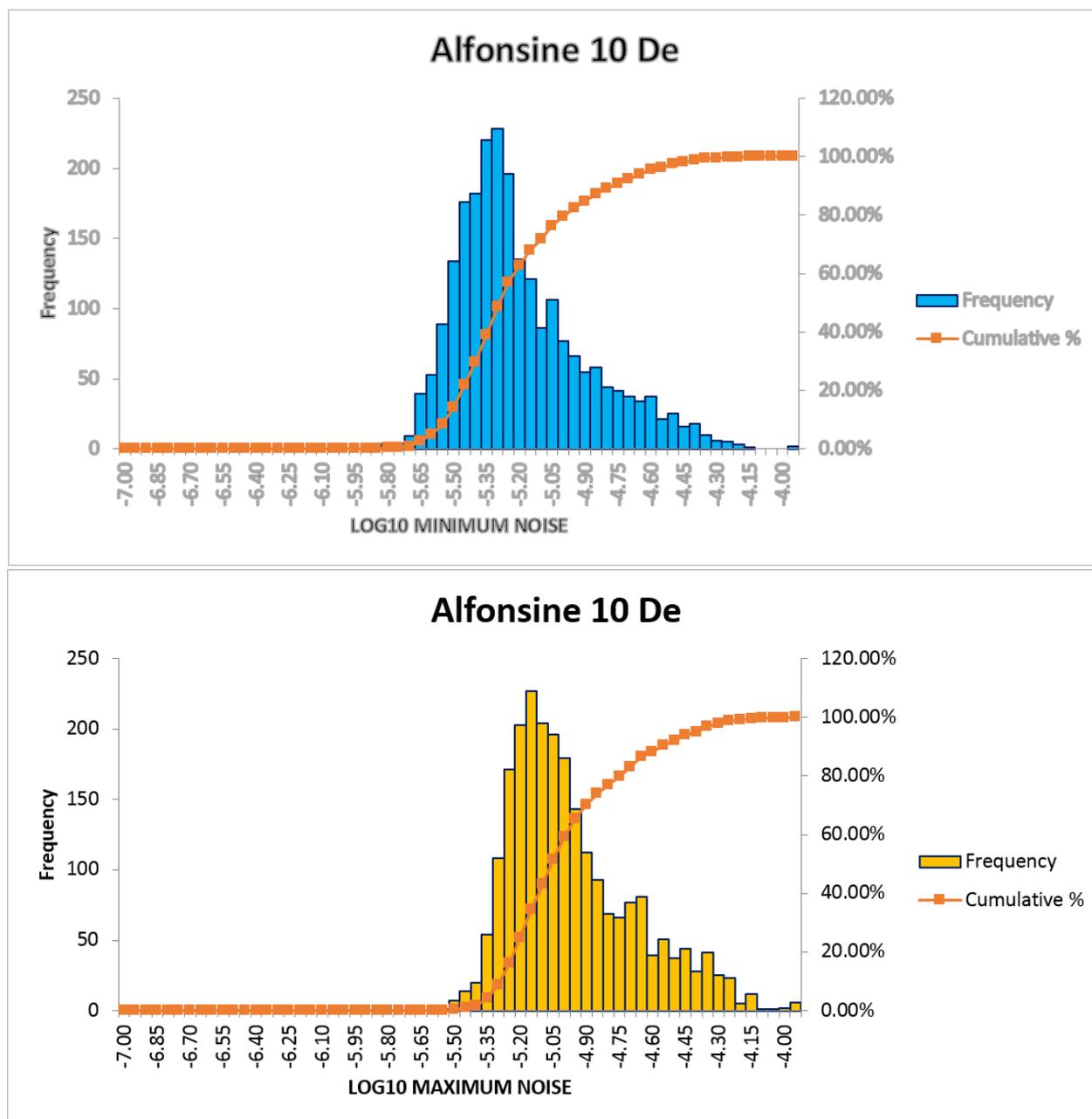


Figura 10I. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 10De.

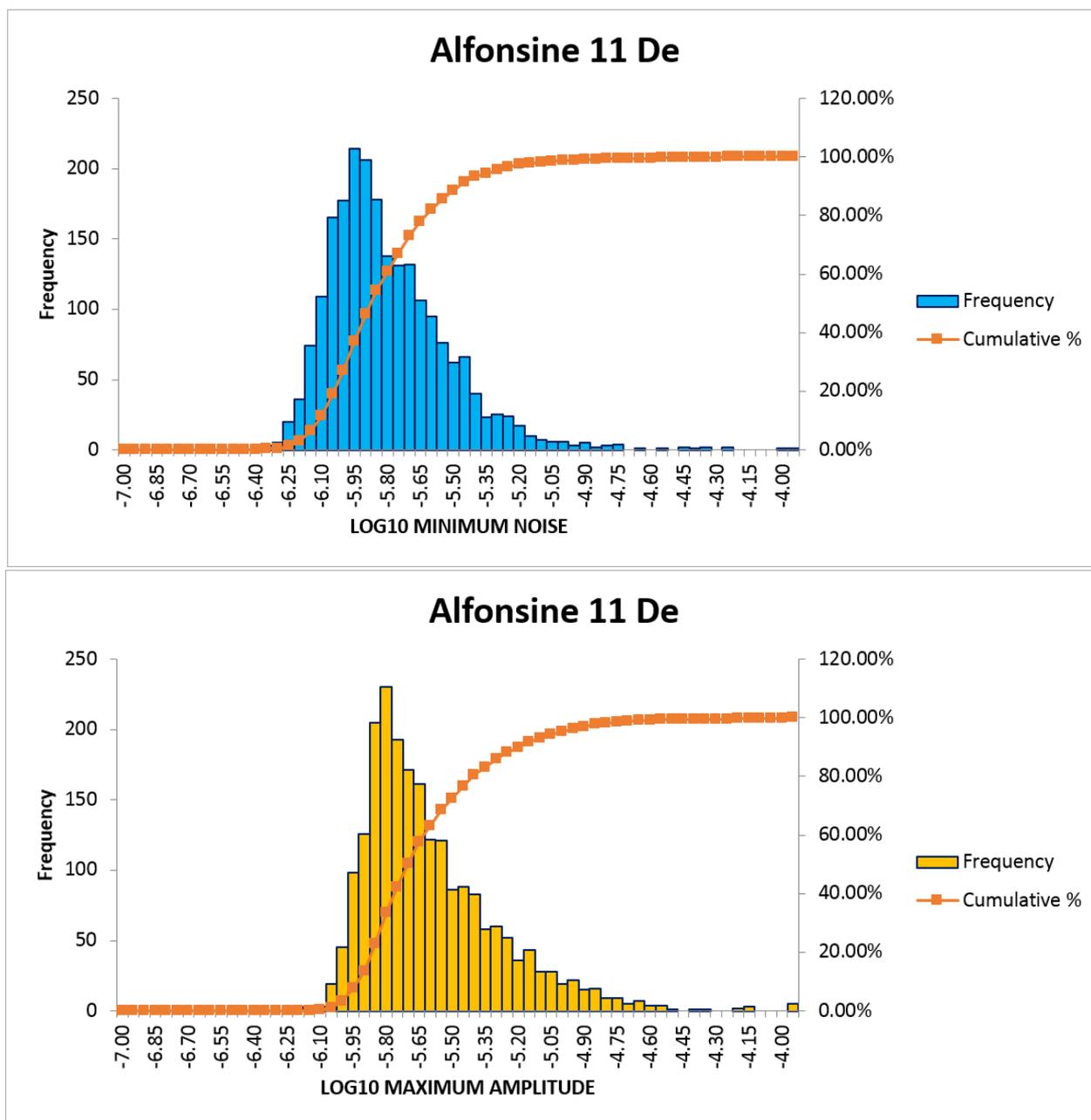


Figura 10m. Istogrammi di frequenza dei valori delle curve di Min_Noise (in alto, in blu) e di Max_Noise (in basso, in arancione). Stazione 11De.

4 SCALE DI MAGNITUDO

Come avvertenza per il lettore, si precisa che le computazioni oggetto della parte seguente adottano la Magnitudo Momento (M_w) quale scala di riferimento delle magnitudo. La Magnitudo Momento viene derivata dal Momento Sismico secondo la relazione: $M_w = 2/3 \log_{10} M_0 - 6$ impiegata per ogni valore di M_0 (Hanks & Kanamori 1979).

In Italia e' frequente l'uso della Magnitudo Locale (M_L) e quindi si e' voluto affiancare questa scala alle Magnitudo Momento (M_w) usata internamente dagli algoritmi.

E' generalmente noto che i due tipi di magnitudo sono in relazione 1: 1 per valori maggiori di 3.

Per magnitudo microsismiche inferiori a 3 (in cui si perde tale relazione 1:1) si e' fatto riferimento ai dati presentati da Boore (1989, fig. 10) e qui riprodotti nella figura seguente. Sostituendo il valore di M_0 con quello di M_w , si ottiene una relazione con andamento curvo alle basse magnitudo. A simili conclusioni giungono Goertz-Allmann et al. (2011) nell'analisi dei terremoti registrati in Svizzera (fig.10).

La relazione finale M_w - M_L adottata nelle rappresentazioni della parte seguente e' riportata in figura 11 (curva blu secondo Boore).

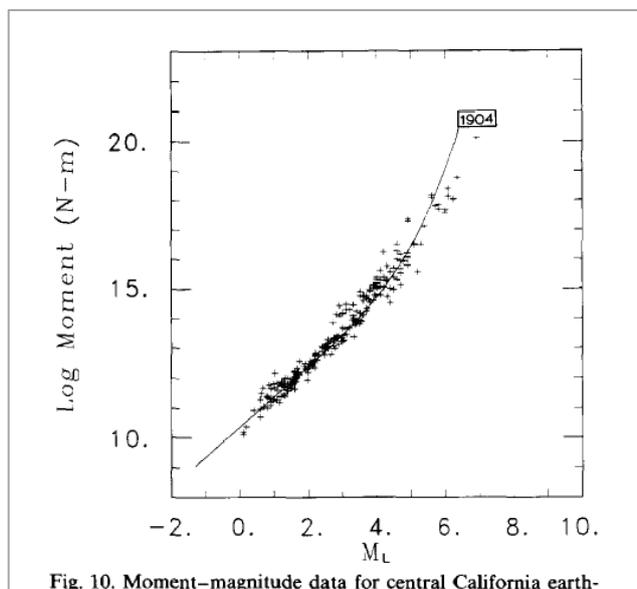


Fig. 10. Moment-magnitude data for central California earth-

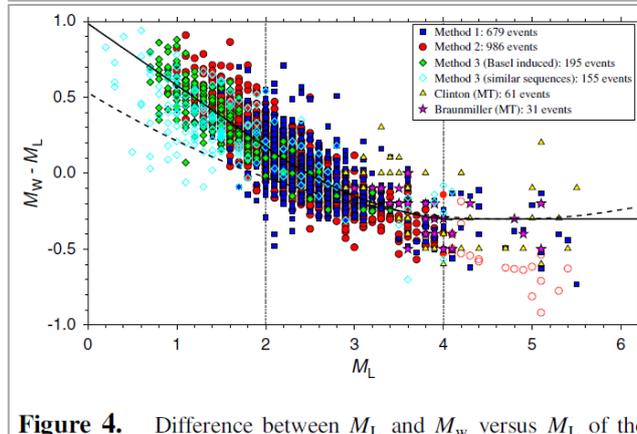


Figure 4. Difference between M_L and M_w versus M_L of the

Figura 11. In alto: relazione tra Momento Sismico M_0 e Magnitudo Locale M_L , da Boore (1989)

In basso: relazione tra Magnitudo Momento M_w e Magnitudo Locale M_L , da Goertz-Allmann et al. (2011)

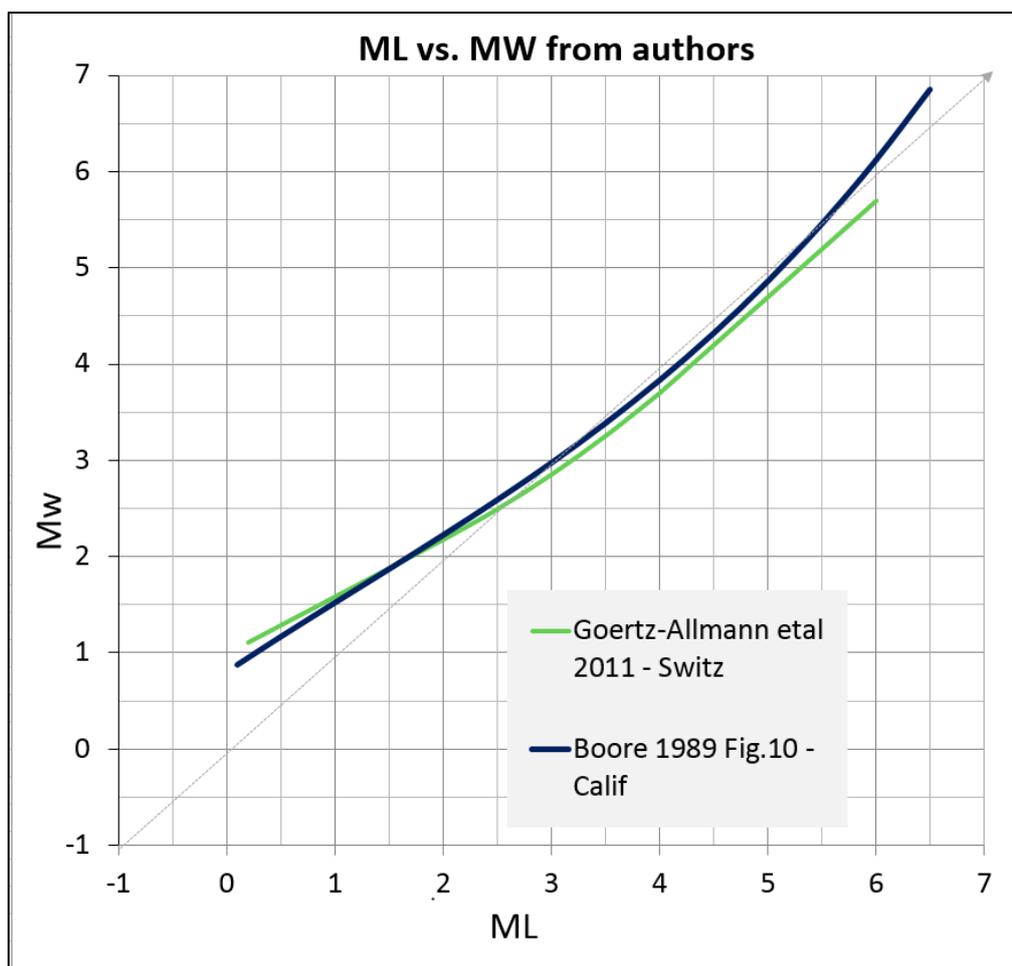


Figura 12. relazione tra Magnitudo Momento M_w e Magnitudo Locale M_L , riscritta dai dati della figura precedente. La relazione di Boore viene impiegata nella parte seguente per affiancare le due scale nelle mappe di magnitudo minima.

PARTE SECONDA:

MODELLIZZAZIONE DELLA RISPOSTA MICROSISMICA

Caratteri generali

Le descrizioni della prima parte esprimono il quadro entro cui viene modellizzata la risposta microsismica della rete in progetto nel campo di Alfonsine.

Noti la geometria dei ricevitori, il rumore ambientale di cui possono risentire e le proprietà del sottosuolo, vengono calcolate e predette le magnitudo minime e le incertezze di localizzazione degli eventi che potranno essere conseguiti dalla rete stessa.

Il software impiegato (Netmod) opera come plug-in in ambiente Petrel ed è sviluppato dal contrattista. La descrizione dei principi che lo costituiscono è riportata da Raymer & Leslie (2011).

Il numero di simulazioni effettuate è relativamente alto in funzione delle diverse condizioni ipotizzate:

- Modello di velocità: fisso per tutti i casi
- Stazioni di ricevitori: due casi a) per il solo Dominio interno (5 stazioni) e b) per entrambi i Domini (11 stazioni)
- Rumore di fondo alle stazioni: si attribuisce un valore di rumore ambientale per ogni stazione alle seguenti condizioni:
 - a) rumore minimo per entrambi i domini
 - b) rumore massimo per entrambi i domini
 - c) combinazione di rumore massimo in tre stazioni e basso rumore ipotizzato in 2 stazioni profonde nel solo dominio interno
 - c) combinazione di rumore massimo ridotto di 10 dB in 5 stazioni profonde nel solo dominio interno

Nota: per ognuno di questi casi, l'uso di livelli di rumore differenziati per ogni stazione può portare a mappe di magnitudo minima dall'aspetto irregolare. Ciò è spiegato schematicamente in figura 12. In questa mappa, i cerchi esprimono l'area di influenza e il 'peso' delle diverse stazioni a seconda del rumore inserito. Cerchi ampi sono propri di stazioni con basso rumore ambientale. L'intersecazione di più cerchi può portare a interferenze costruttive di forma irregolare.

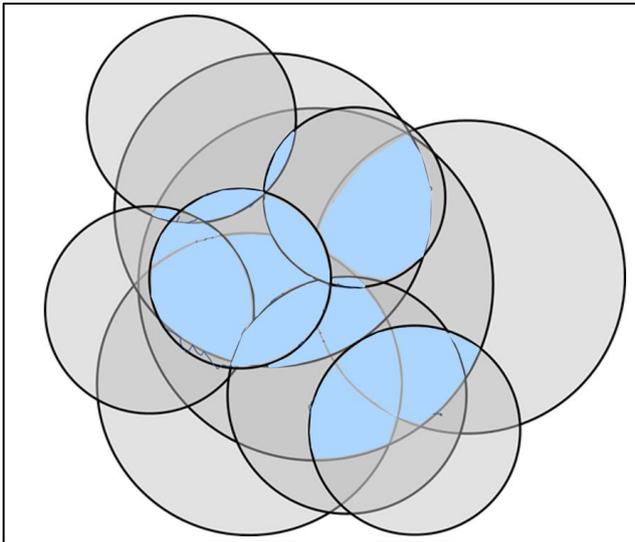


Figura 13 Interpretazione grafica mostrante come l'interferenza di più stazioni a diverso rumore può portare a distribuzioni irregolari delle magnitudo risultanti.

La predizione dell'ampiezza del segnale tiene conto di più fattori coinvolti (Raymer & Leslie, 2011):

Effetti sorgente

Si assume un meccanismo all'origine in cui l'energia prodotta si diffonde con irraggiamento sferico. Le caratteristiche del momento sismico iniziale vengono modellizzate secondo modelli teorici (Brune 1970, Madariaga 1976) che ricostruiscono lo spettro spostamento-ampiezza (in questa modellizzazione si assume uno "stress drop" costante di 1MPa).

Effetti percorso

Il percorso sismico sorgente – ricevitore e' simulato da opportuno ray-tracing che tiene conto della divergenza geometrica, perdita di energia per riflessione e trasmissione ai contatti di strato e attenuazione intrinseca funzione del valore di Q.

Ampiezza al ricevitore

L'ampiezza al ricevitore e' condizionata dal rapporto segnale-disturbo sulle tracce (S/N ratio fisso al valore costante di 5) e dal rumore ambientale di ogni stazione descritto precedentemente.

La somma dei tre effetti porta a definire le magnitudo minime registrabili dalle diverse configurazioni di una determinata rete, visualizzabili in forma di mappe.

- **Mappa di detezione:** la magnitudo minima e' riconoscibile su un numero minimo di 3 stazioni; in questo modo viene simulato il caso in cui un evento sismico viene rilevato (detettato) ma non localizzato con affidabilita'.
- **Mappa di localizzabilita':** la magnitudo minima e' riconoscibile su un numero minimo di 4 stazioni; in questo modo viene simulato il caso in cui un evento sismico viene rilevato e localizzato con sufficiente affidabilita'.
- **Mappe di incertezze di localizzazione:** la localizzazione degli eventi e' associabile a barre di errore in funzione, oltre che dei parametri sopra descritti, anche dell'accuratezza del time picking. Le barre di errore vengono calcolate sia sul piano orizzontale che verticale.

Le simulazioni (e le mappe conseguenti) vengono effettuate alle profondita' di 1500, 3000, 5000 e 11000 m (quest'ultima per il solo dominio esteso). Per ogni livello la mappa si estende nel piano XY in un quadrato di 15 km di lato per il dominio interno e 21 km di lato per il dominio esteso. Al suo interno ogni quadrato e' costituito da celle unitarie 25x25 m, ognuna delle quali ospita un potenziale punto sorgente.

Figure 14 – 20

**Magnitudo minime per sola detezone (3 ricevitori)
Rumore di fondo minimo per singola stazione
Dominio interno ed esteso
Mappe a diversi livelli di profondita'**

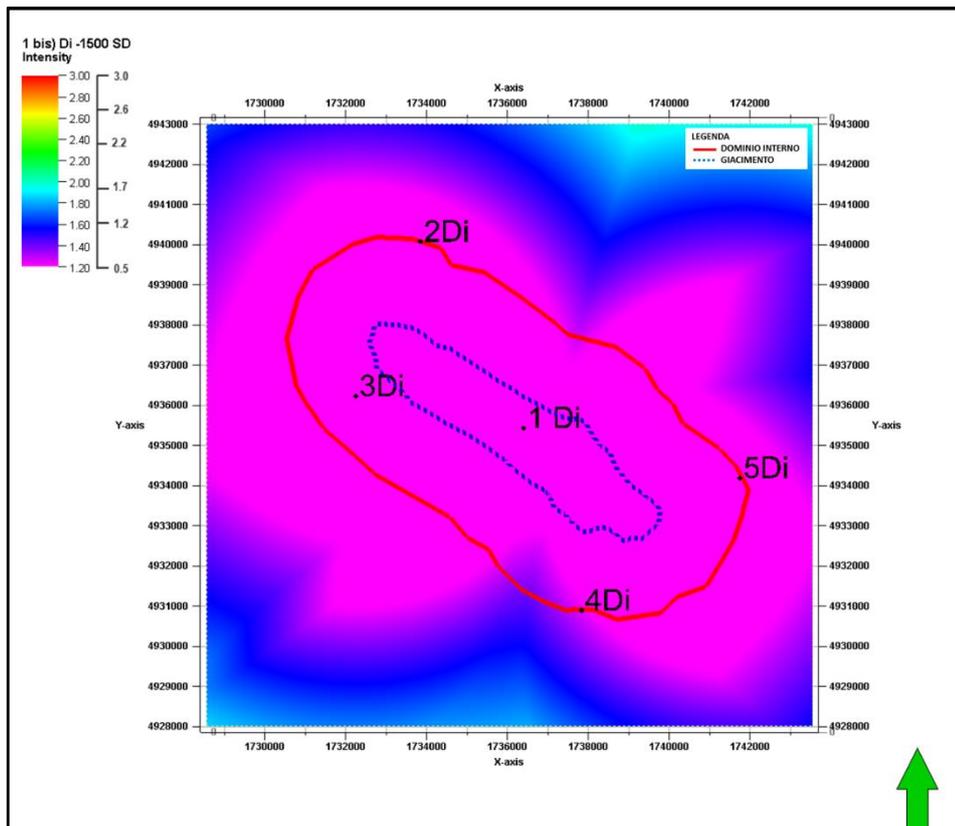


Figura 14. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 1500 m

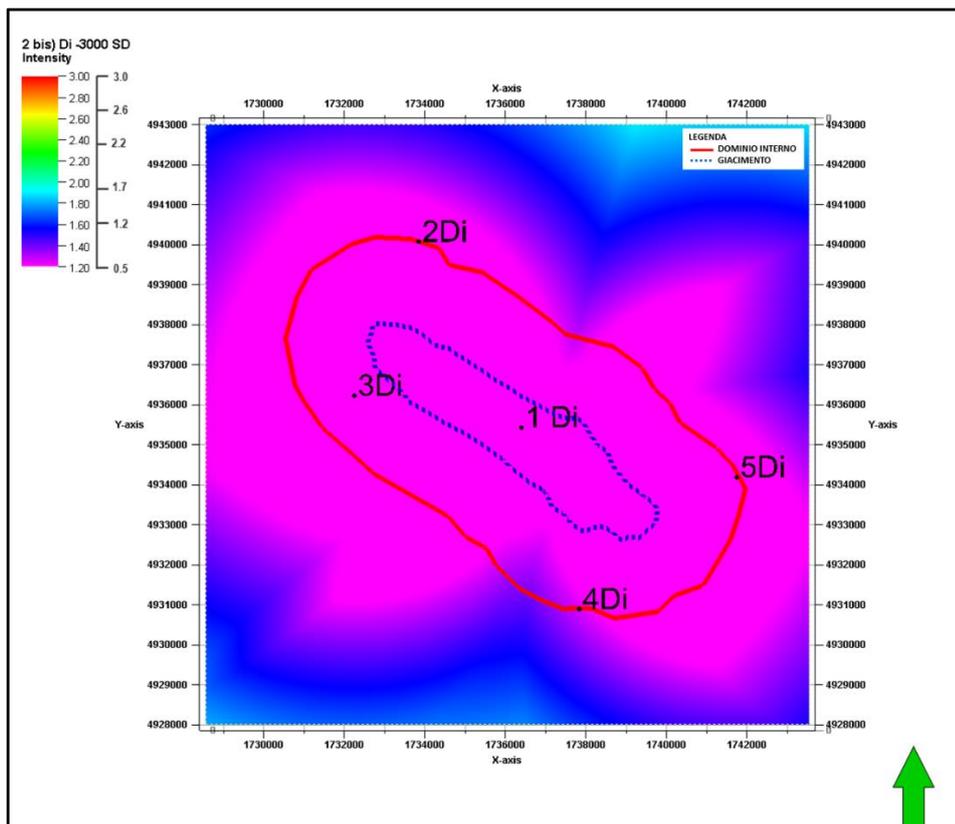


Figura 15. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 3000 m

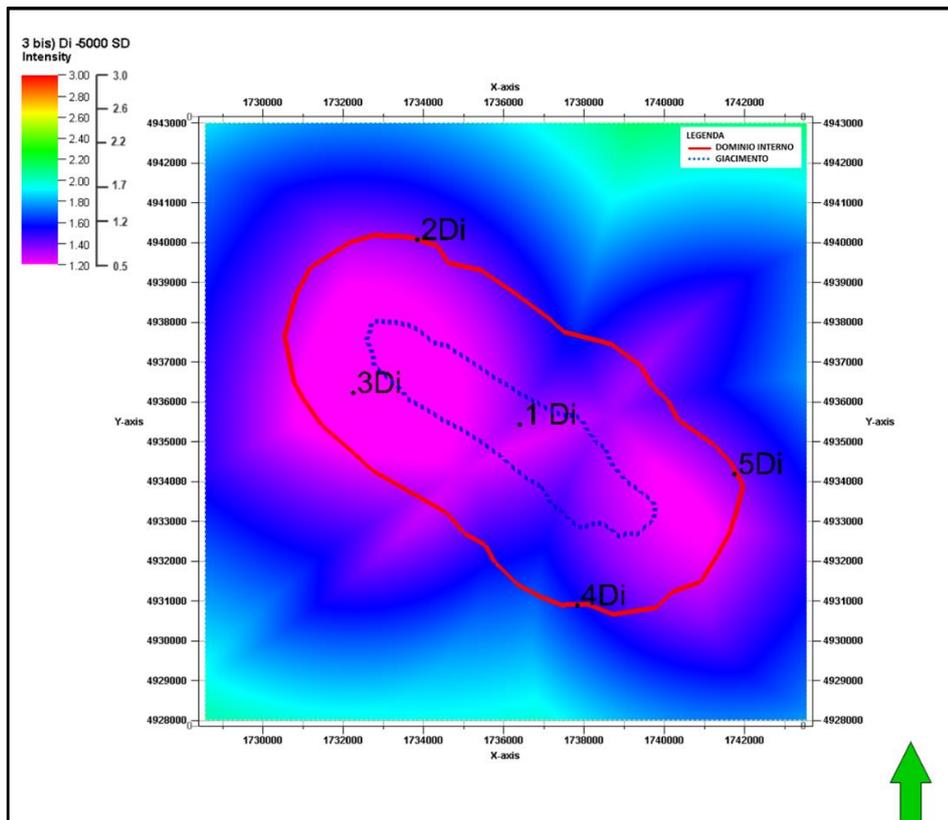


Figura 16. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 5000 m

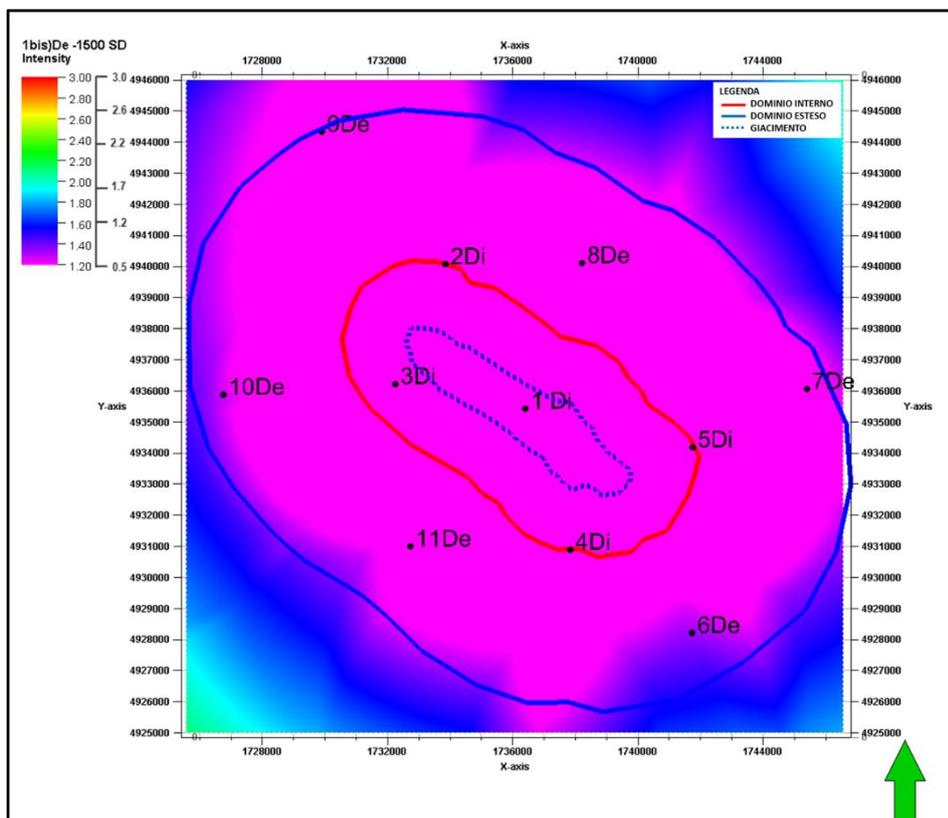


Figura 17. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 1500 m

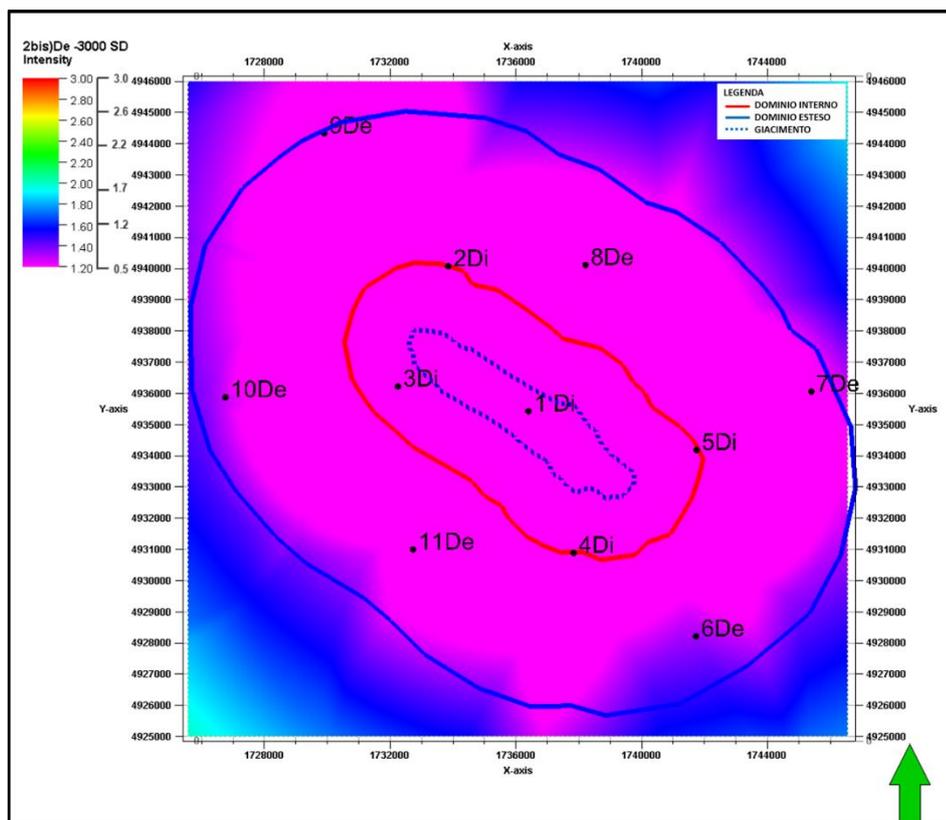


Figura 18. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 3000 m

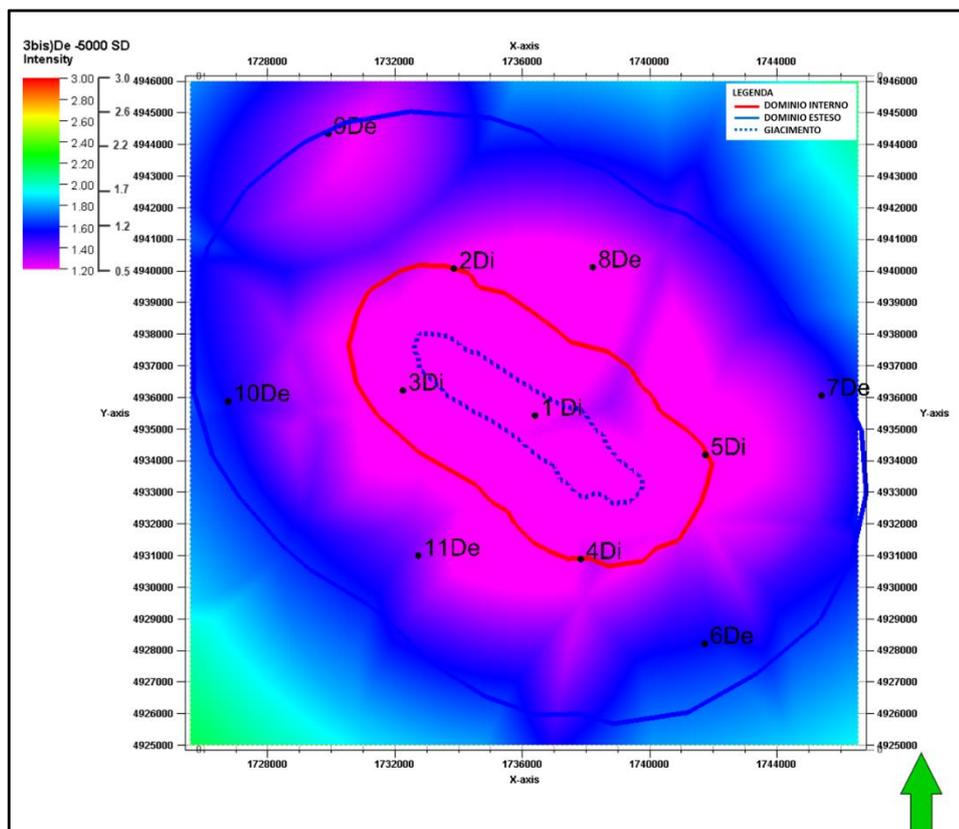


Figura 19. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 5000 m

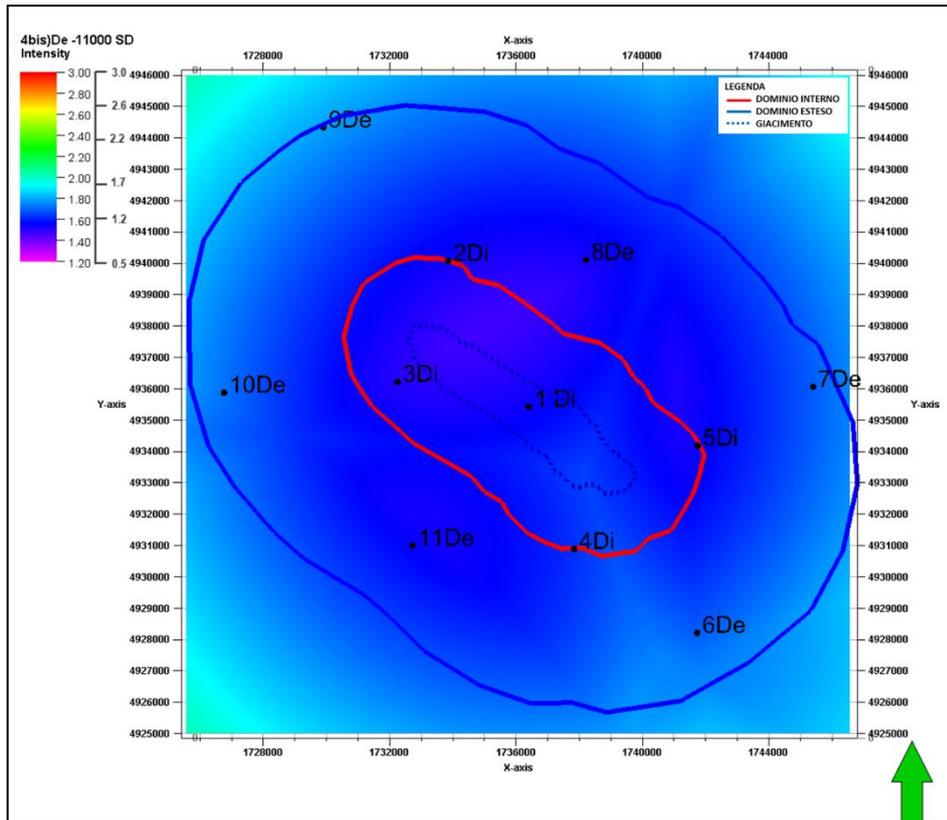


Figura 20. Mappa di detezione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 11000 m

Figure 21 – 27

**Magnitudo minime per sola detezone (3 ricevitori)
Rumore di fondo massimo per singola stazione
Dominio interno ed esteso
Mappe a diversi livelli di profondita'**

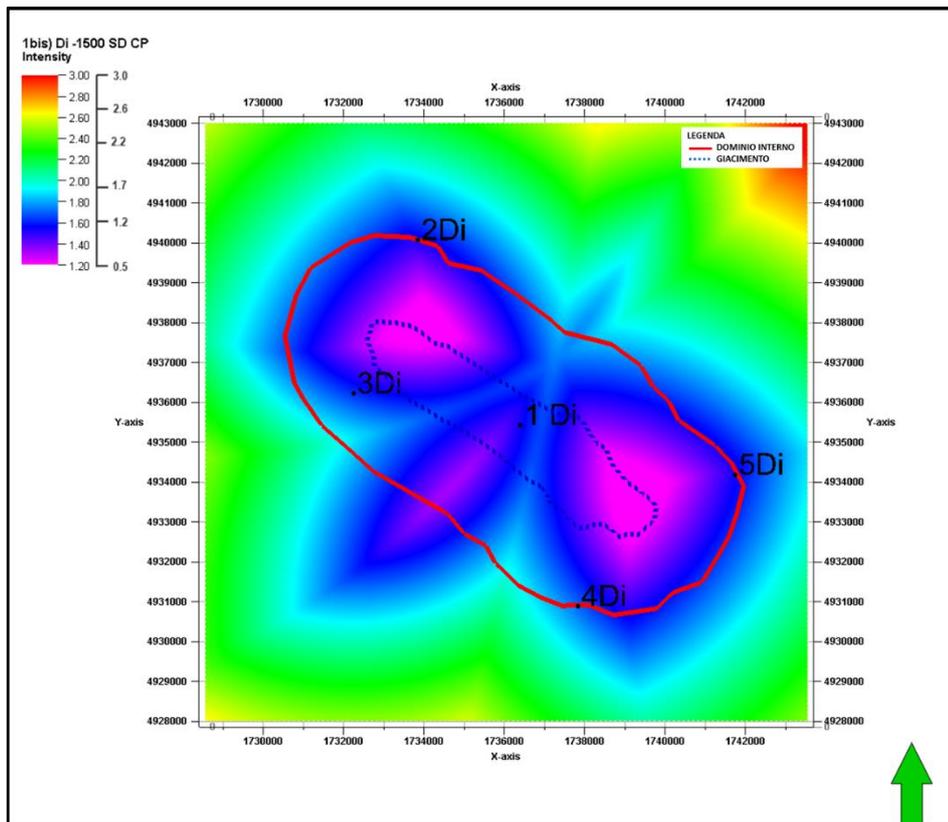


Figura 21. Mapa de deteção com ruído de fundo máximo alle singole stazioni. Dominio interno: profondità' 1500 m

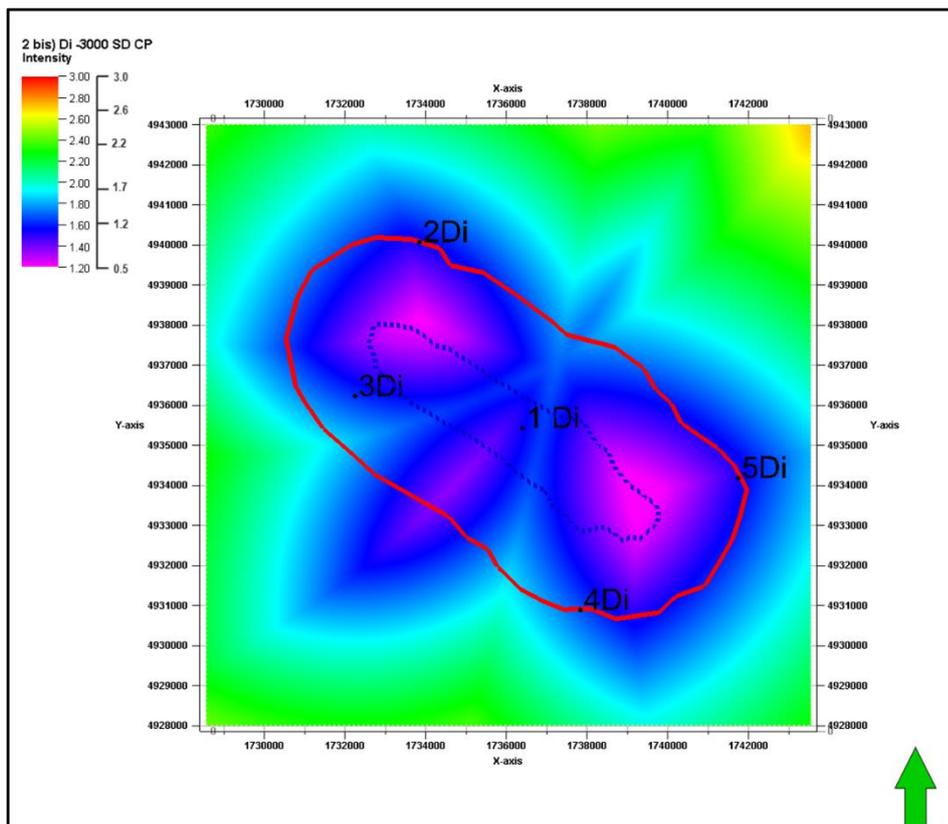


Figura 22. Mapa de deteção com ruído de fundo máximo alle singole stazioni. Dominio interno: profondità' 3000 m

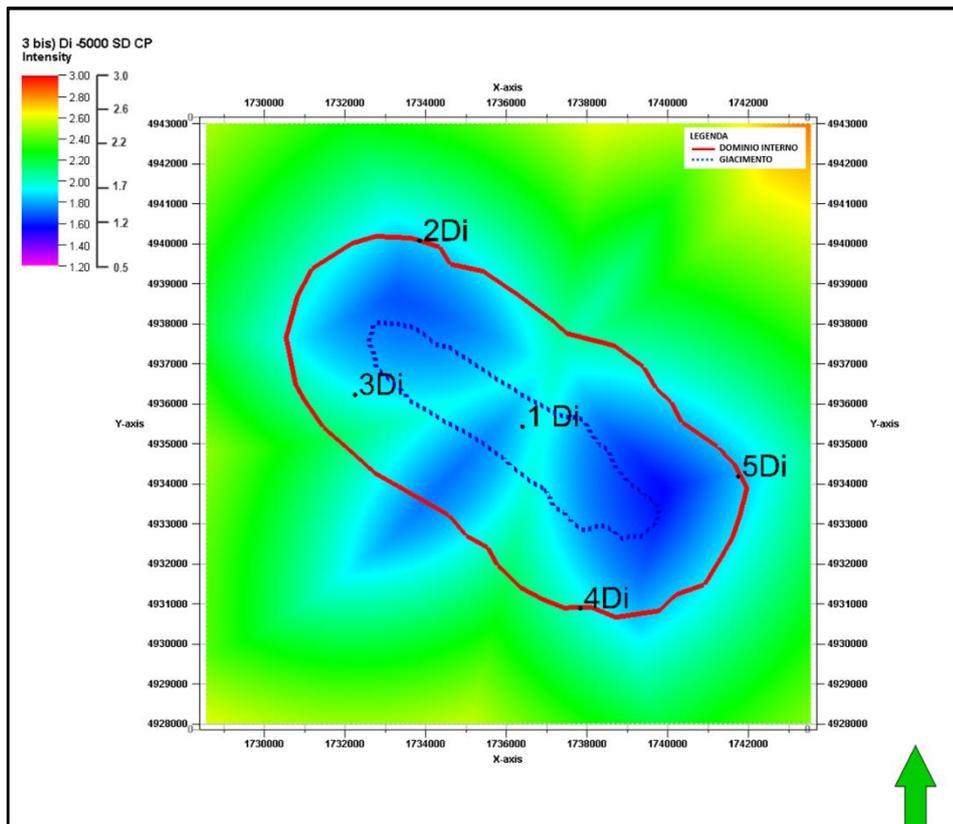


Figura 23. Mapa di deteção con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profundita' 5000 m

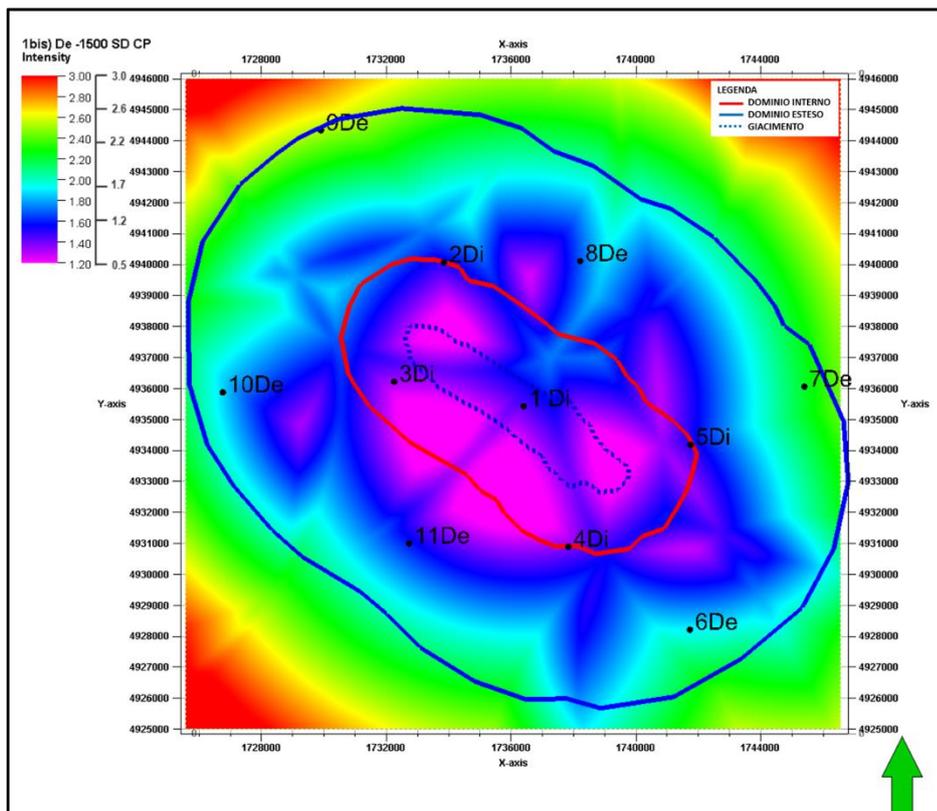


Figura 24. Mapa di deteção con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profundita' 1500 m

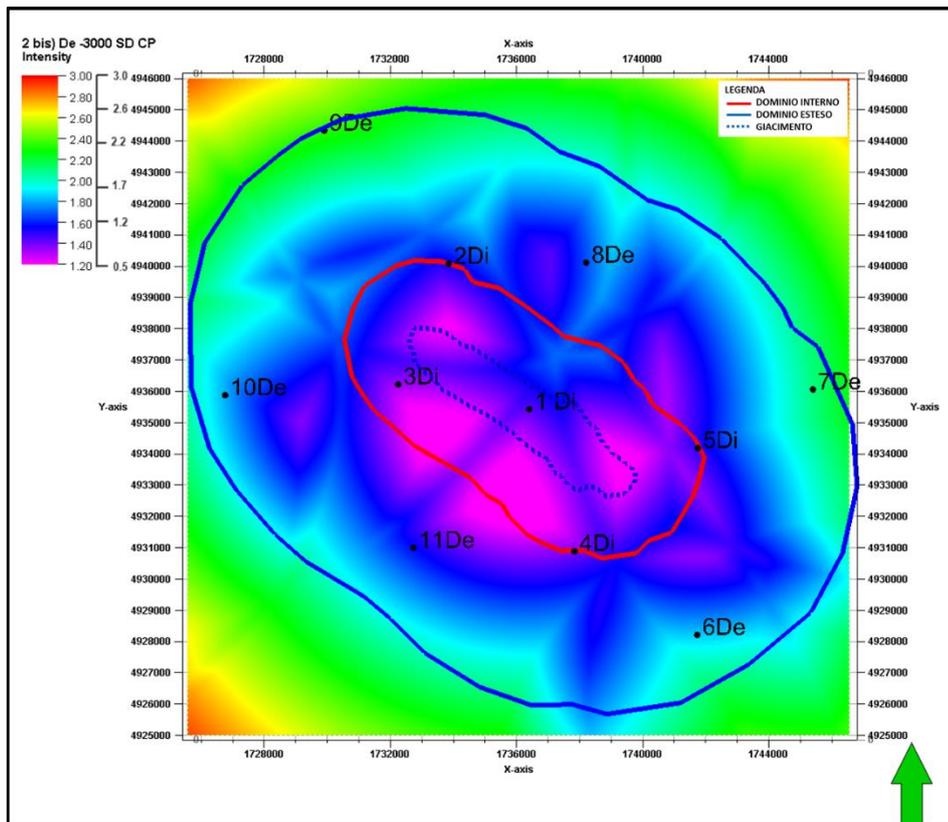


Figura 25. Mapa de deteção com ruído de fundo máximo alle singole stazioni. Dominio esteso: profundita' 3000 m

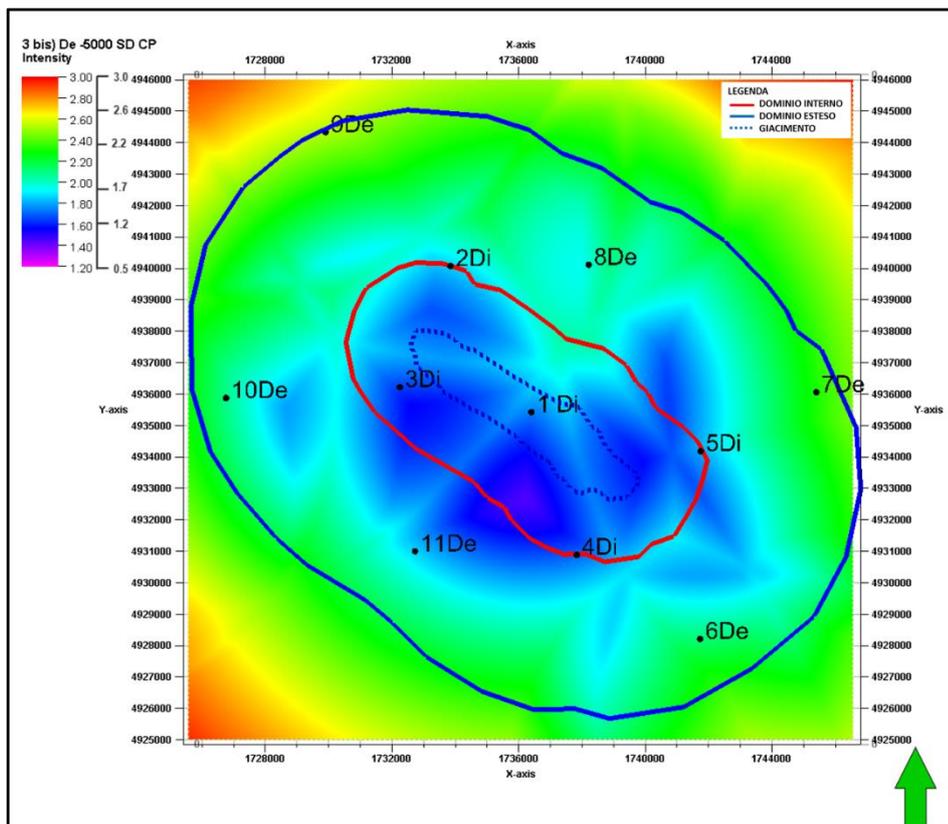


Figura 26. Mapa de deteção com ruído de fundo máximo alle singole stazioni. Dominio esteso: profundita' 5000 m

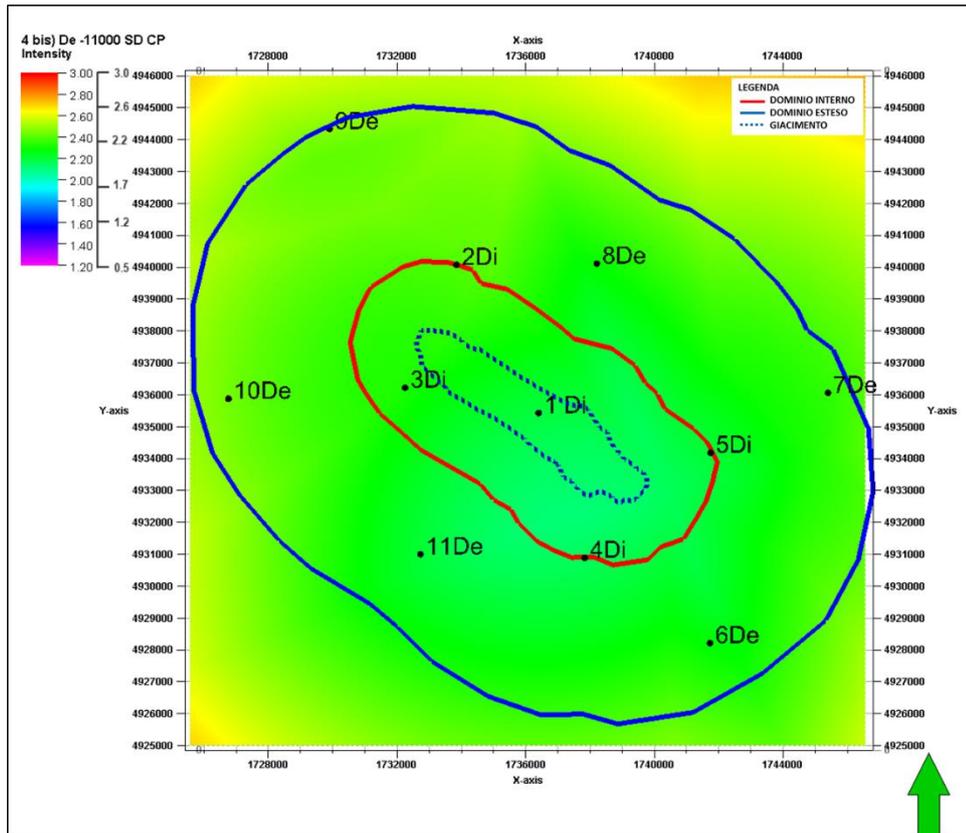


Figura 27. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 11000 m

Figure 28 – 30**Magnitudo minime per sola detezione (3 ricevitori)
Rumore di fondo massimo ridotto in due stazioni
Dominio interno
Mappe a diversi livelli di profondita'**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni 3Di e 5Di del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondita' 100 m. Il loro livello di rumore ambientale e' desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di quiete. Le rimanenti stazioni 1Di, 2Di e 4Di vengono ipotizzate sul piano campagna e sono associate al loro massimo rumore ambientale

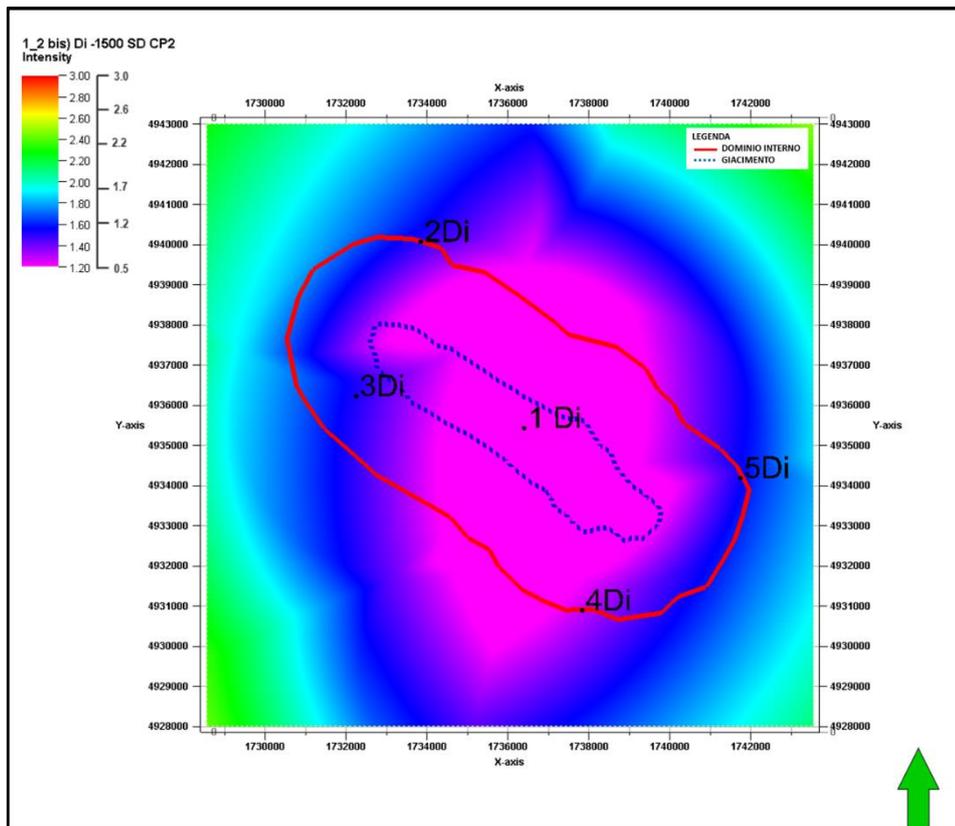


Figura 28. Mapa de deteção con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondità 1500 m

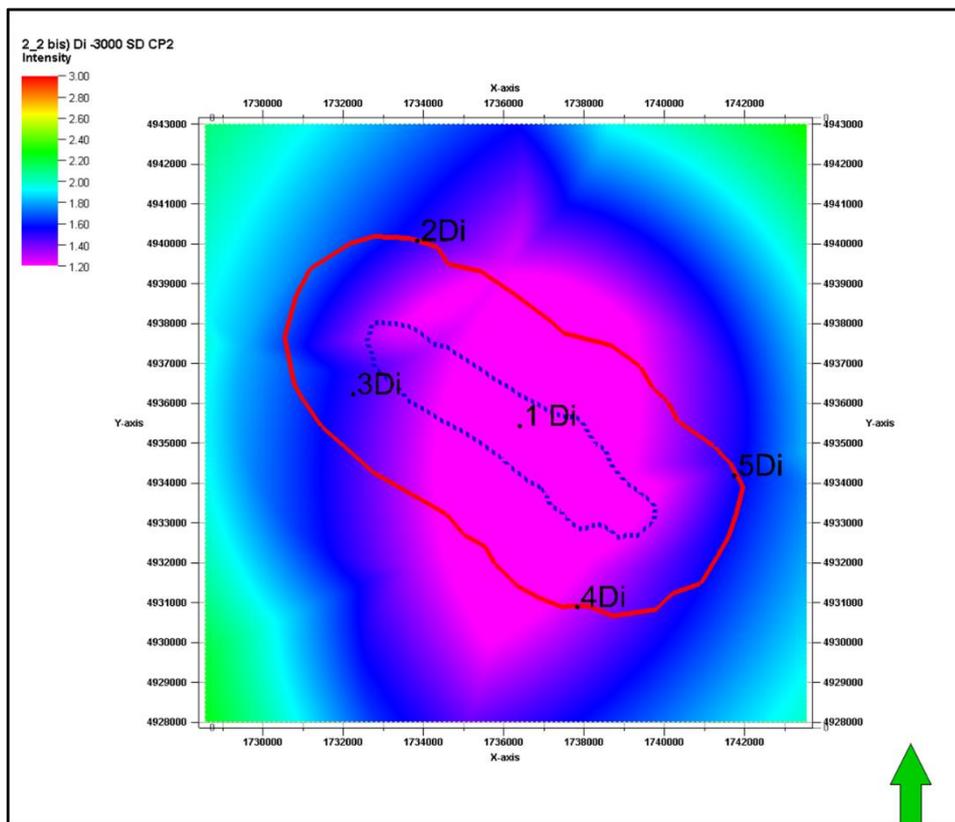


Figura 29. Mapa de deteção con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondità 3000 m

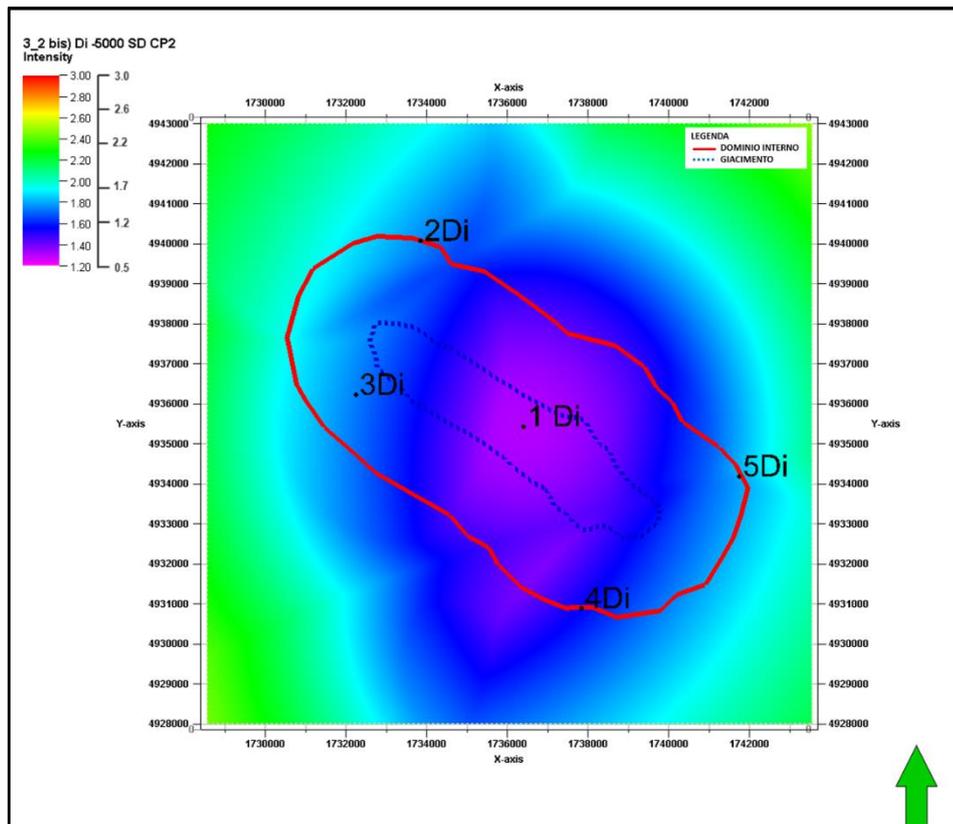


Figura 30. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondita' 5000 m

Figure 31 – 37

Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori)
Rumore di fondo minimo per singola stazione
Dominio interno ed esteso
Mappe a diversi livelli di profondita'

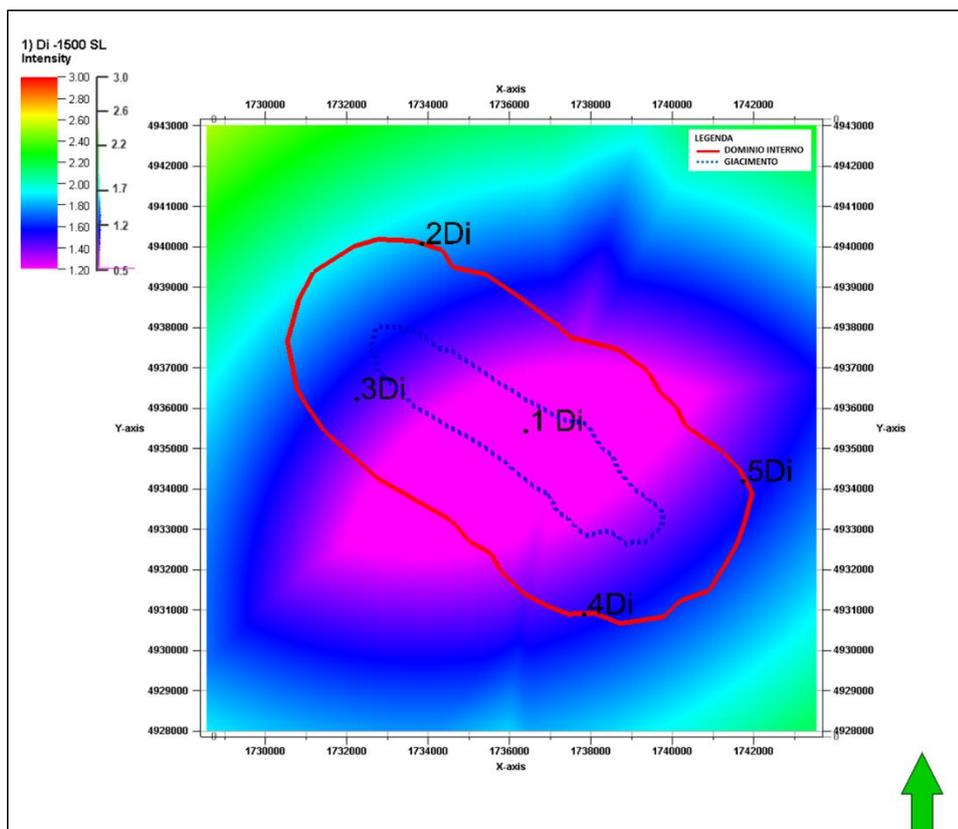


Figura 31. Mappa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 1500 m

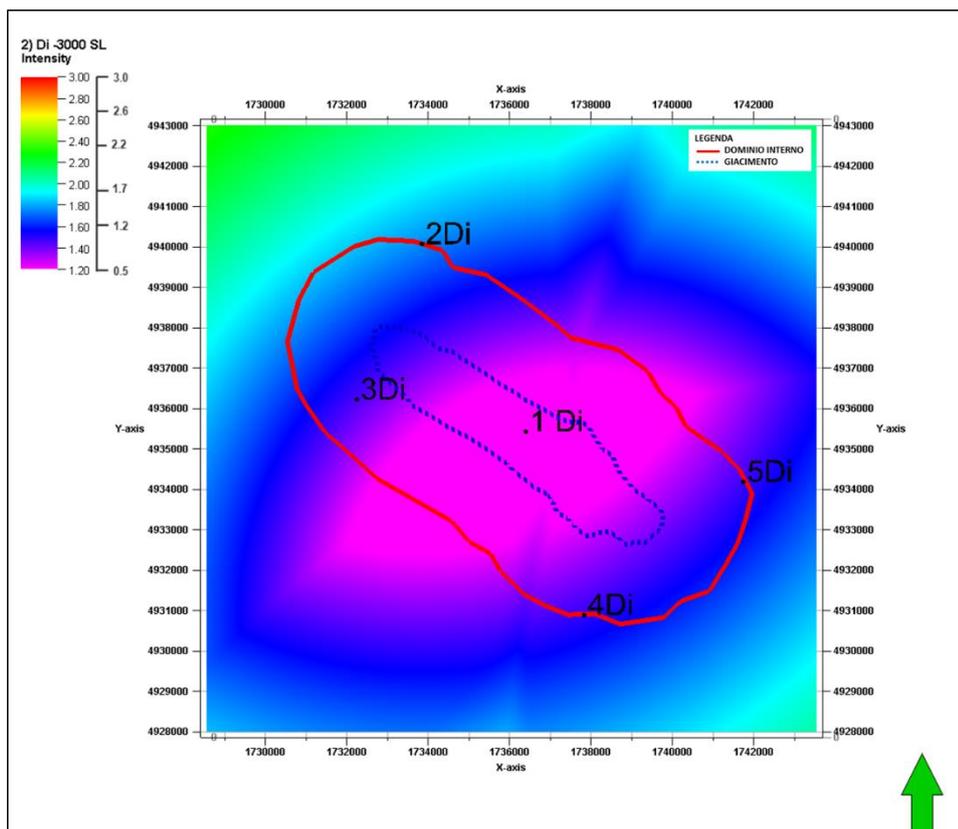


Figura 32. Mappa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 3000 m

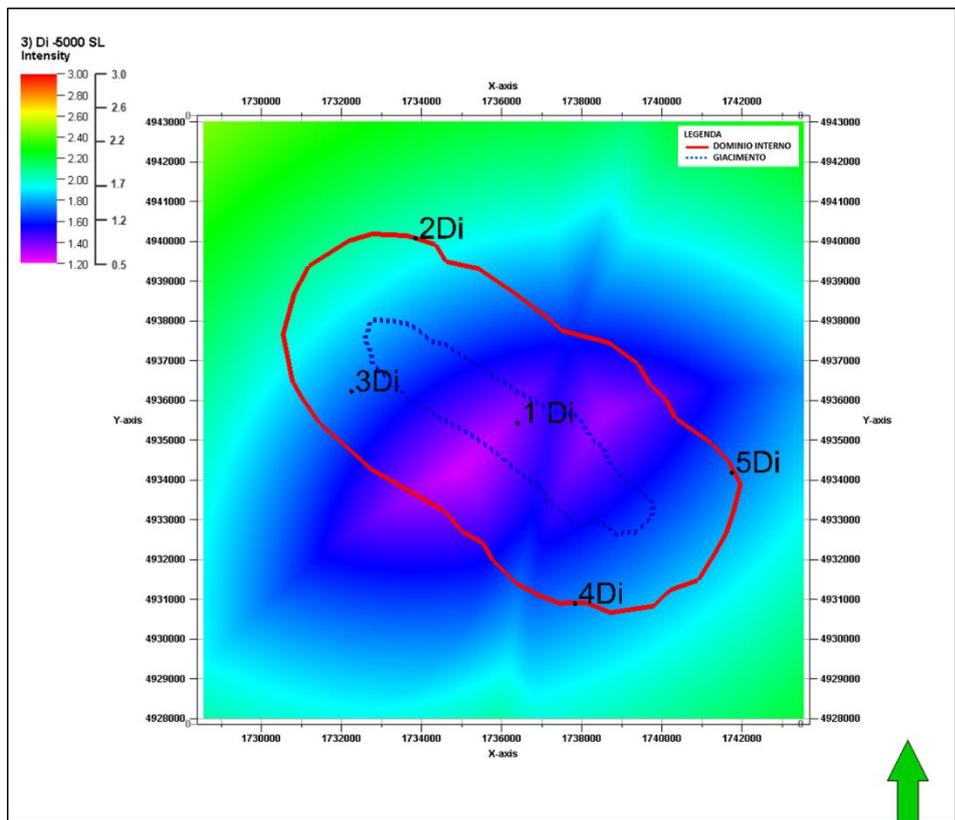


Figura 33. Mapa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 5000 m

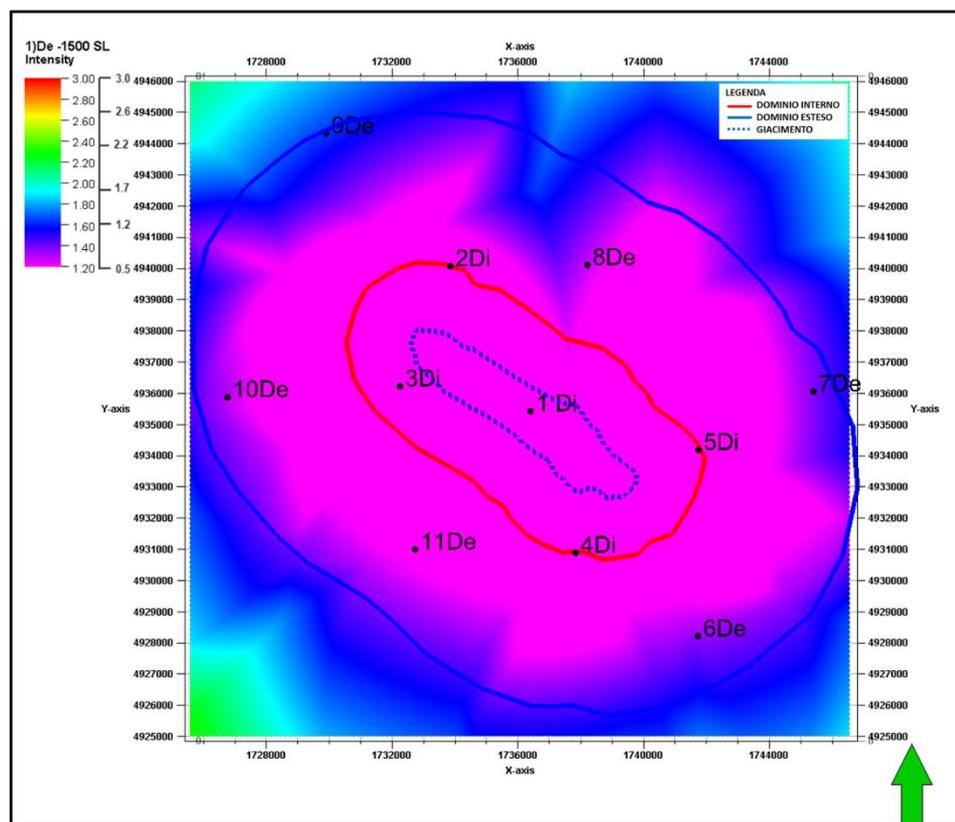


Figura 34. Mapa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 1500 m.

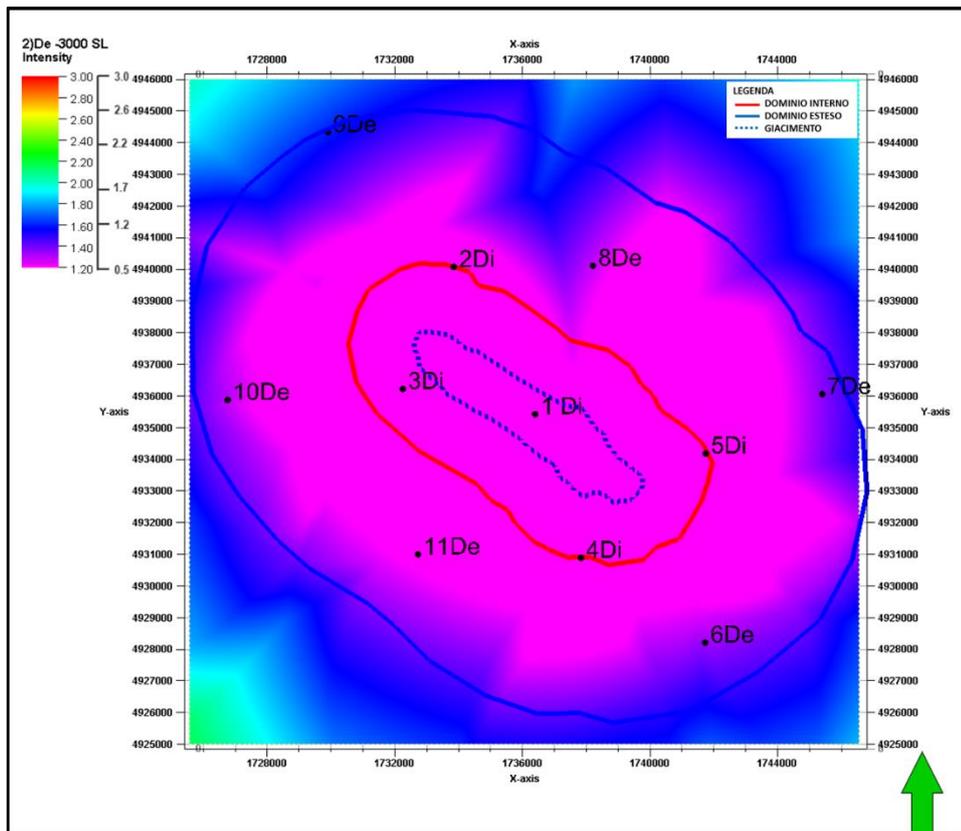


Figura 35. Mappa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 3000 m.

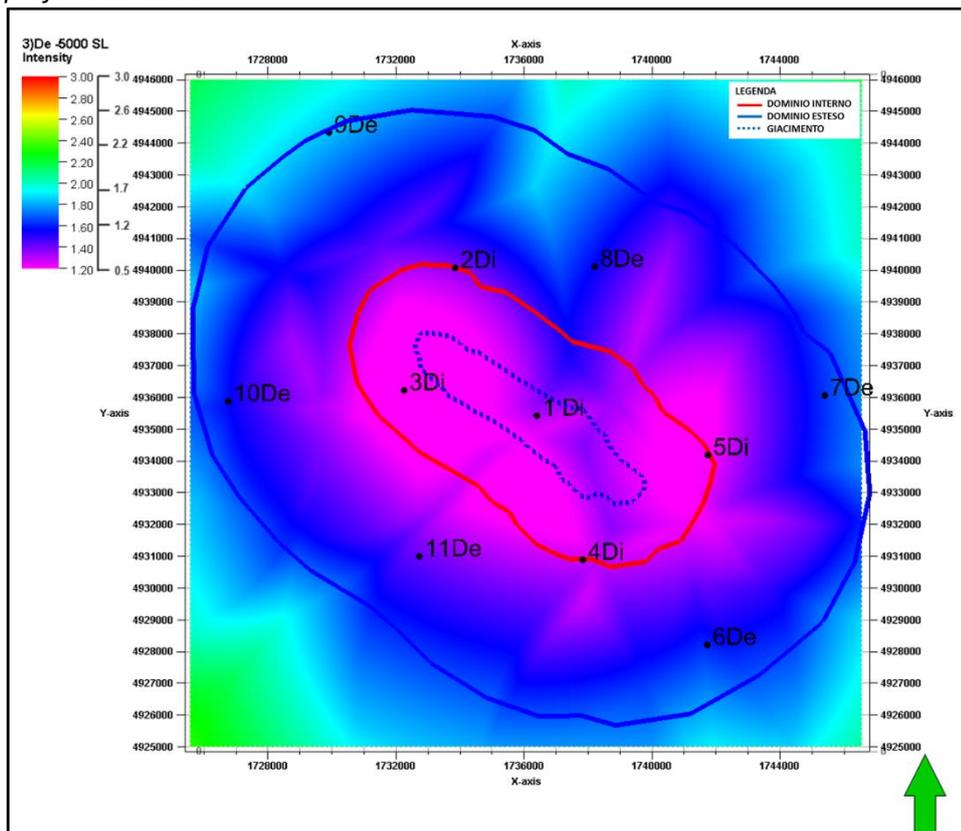


Figura 36. Mappa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 5000 m.

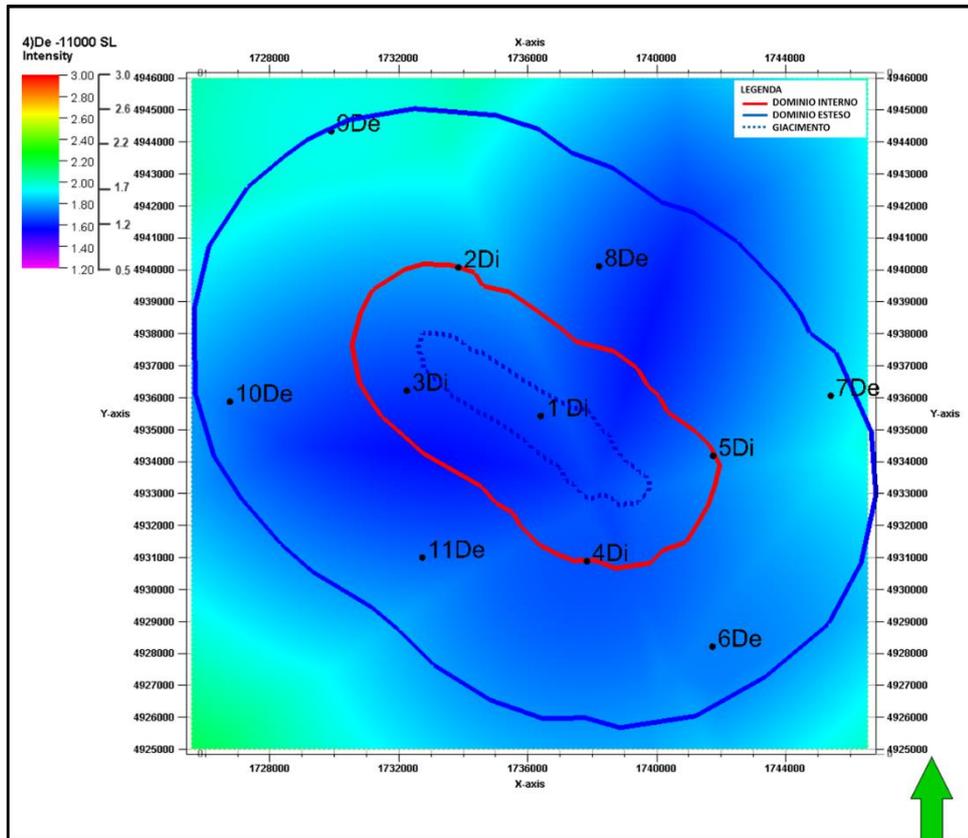


Figura 37. Mappa di localizzazione con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 11000 m.

Figure 38 – 44

**Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori)
Rumore di fondo massimo per singola stazione
Dominio interno ed esteso
Mappe a diversi livelli di profondita'**

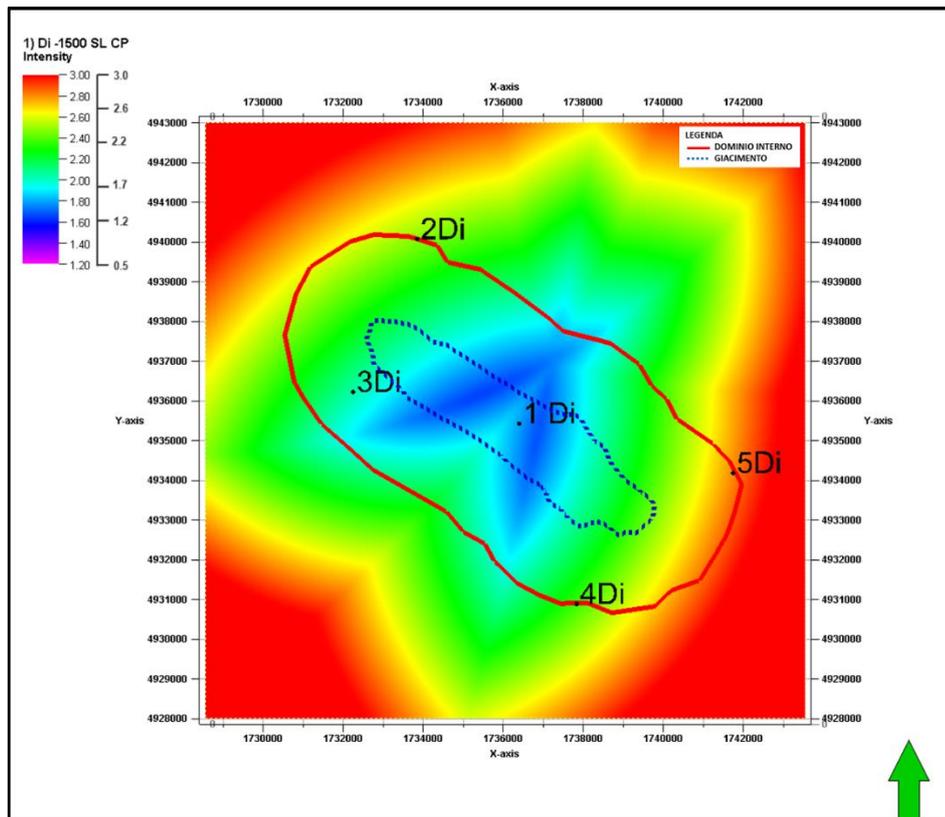


Figura 38. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 1500 m.

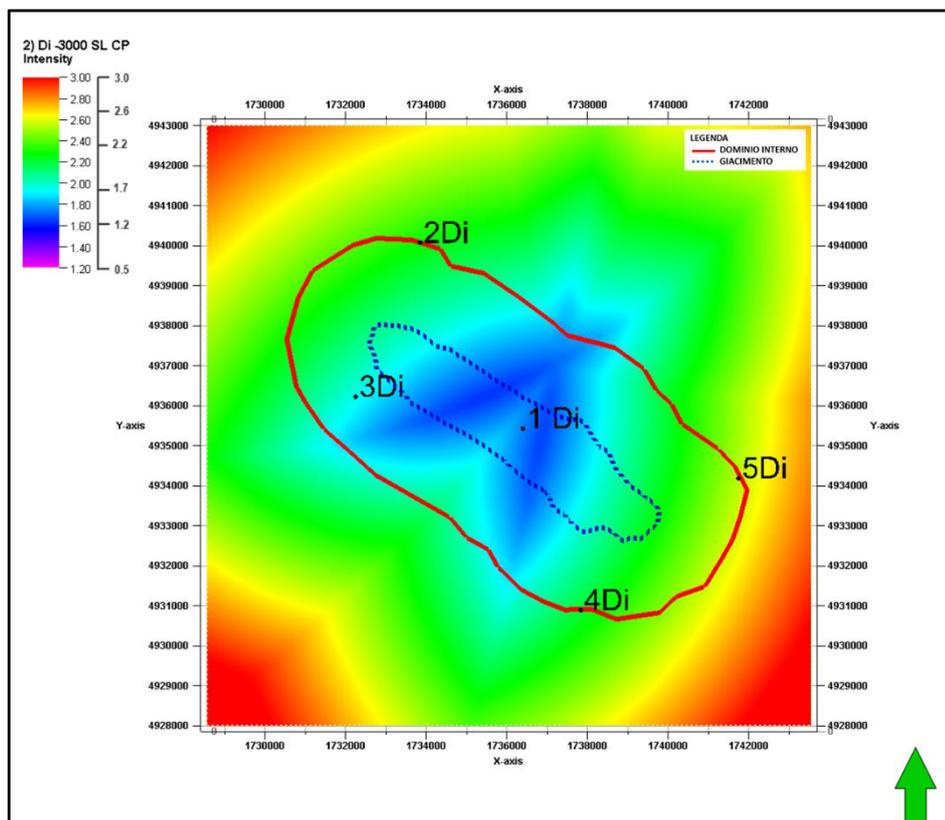


Figura 39. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 3000 m.

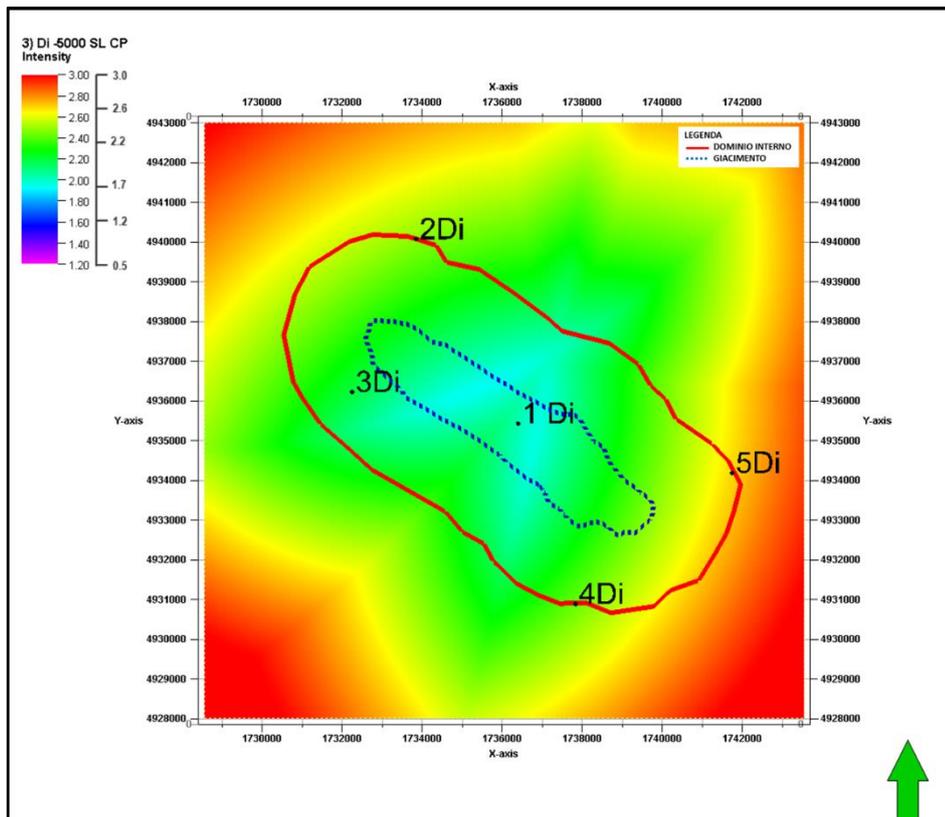


Figura 40. Mapa de localizzazione con rumore de fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profundita' 5000 m.

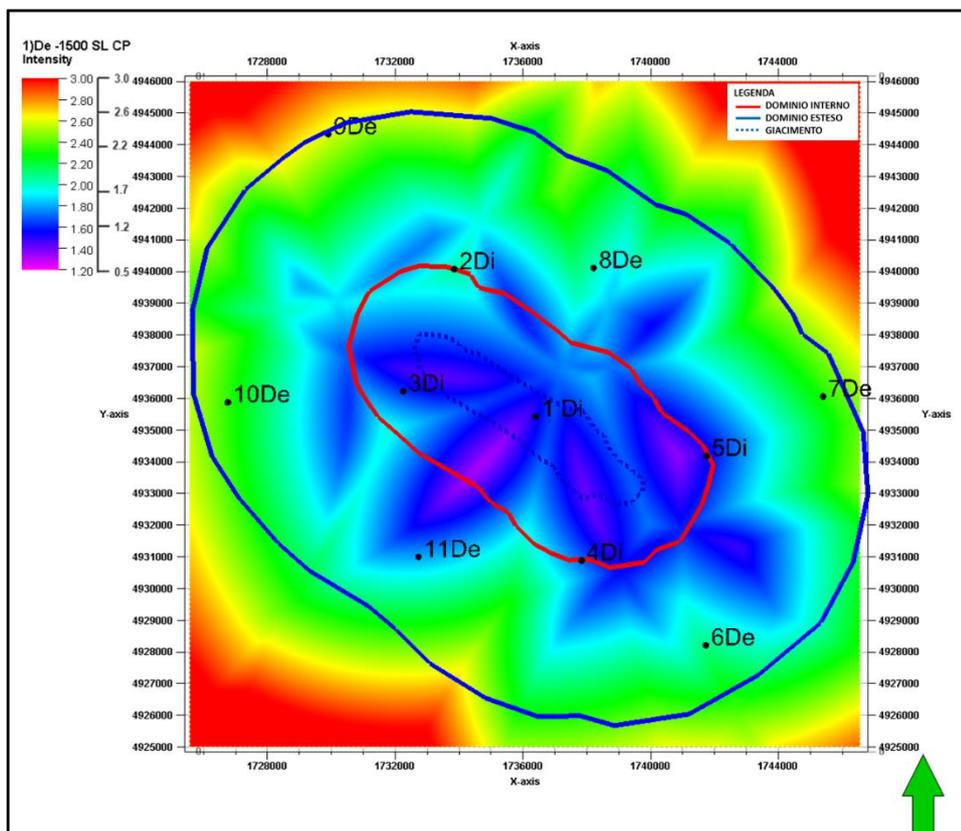


Figura 41. Mapa de localizzazione con rumore de fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profundita' 1500 m.

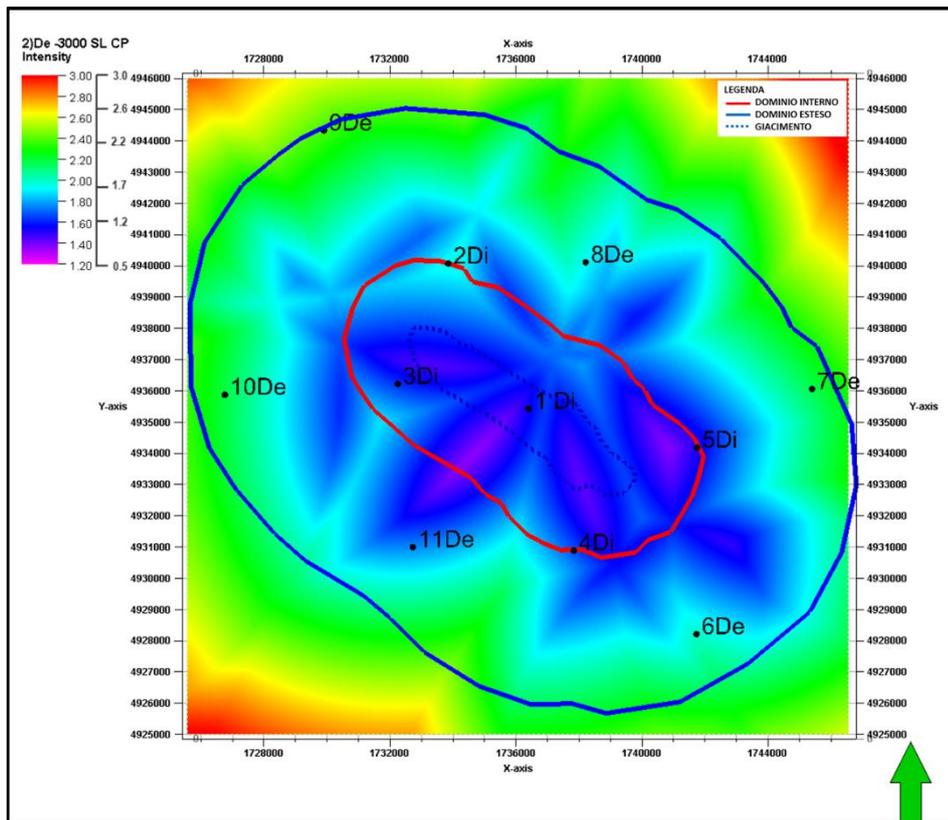


Figura 42. Mapa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 3000 m.

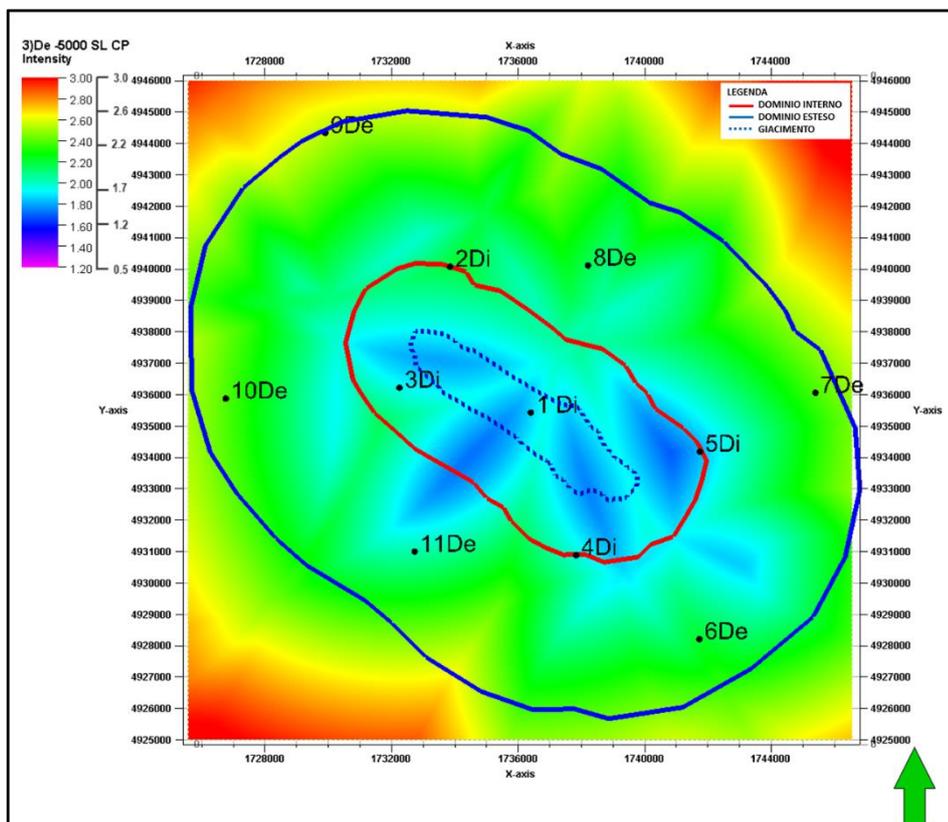


Figura 43. Mapa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 5000 m.

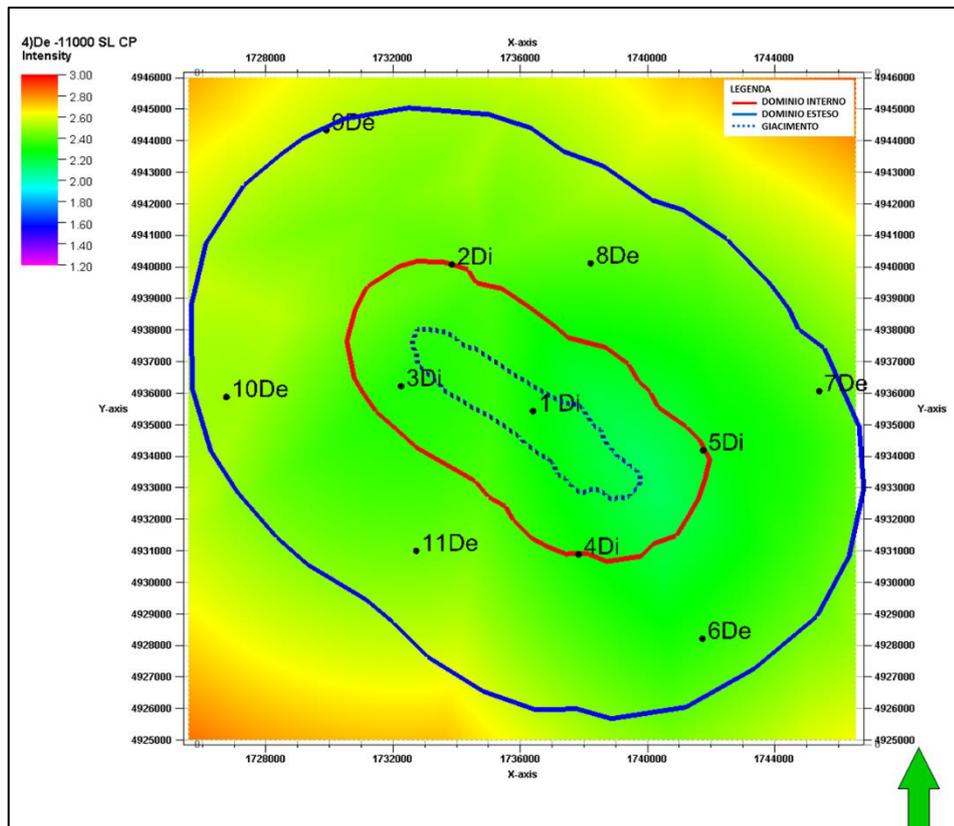


Figura 44. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 11000 m.

Figure 45 – 47**Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori)
Rumore di fondo massimo ridotto in due stazioni
Dominio interno
Mappe a diversi livelli di profondita'**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni 3Di e 5Di del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondita' 100 m. Il loro livello di rumore ambientale e' desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di quiete. Le rimanenti stazioni 1Di, 2Di e 4Di vengono ipotizzate sul piano campagna e sono associate al loro massimo rumore ambientale

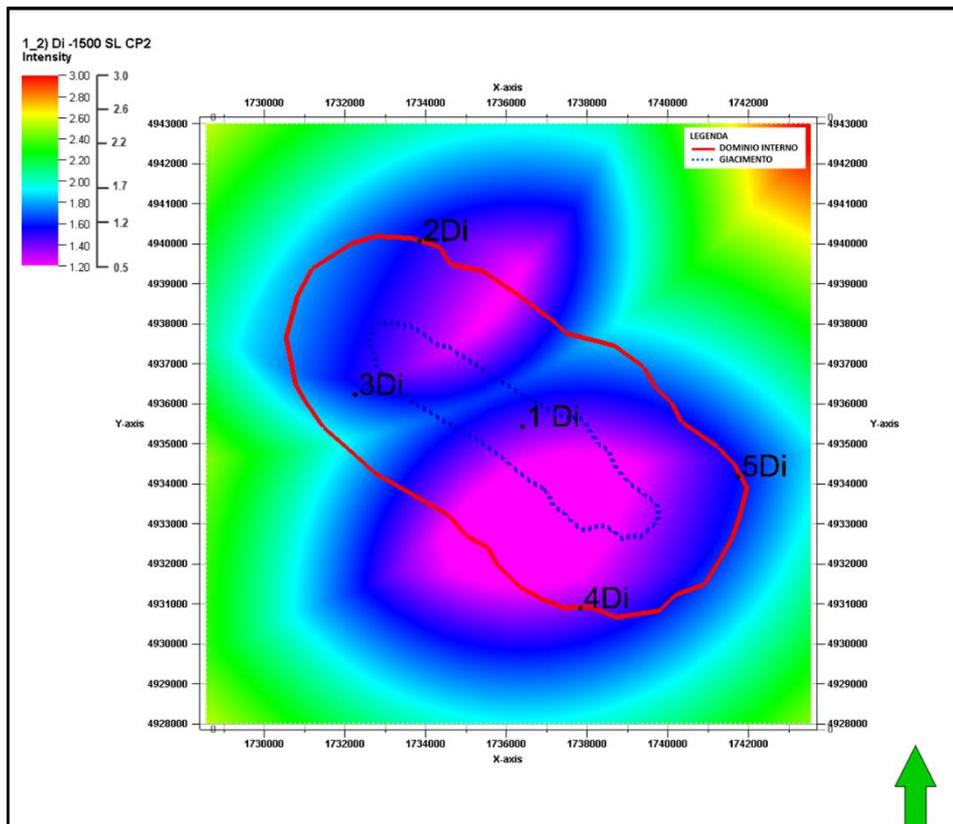


Figura 45. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondita' 1500 m

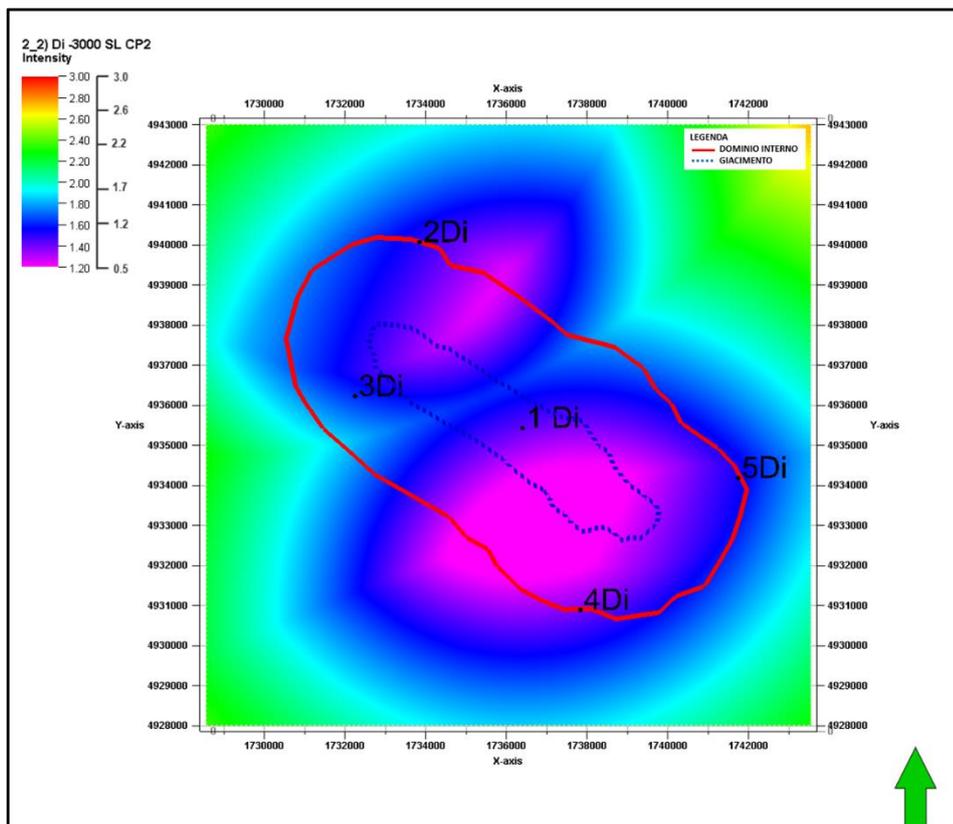


Figura 46. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondita' 3000 m

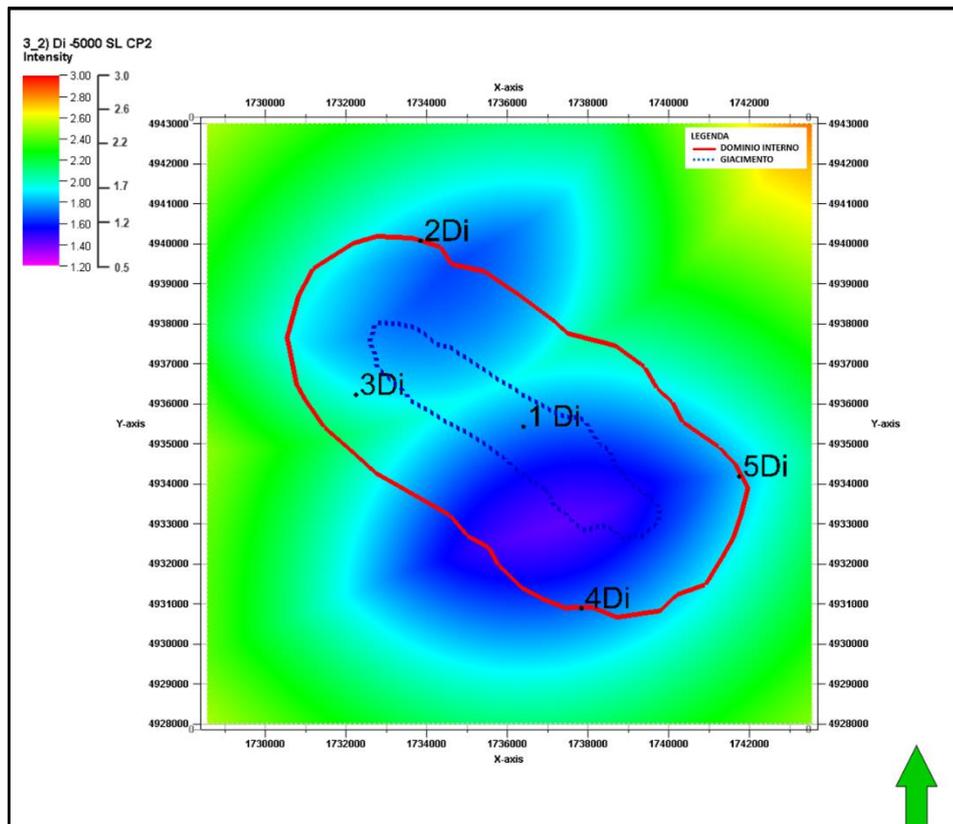


Figura 47. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondita' 5000 m

Figure 48 – 54

**Incertezza verticale di localizzazione
Rumore di fondo minimo per singola stazione
Dominio interno ed esteso
Mappe a diversi livelli di profondita'**

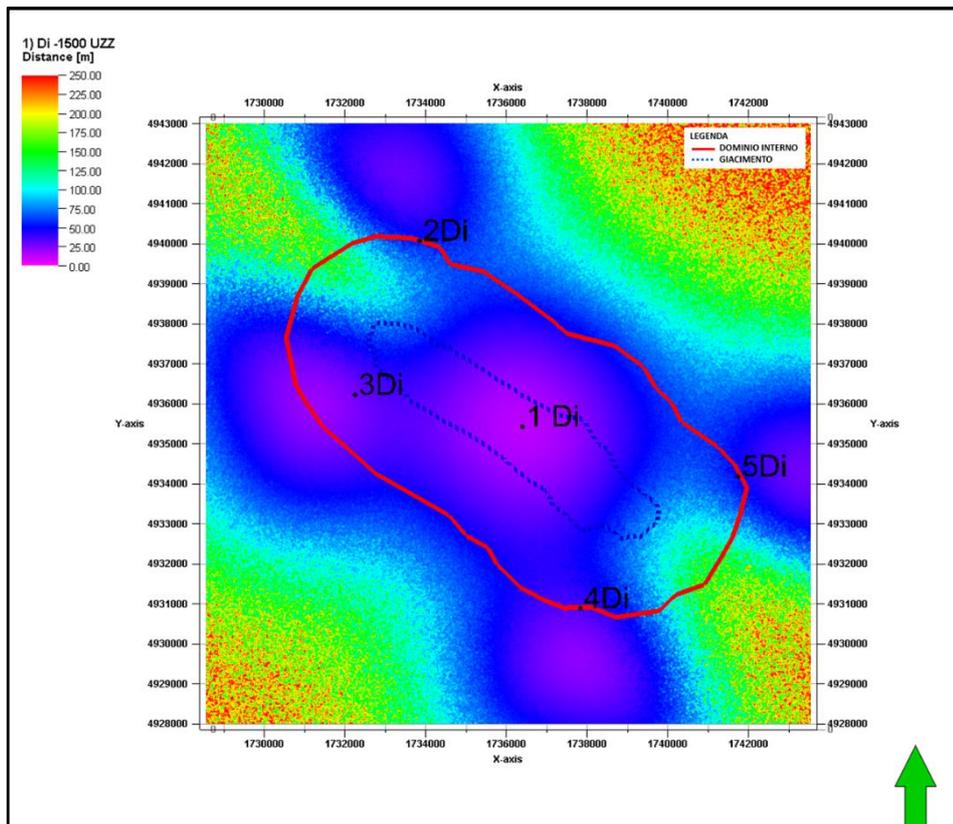


Figura 48. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 1500 m.

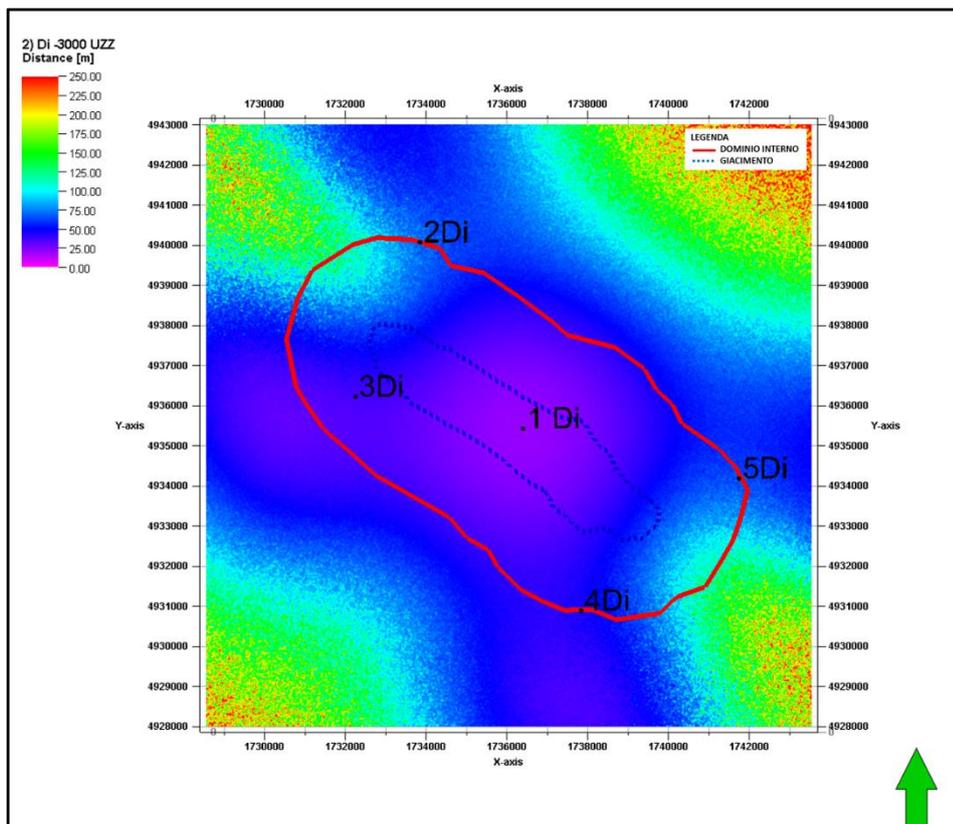


Figura 49. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 3000 m.

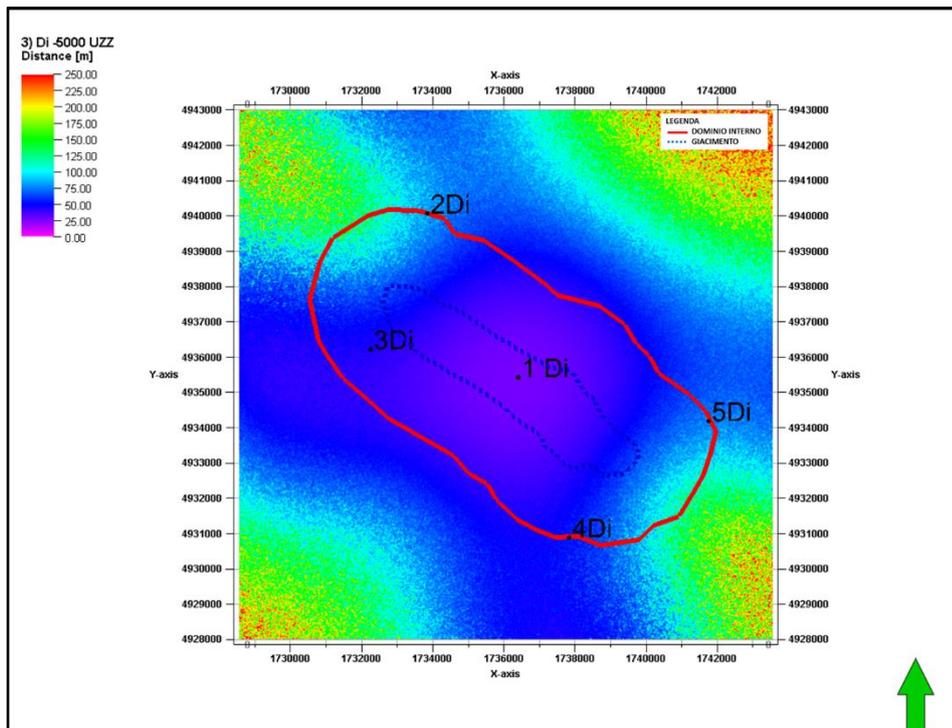


Figura 50. Mapa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondità 5000 m.

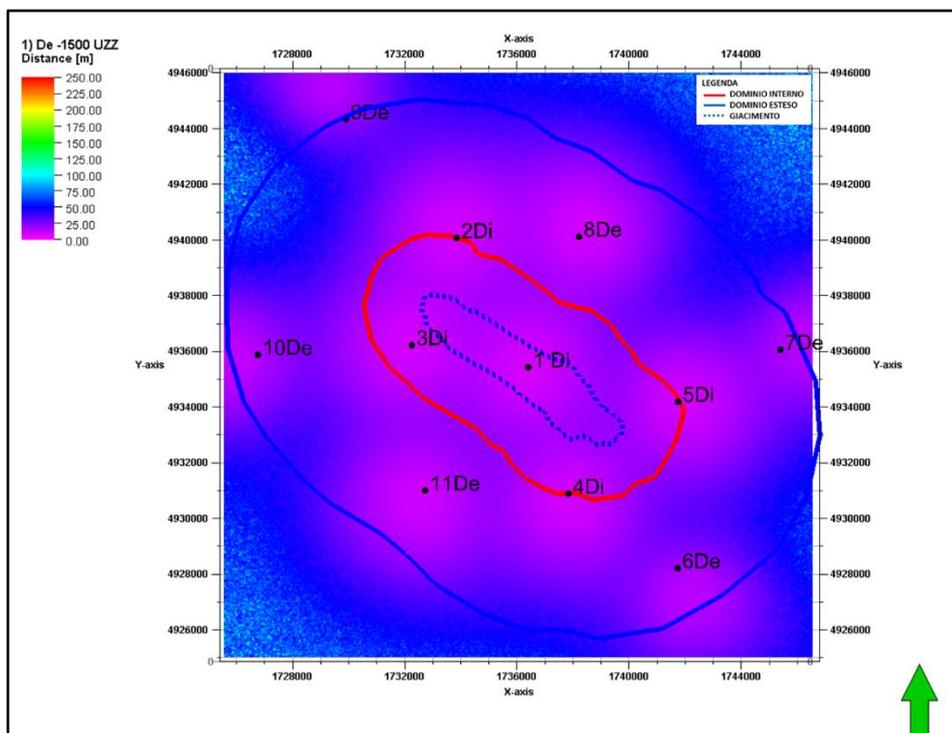


Figura 51. Mapa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondità 1500 m.

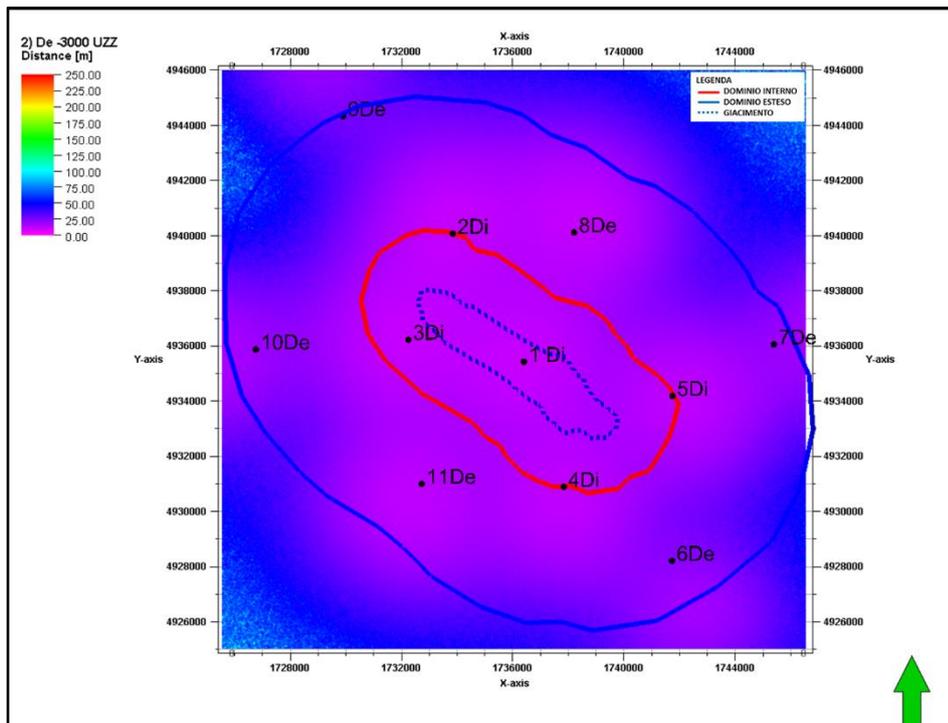


Figura 52. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 3000 m.

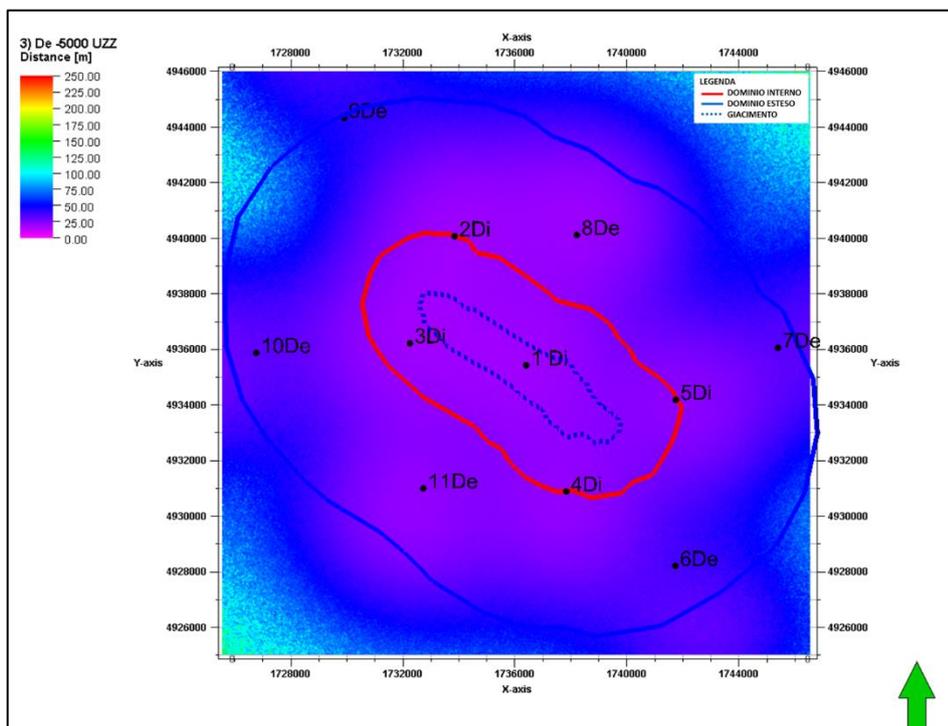


Figura 53. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 5000 m.

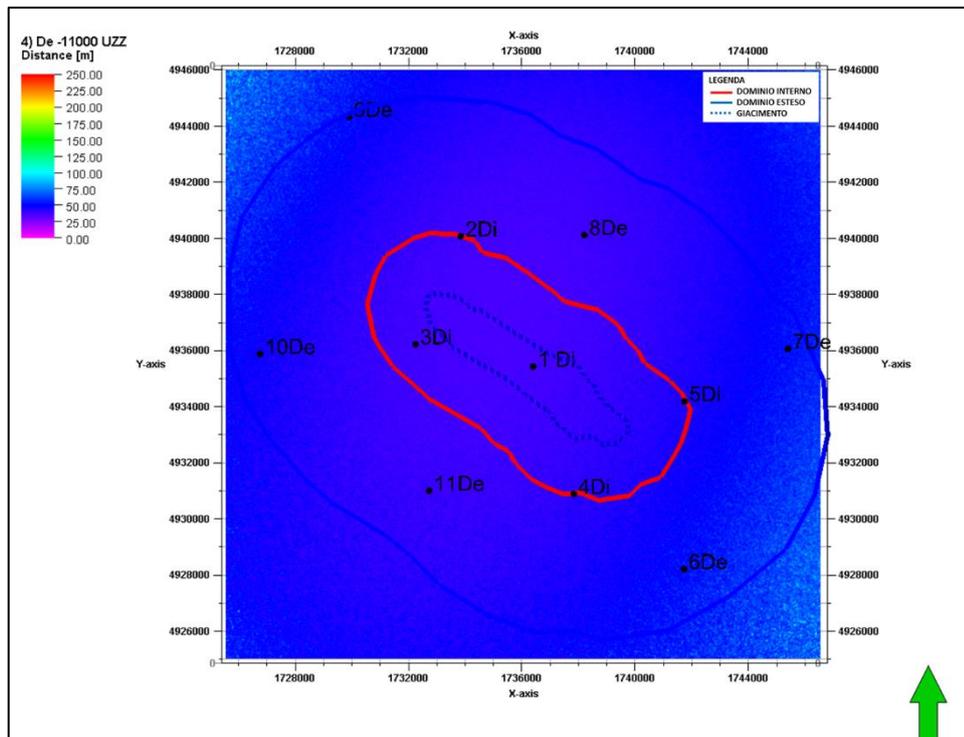


Figura 54. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 11000 m.

Figure 55 – 61

**Incertezza verticale di localizzazione
Rumore di fondo massimo per singola stazione
Dominio interno ed esteso
Mappe a diversi livelli di profondita'**

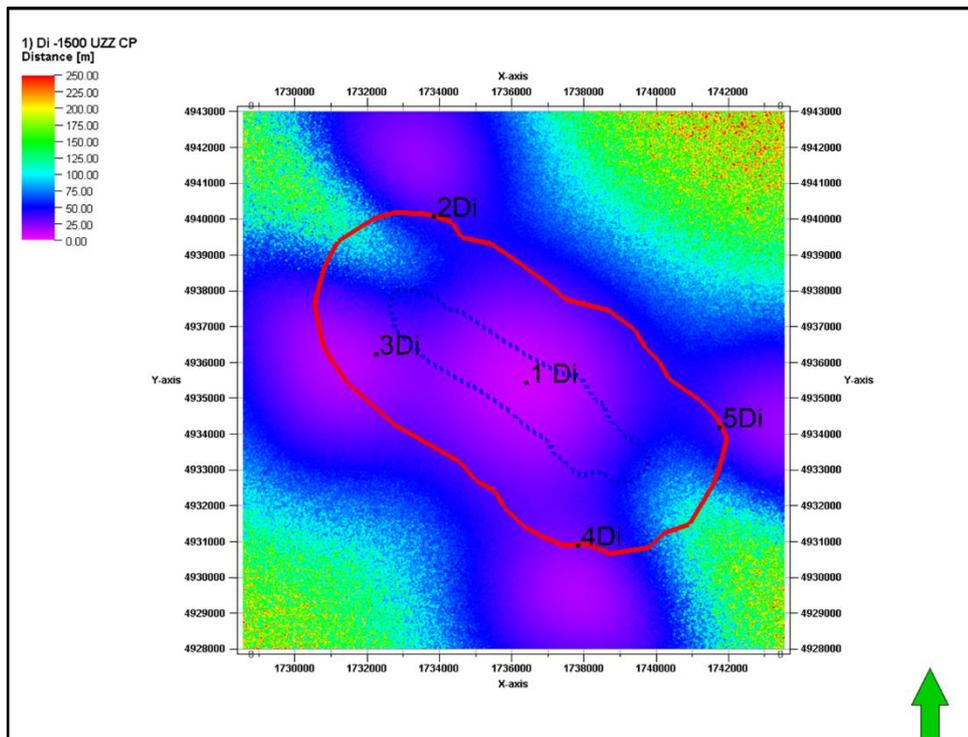


Figura 55. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 1500 m.

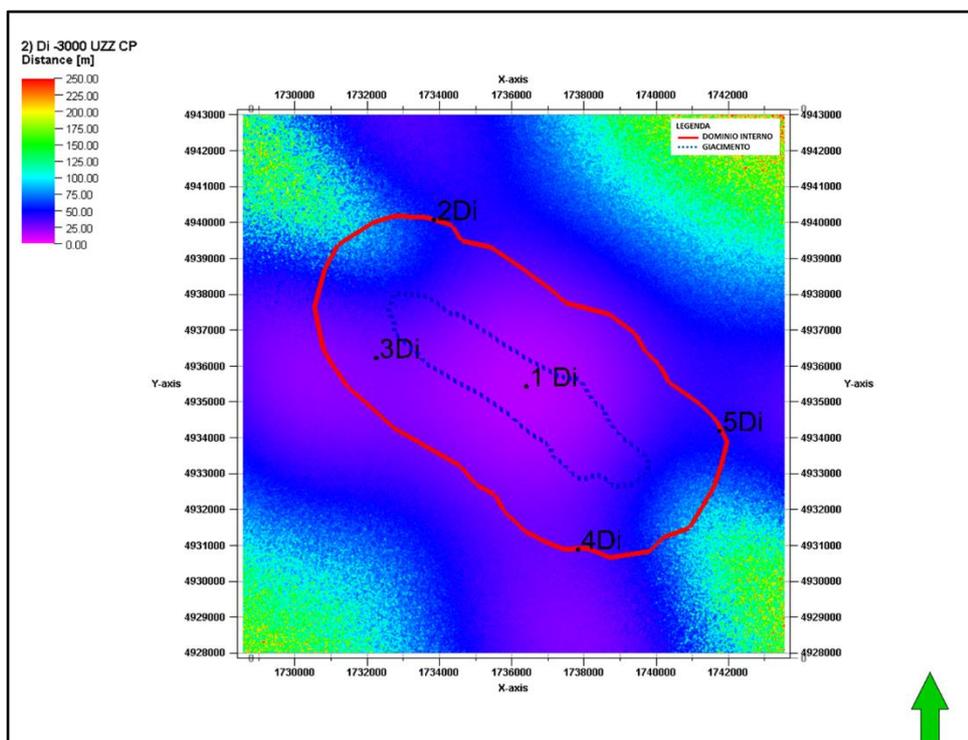


Figura 56. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 3000 m.

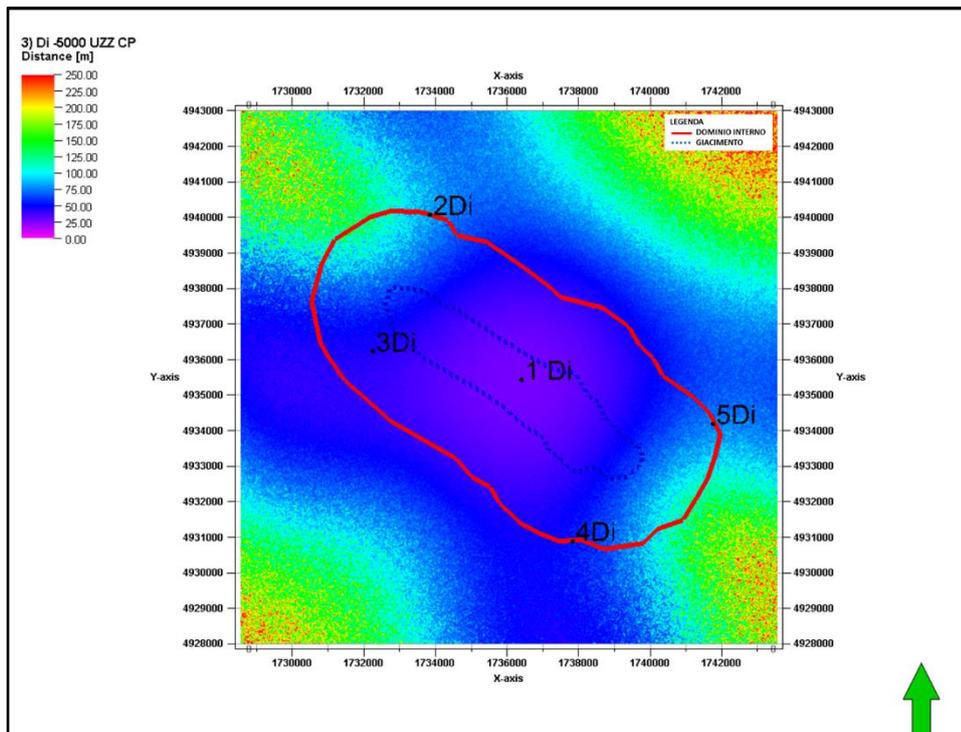


Figura 57. Mapa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondità 5000 m.

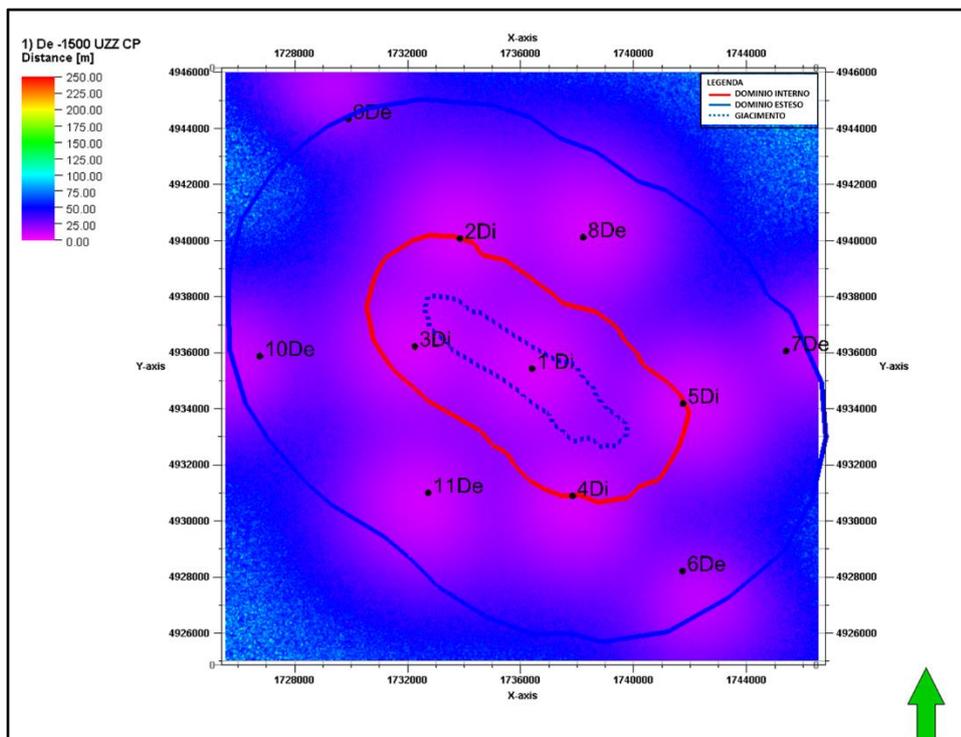


Figura 58. Mapa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondità 1500 m.

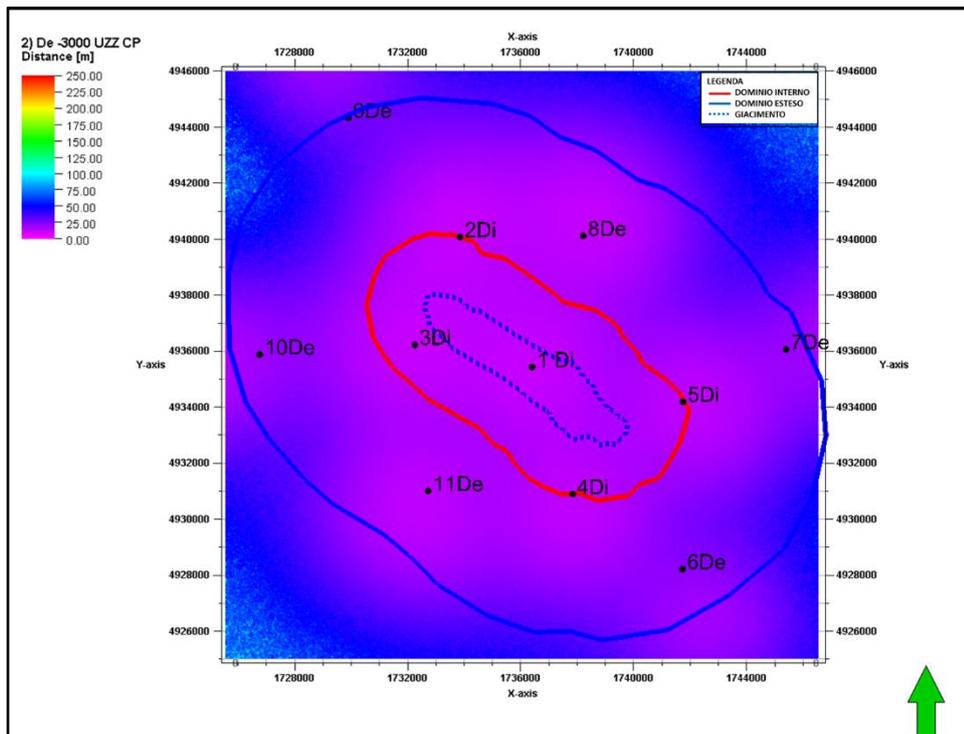


Figura 59. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 3000 m.

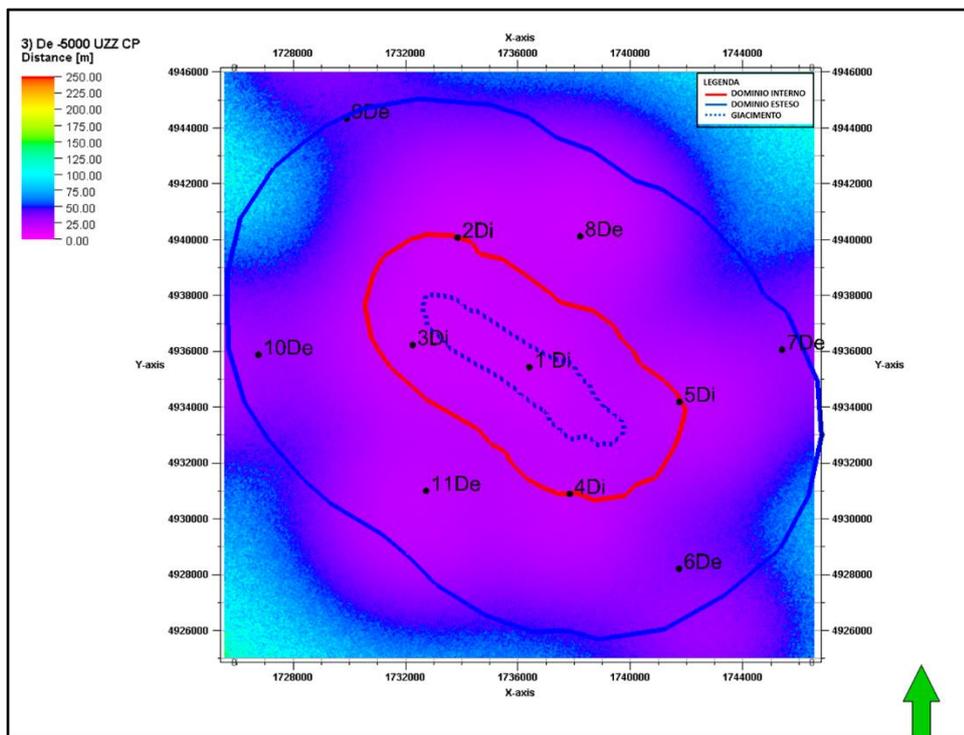


Figura 60. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 5000 m.

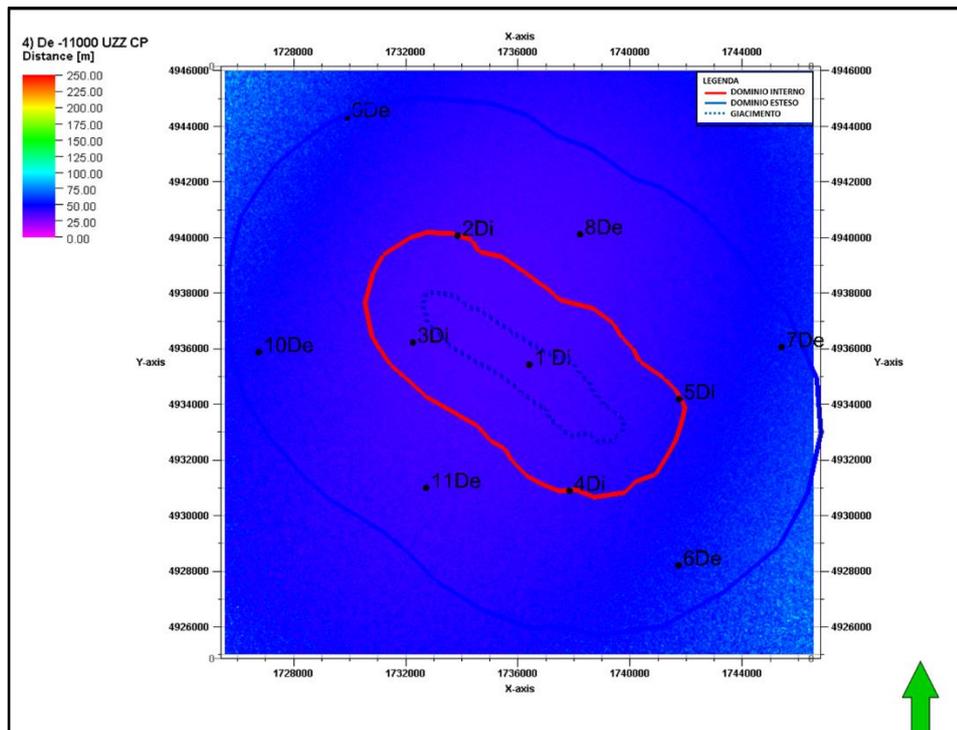


Figura 61. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 11000 m.

Figure 62 – 64**Incerteza verticale di localizzazione
Rumore di fondo massimo ridotto in due stazioni
Dominio interno
Mappe a diversi livelli di profondita'**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni 3Di e 5Di del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondita' 100 m. Il loro livello di rumore ambientale e' desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di quiete. Le rimanenti stazioni 1Di, 2Di e 4Di vengono ipotizzate sul piano campagna e sono associate al loro massimo rumore ambientale

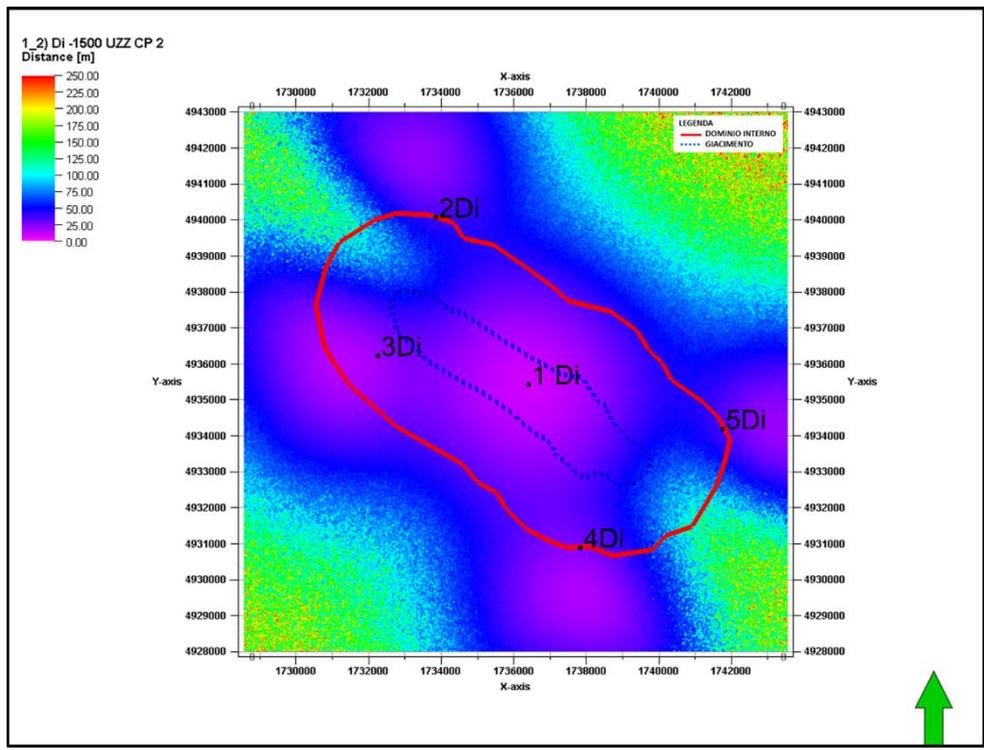


Figura 62. Mapa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondita' 1500 m.

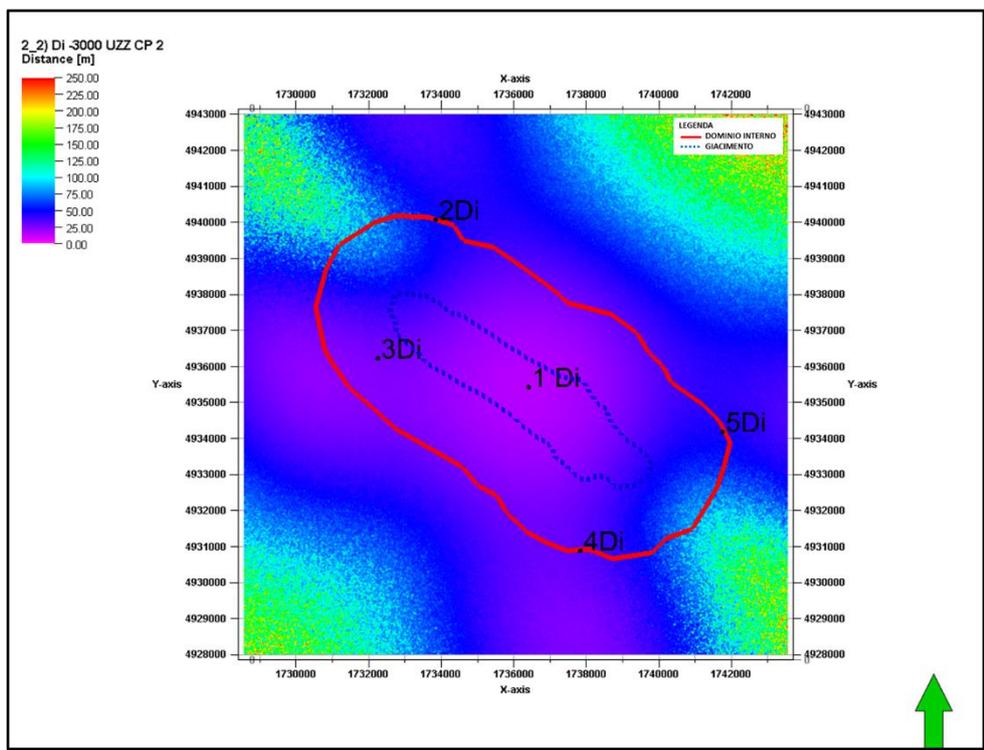


Figura 63. Mapa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondita' 3000 m.

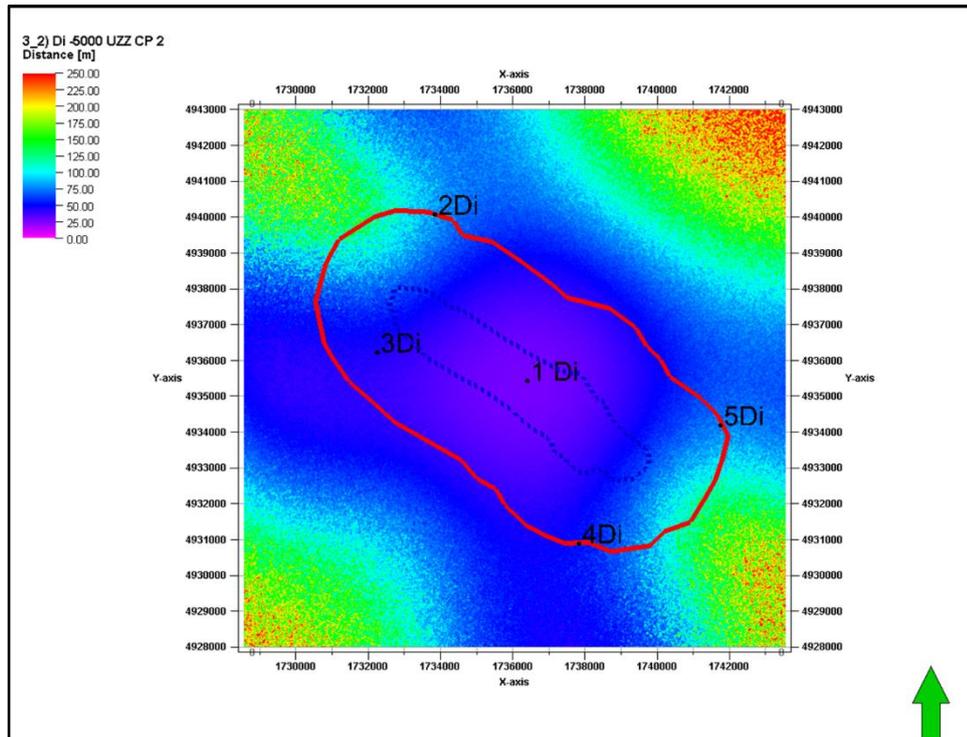


Figura 64. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto): profondita' 5000 m.

Figure 65 – 71

**Incerteza orizzontale di localizzazione
Rumore di fondo minimo per singola stazione
Dominio interno ed esteso
Mappe a diversi livelli di profondita'**

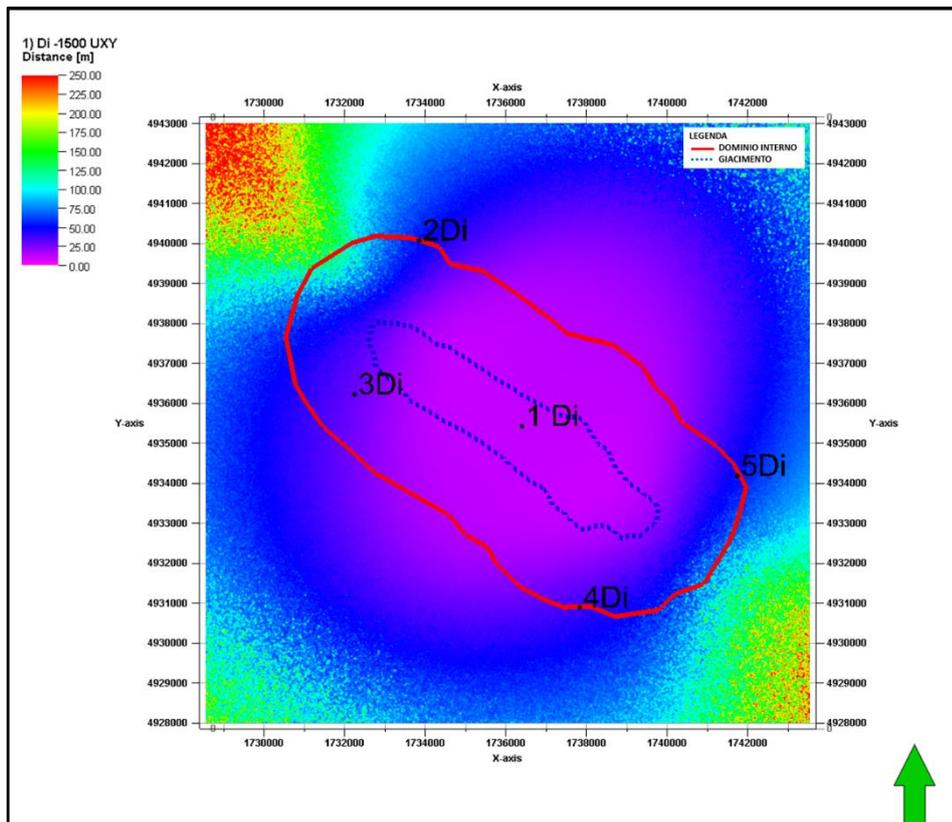


Figura 65. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondità 1500 m.

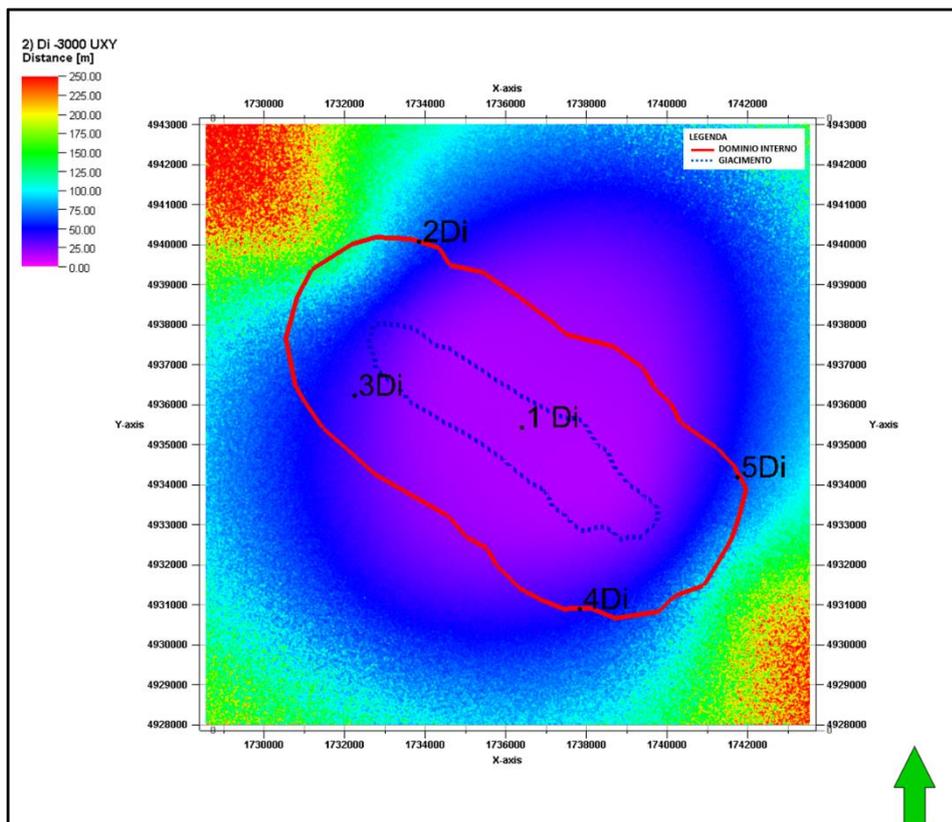


Figura 66. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondità 3000 m.

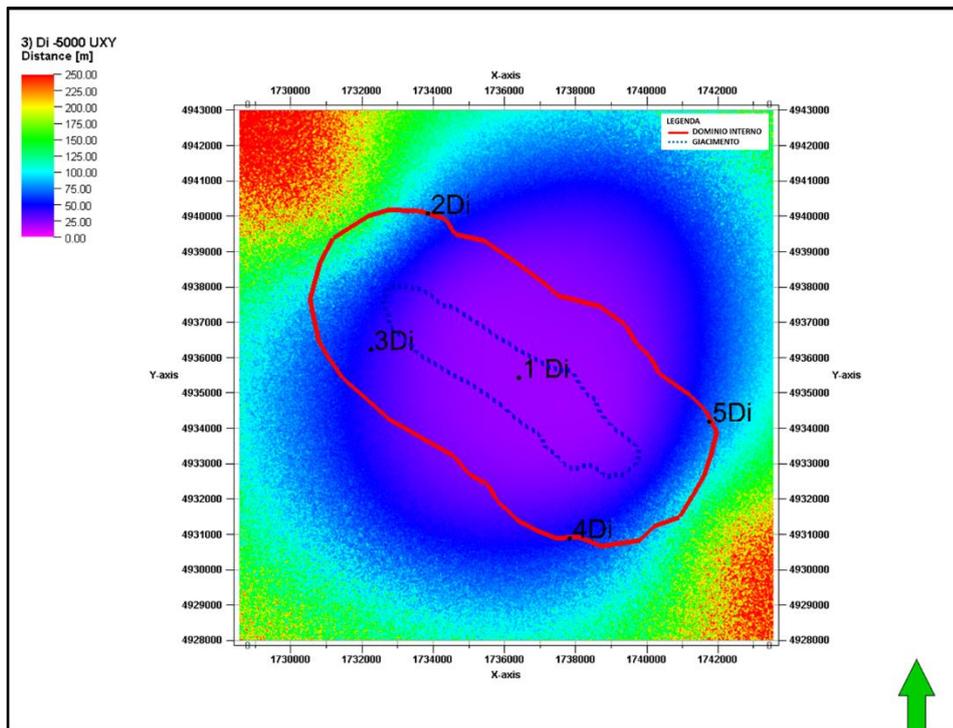


Figura 67. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 5000 m.

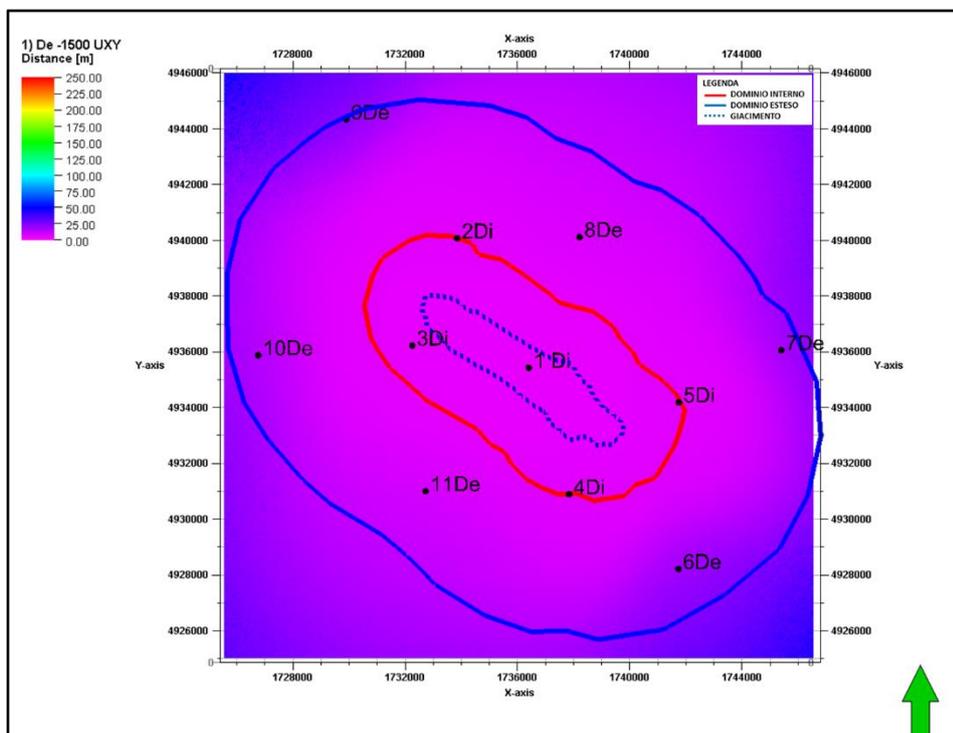


Figura 68. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 1500 m.

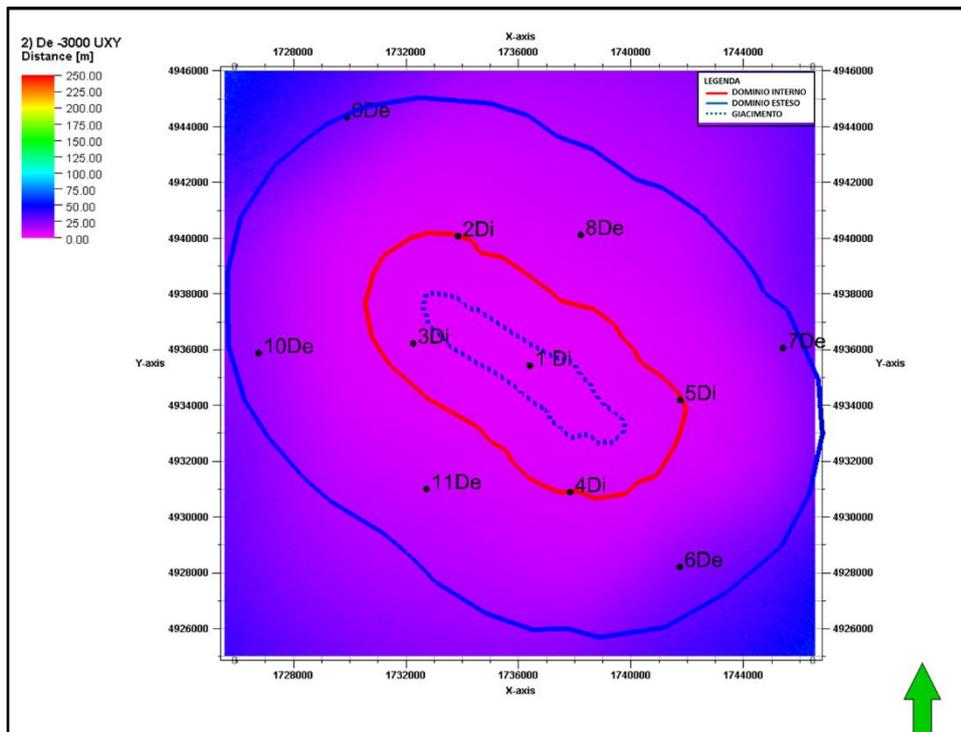


Figura 69. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 3000 m.

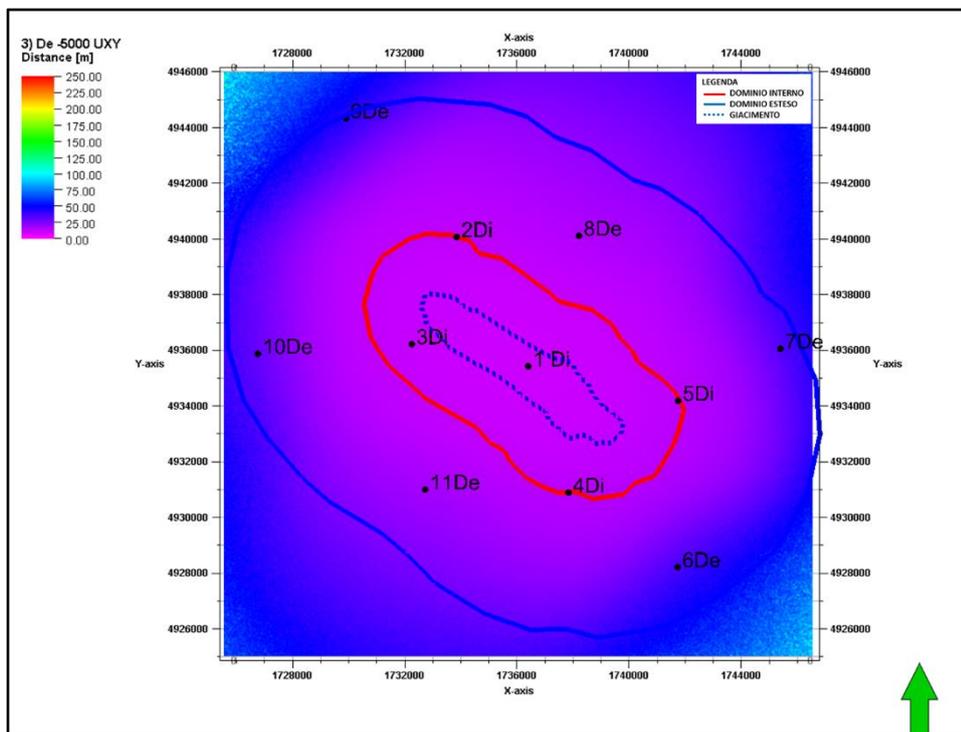


Figura 70. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 5000 m.

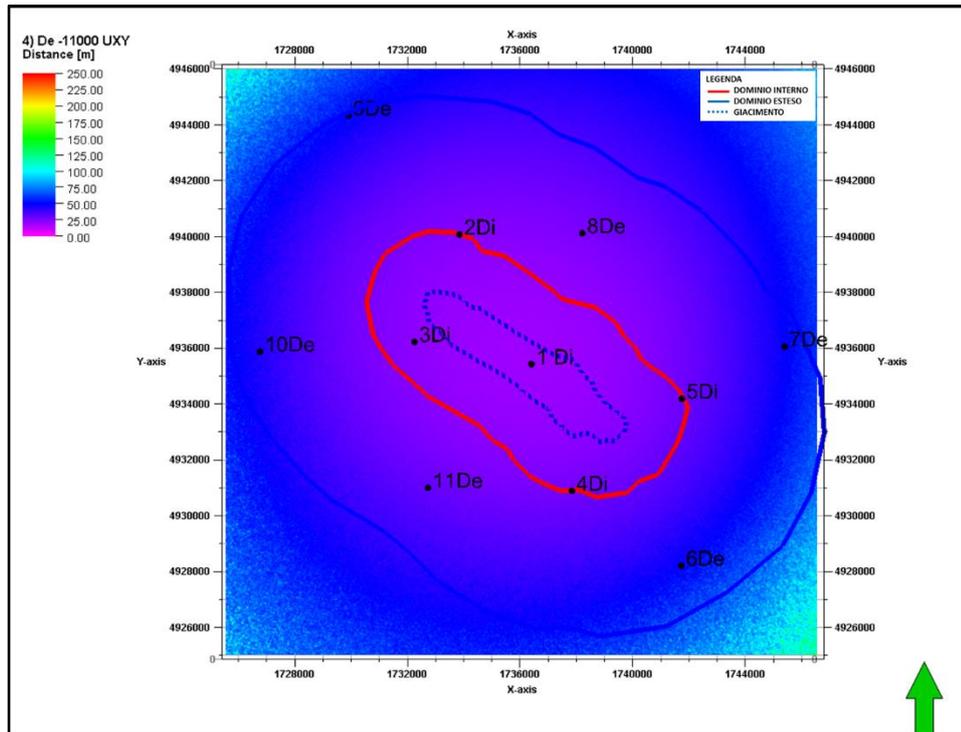


Figura 71. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo minimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 11000 m.

Figure 72 – 78

**Incerteza orizzontale di localizzazione
Rumore di fondo massimo per singola stazione
Dominio interno ed esteso
Mappe a diversi livelli di profondita'**

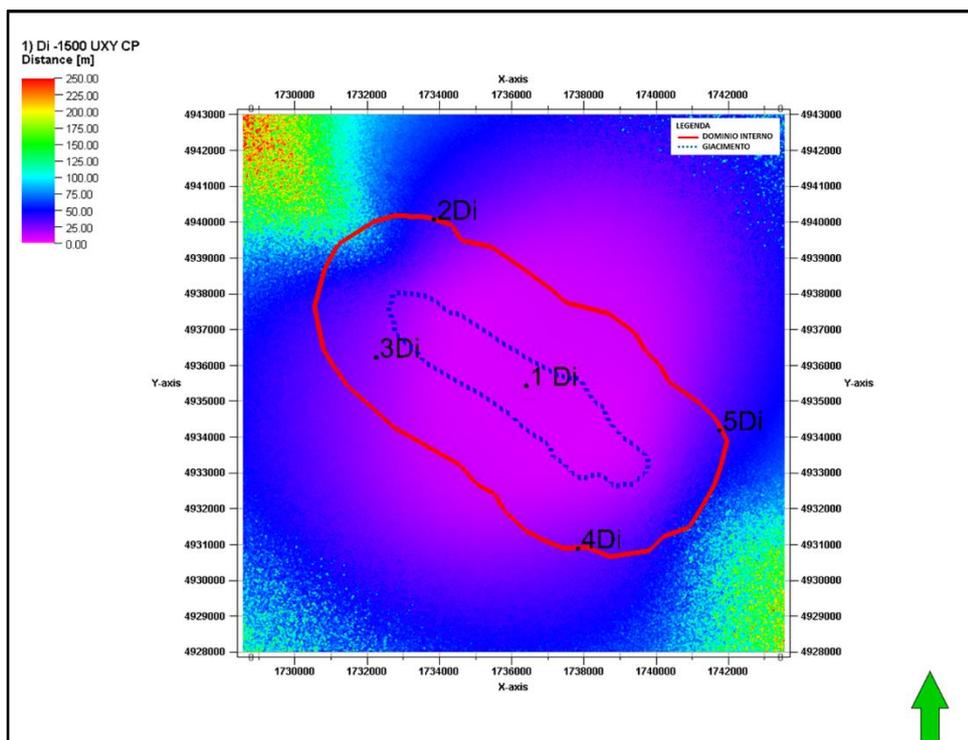


Figura 72. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 1500 m.

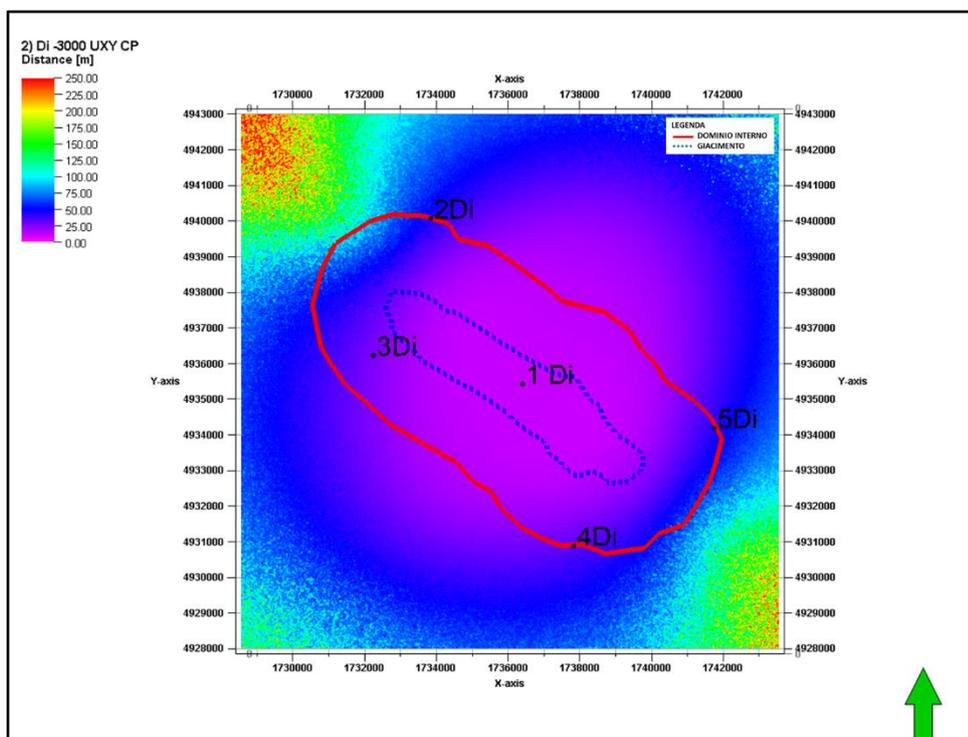


Figura 73. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 3000 m.

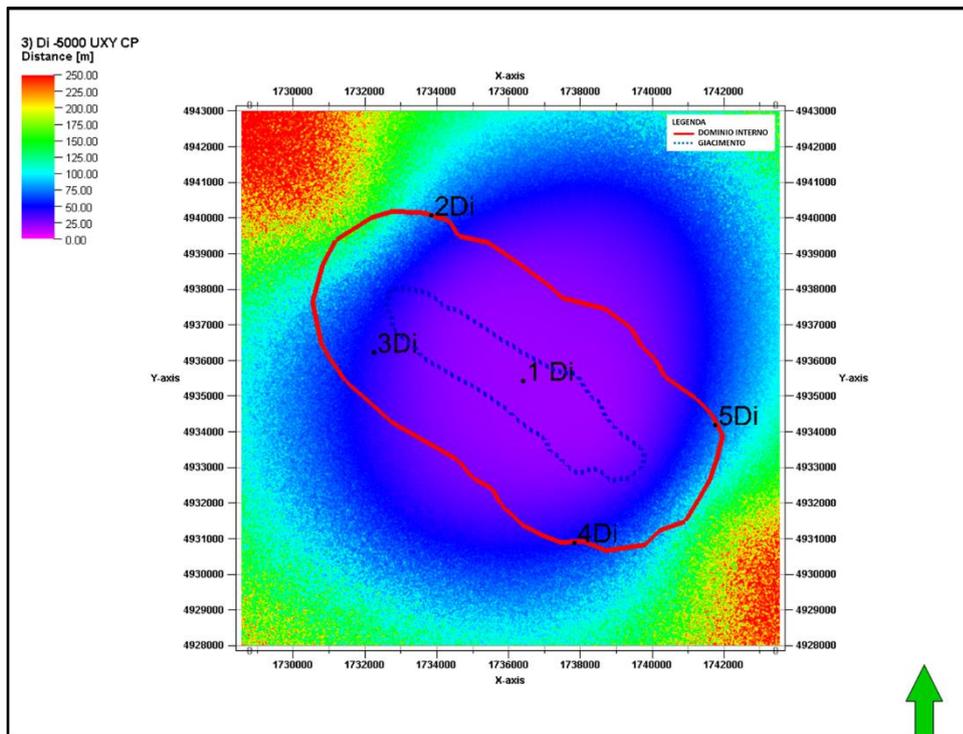


Figura 74. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno: profondita' 5000 m.

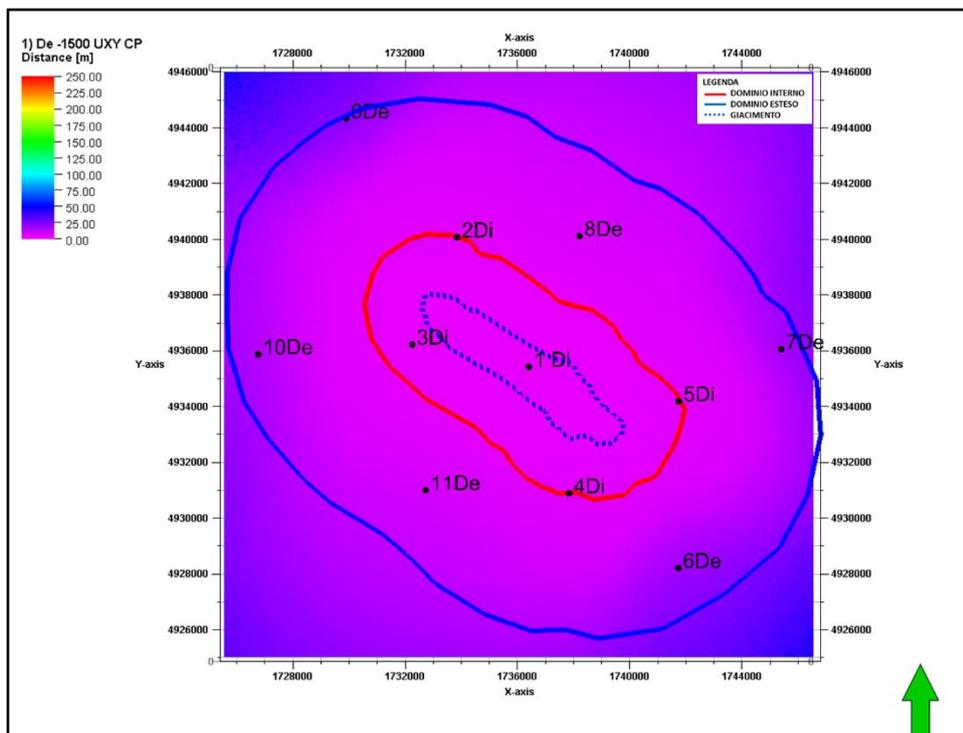


Figura 75. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 1500 m.

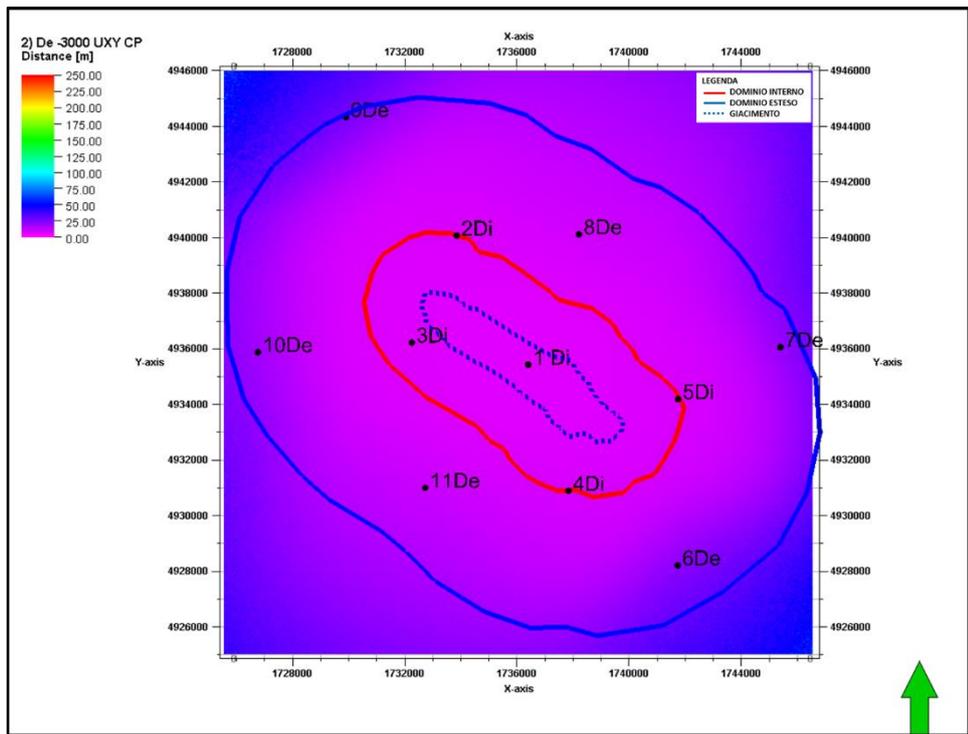


Figura 76. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondità 3000 m.

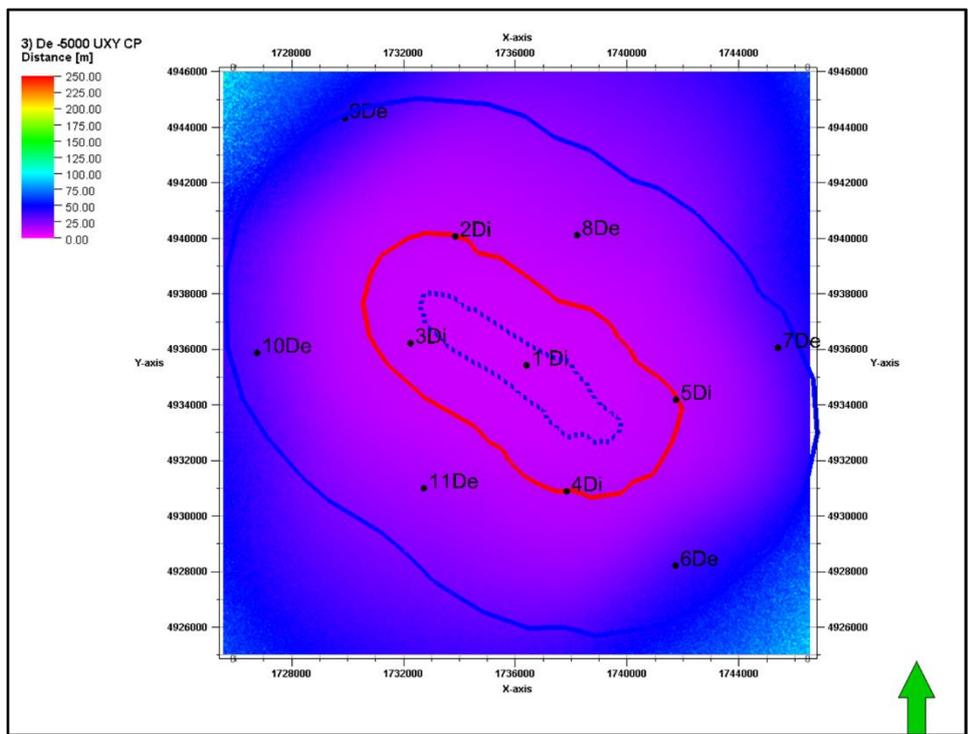


Figura 77. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondità 5000 m.

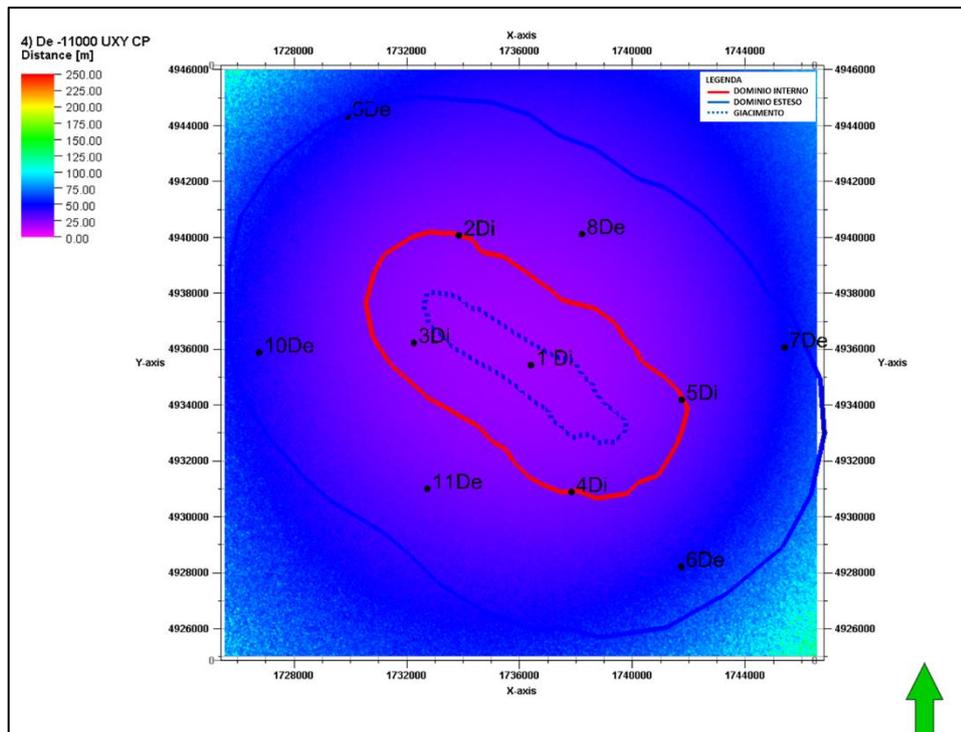


Figura 78. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio esteso: profondita' 11000 m.

Figure 79 – 81**Incerteza orizzontale di localizzazione
Rumore di fondo massimo ridotto in due stazioni
Dominio interno
Mappe a diversi livelli di profondita'**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni 3Di e 5Di del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondita' 100 m. Il loro livello di rumore ambientale e' desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di quiete. Le rimanenti stazioni 1Di, 2Di e 4Di vengono ipotizzate sul piano campagna e sono associate al loro massimo rumore ambientale

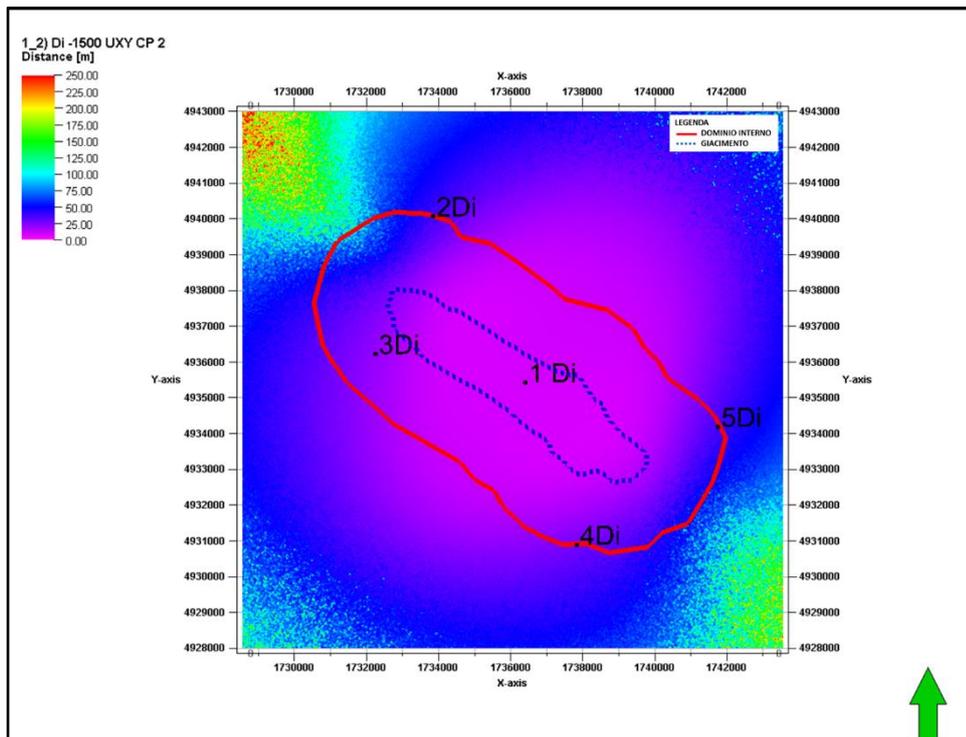


Figura 79. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto) : profondita' 1500 m

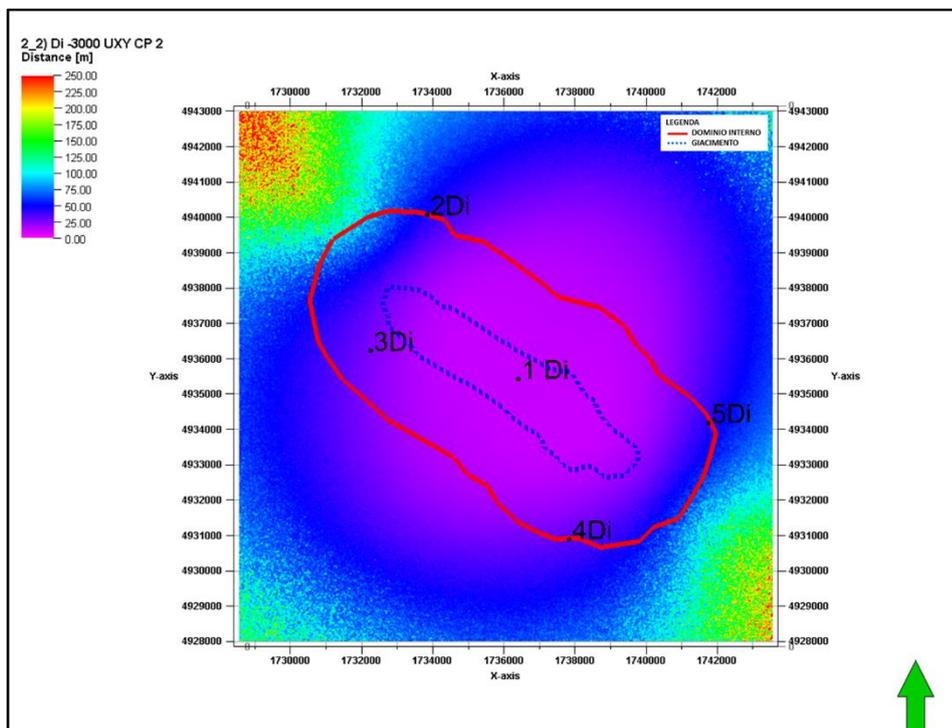


Figura 80. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto) : profondita' 3000 m

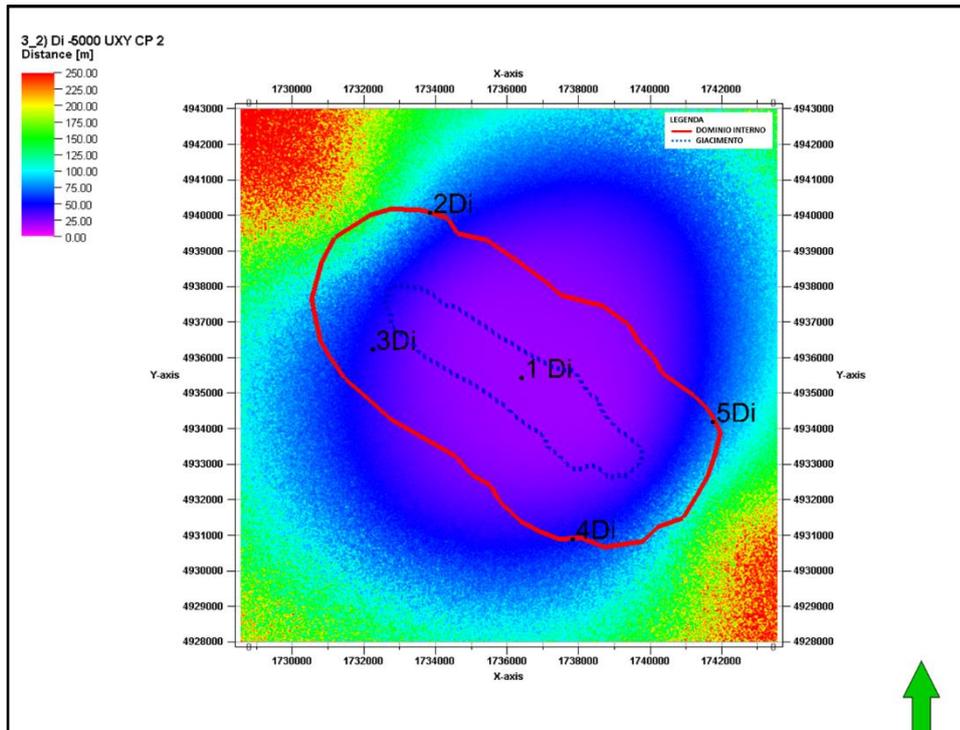


Figura 81. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo alle singole stazioni. Dominio interno (2 stazioni in pozzetto) : profondita' 5000 m

Figure 82 – 84**Magnitudo minime per localizzazione (4 ricevitori)
Rumore di fondo massimo ridotto in tutte le stazioni
Dominio interno
Mappe a diversi livelli di profondita'**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondita' 100 m. Il loro livello di rumore ambientale e' desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di quiete.

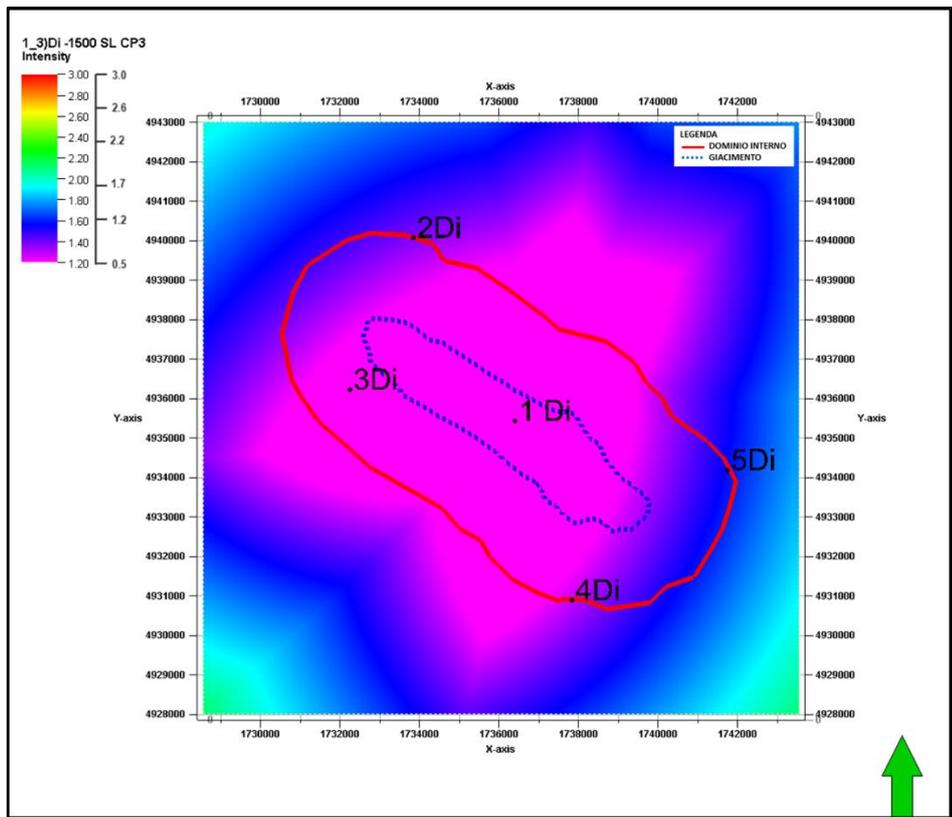


Figura 82. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 1500 m

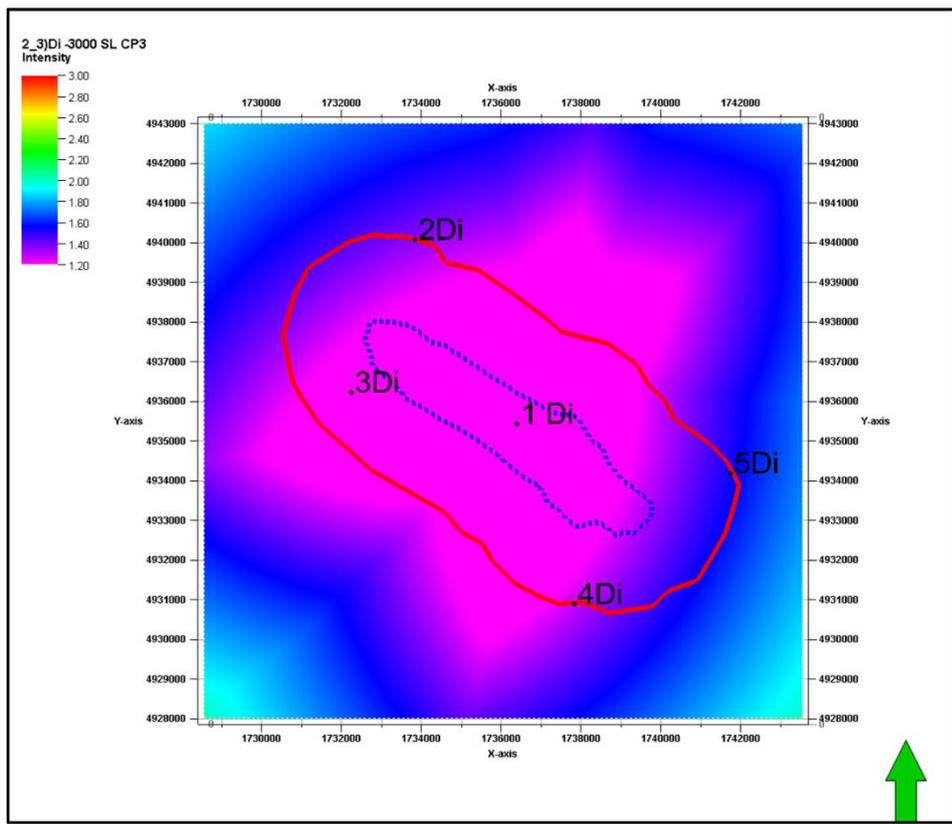


Figura 83. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 3000 m

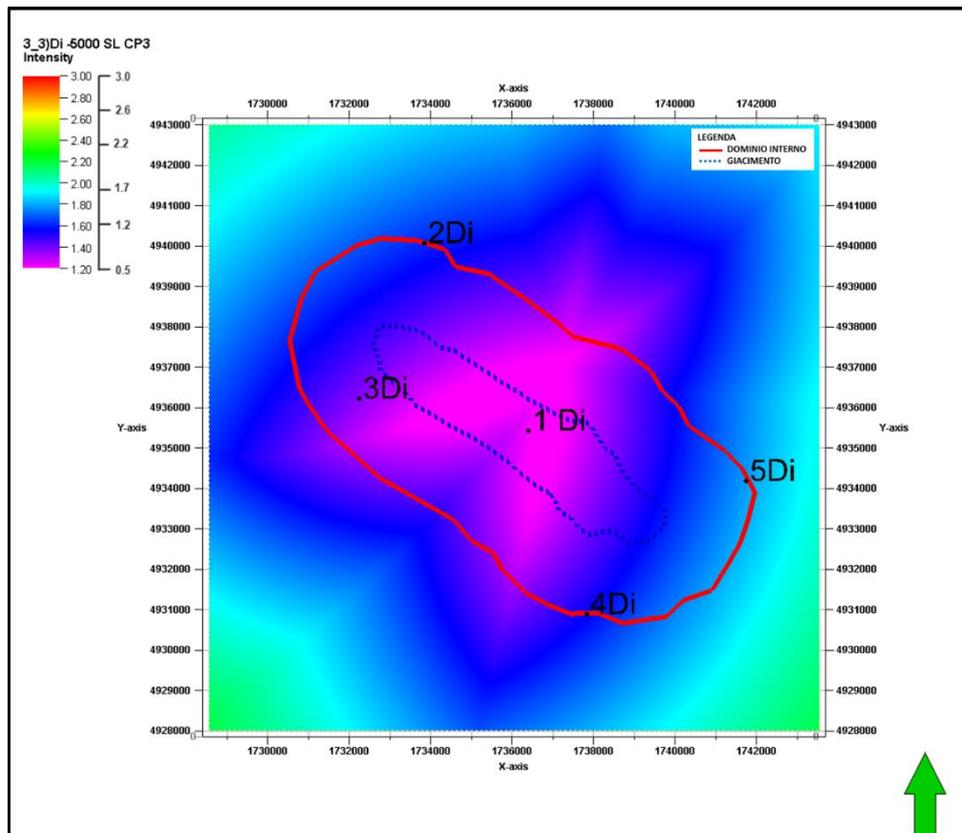


Figura 84. Mappa di localizzazione con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 5000 m

Figure 85 – 87**Magnitudo minime per sola detezone (3 ricevitori)
Rumore di fondo massimo ridotto in tutte le stazioni
Dominio interno
Mappe a diversi livelli di profondita'**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondita' 100 m. Il loro livello di rumore ambientale e' desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di quiete.

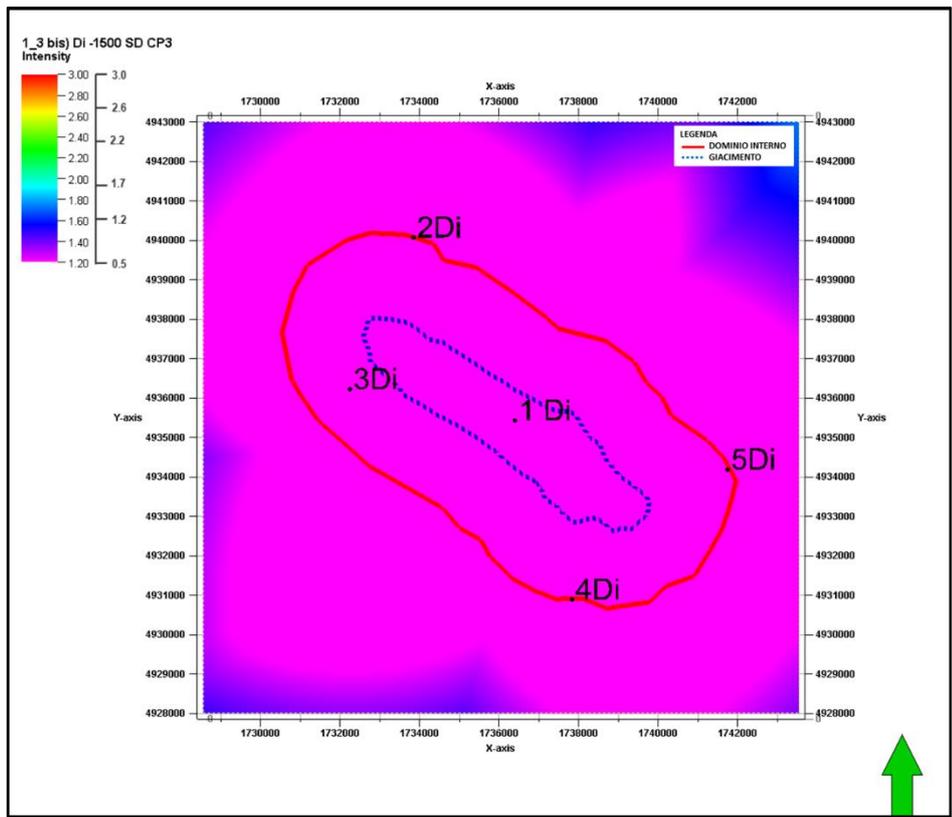


Figura 85. Mapa de deteção com ruído de fundo máximo reduzido alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 1500 m

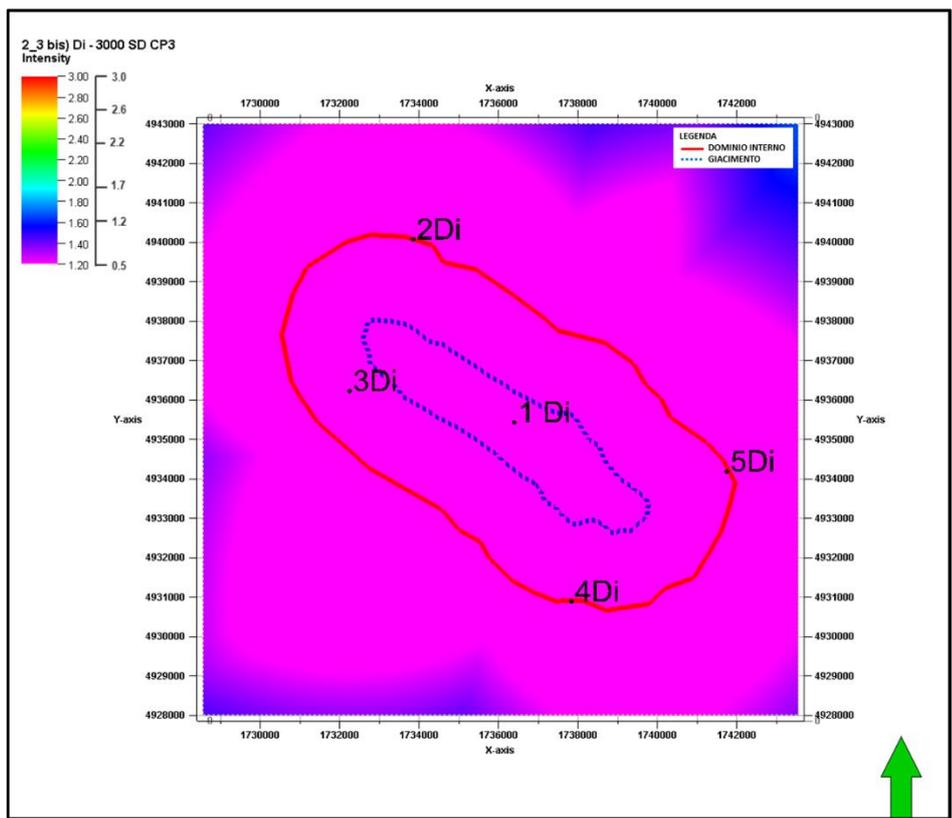


Figura 86. Mapa de deteção con ruído de fundo máximo reduzido alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 3000 m

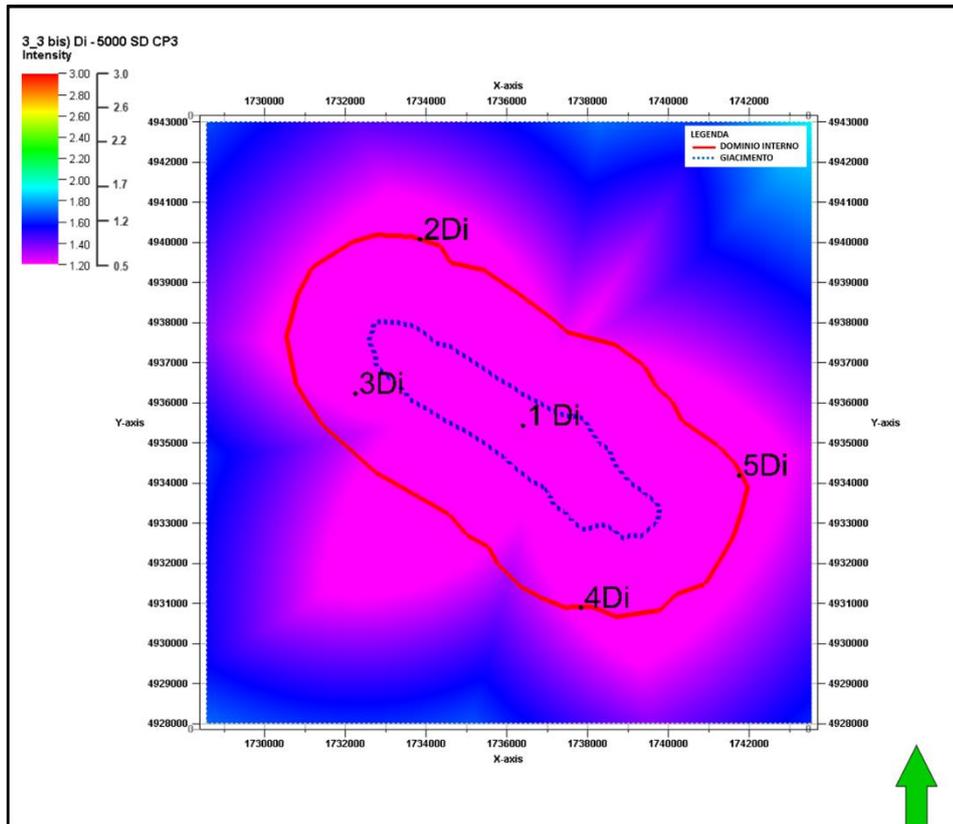


Figura 87. Mappa di detezione con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 5000 m

Figure 88 – 90**Incertezza verticale di localizzazione
Rumore di fondo massimo ridotto in tutte le stazioni
Dominio interno
Mappe a diversi livelli di profondita'**

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondita' 100 m. Il loro livello di rumore ambientale e' desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di quiete.

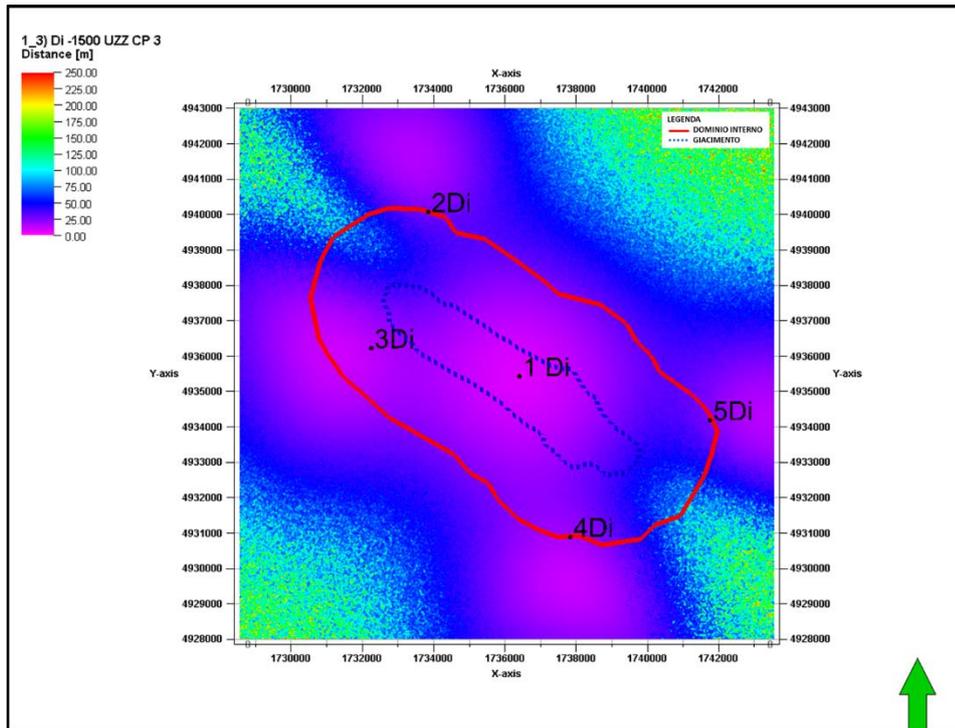


Figura 88. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 1500 m

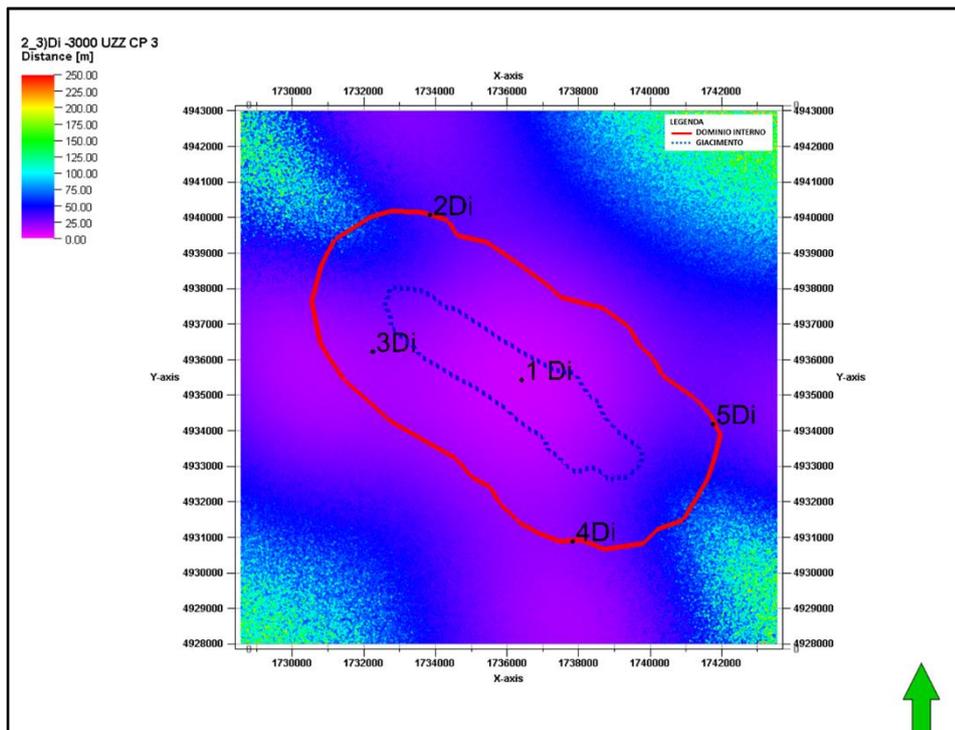


Figura 89. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 3000 m

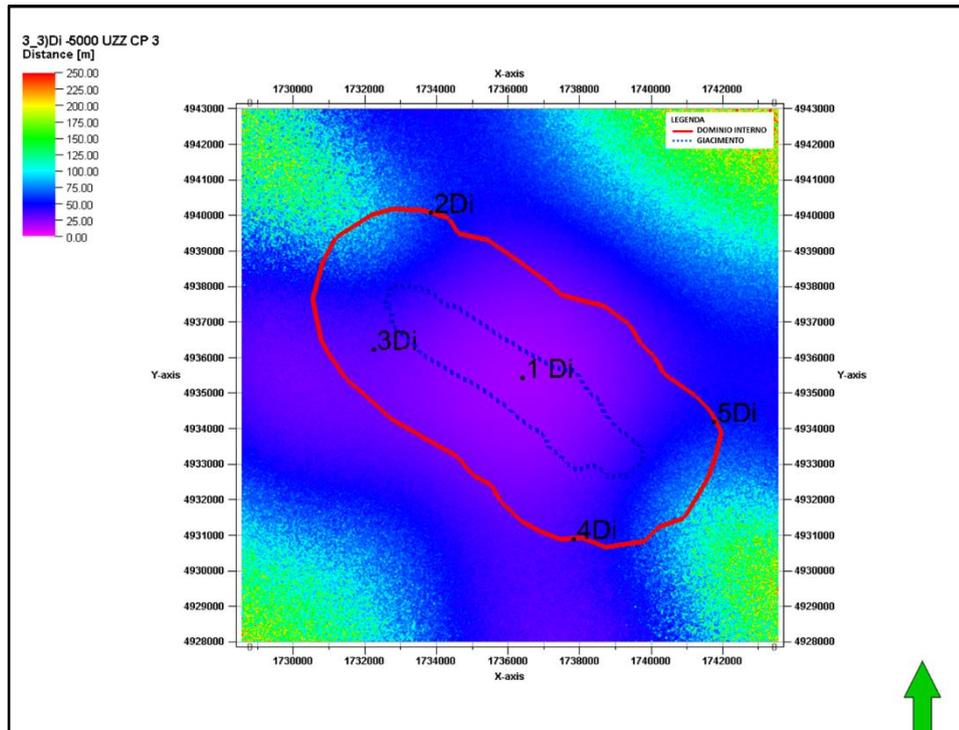


Figura 90. Mappa di incertezza verticale con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 5000 m

Figure 91 – 93

Incerteza orizzontale di localizzazione Rumore di fondo massimo ridotto in tutte le stazioni Dominio interno Mappe a diversi livelli di profondita'

Nota: viene simulato il caso in cui le stazioni del dominio interno sono posizionate in pozzetti superficiali di profondita' 100 m. Il loro livello di rumore ambientale e' desunto dal livello di rumore massimo registrato, ridotto di 10 dB per riprodurre una situazione di quiete.

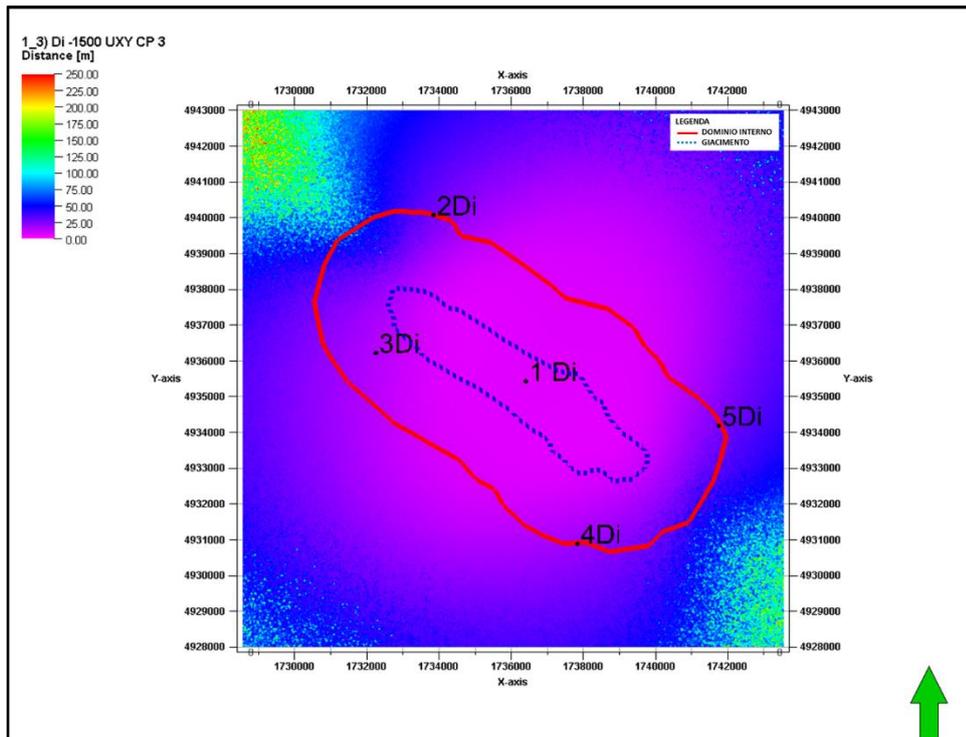


Figura 91. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 1500 m

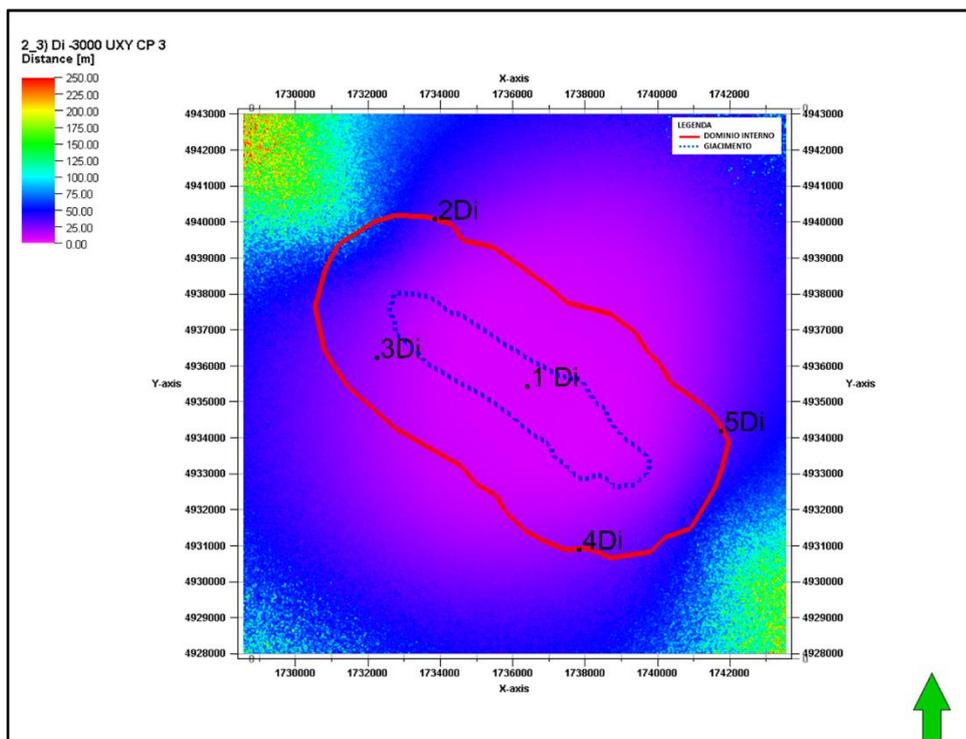


Figura 92. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 3000 m

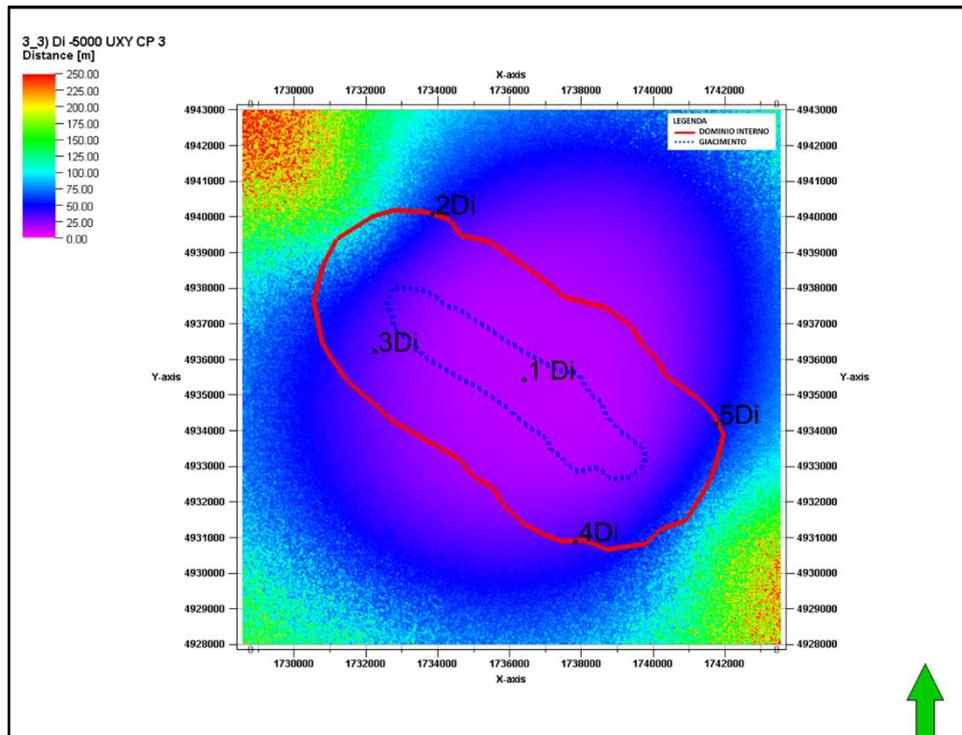


Figura 93. Mappa di incertezza orizzontale con rumore di fondo massimo ridotto alle singole stazioni. Dominio interno (5 stazioni in pozzetto): profondita' 5000 m

Tabella 4. Soglie di detezione e localizzazione e di incertezza riscontrabili al bordo del dominio interno, nelle condizioni di minimo rumore ai ricevitori.

Livello rumore minimo per singola stazione					
Dominio	Profondita' Km	Soglia Detezione (SD) ML	Soglia Localizzazione (SL) ML	Errore Verticale m	Errore Orizzontale m
Interno	1.5	0.5	0.8	50	50
Interno	3.0	0.5	0.8	50	50
Interno	5.0	0.9	1.3	75	60
Esteso	1.5	0.5	0.5	25	25
Esteso	3.0	0.5	0.5	25	25
Esteso	5.0	0.5	0.6	40	25
Esteso	11.0	1.2	1.2	45	40

Tabella 5. Soglie di detezione e localizzazione e di incertezza riscontrabili al bordo del dominio interno, nelle condizioni di massimo rumore ai ricevitori.

Livello rumore massimo per singola stazione					
Dominio	Profondita' Km	Soglia Detezione (SD) ML	Soglia Localizzazione (SL) ML	Errore Verticale m	Errore Orizzontale m
Interno	1.5	1.1	1.9	50	50
Interno	3.0	1.2	1.9	50	50
Interno	5.0	1.7	2.0	75	60
Esteso	1.5	0.9	1.2	25	40
Esteso	3.0	1.0	1.2	25	40
Esteso	5.0	1.6	1.8	25	40
Esteso	11.0	2.2	2.1	60	70

Tabella 6. Soglie di detezione e localizzazione e di incertezza riscontrabili al bordo del dominio interno, nelle condizioni di 2 sensori in pozzetti

Livello rumore massimo ridotto in 2 stazioni					
Dominio	Profondita' Km	Soglia Detezione (SD) ML	Soglia Localizzazione (SL) ML	Errore Verticale m	Errore Orizzontale m
Interno	1.5	0.6	0.8	40	70
Interno	3.0	0.6	0.8	40	70
Interno	5.0	1	1.3	60	85

Tabella 7. Soglie di detezione e localizzazione e di incertezza riscontrabili al bordo del dominio interno, nelle condizioni di 5 sensori in pozzetti

Livello rumore massimo ridotto in 5 stazioni					
Dominio	Profondita' Km	Soglia Detezione (SD) ML	Soglia Localizzazione (SL) ML	Errore Verticale m	Errore Orizzontale m
Interno	1.5	0.5	0.7	30	30
Interno	3.0	0.5	0.7	30	30
Interno	5.0	0.5	1.1	50	60

CONCLUSIONI

Lo studio ivi presentato ha consentito di definire una configurazione geometrica teorica della rete di monitoraggio microsismico della Concessione Alfonsine Stoccaggio e costituisce un aggiornamento dell'analogo documento inviato con comunicazione Stogit Prot. n. 883 del 25 ottobre 2017, e fa seguito alla richiesta di integrazioni pervenuta con comunicazione Prot. n. DVA.REGISTRO UFFICIALE.U.009451 del 23 aprile 2018.

In riferimento ai criteri enunciati nelle Linee-guida pubblicate dal Ministero dello Sviluppo Economico nel novembre 2014, la progettazione prevede una rete composta da 5 stazioni in grado di coprire l'area interessata dal giacimento e dal dominio interno e una rete di 11 stazioni per l'area corrispondente al dominio esteso.

Sulla base degli scenari ipotizzati nello studio e di quanto riportato principalmente nelle Tabelle 4, 5 e 6, vengono fornite le seguenti indicazioni sui valori di magnitudo minima e sul margine di incertezza.

Le simulazioni effettuate mostrano come le prestazioni della rete siano principalmente influenzate dal rumore ambientale delle singole stazioni.

I valori di magnitudo minima ritenuti significativi per la performance di una futura rete vengono letti in corrispondenza del limite del dominio interno. Ovviamente sono possibili anche magnitudo inferiori a quelle elencate se si restringe la lettura in un'area centrata sul giacimento.

Assumendo livelli minimi di rumore si hanno soglie di localizzazione (magnitudo minime) di 0.5-0.8 ML sia nel dominio interno che in quello esteso, per profondità comprese tra 1.5 e 3 km. A profondità maggiori (5-11 km), tuttavia, la soglia di localizzazione raggiunge valori di magnitudo minima di 1.2-1.3.

Assumendo livelli massimi di rumore la soglia di localizzazione è compresa tra 1.2 e 1.9 ML (magnitudo minime) per profondità fino a 3 km. Anche in questo caso, per profondità comprese tra 5 e 11 km, la magnitudo minima sale a valori compresi tra 1.8 e 2.1 nel dominio esteso.

Un maggiore affinamento delle prestazioni si può prevedere posizionando i geofoni in pozzetti profondi circa 100 m.

Nella prima simulazione si ipotizza un sistema misto piano campagna-pozzo, in cui tre stazioni vengono mantenute sul piano campagna e le restanti due vengano poste in profondità. In questo caso, si raggiungono soglie di localizzazione di 0.8 ML che rientrano nell'ambito di magnitudo minime desiderate.

Nella seconda simulazione, si ipotizza che tutti i cinque geofoni del dominio interno vengano posti in pozzo. In questo caso la soglia di localizzazione si riduce ulteriormente a 0.7 ML e soddisfa con buon margine le prestazioni richieste dalle Linee Guida ($ML < 1$).

Le incertezze di localizzazione sono relativamente contenute in tutti i casi, non eccedendo mai la distanza di 90 m.

In conclusione, dalle simulazioni effettuate si evince che la configurazione della rete microsismica ipotizzata, di cui due con sismometri installati in pozzetti profondi circa 100 m, soddisfa i requisiti indicati nelle richieste integrative del Ministero dell'Ambiente, sia in termini di Magnitudo rilevata e localizzata, sia in termini di incertezze nella localizzazione. Verrà ulteriormente valutato in fase di realizzazione se integrare la rete con un maggior numero di pozzetti.

Riferimenti bibliografici

Boore D. M., 1988

The Richter scale: its development and use for determining earthquake source parameters
Tectonophysics, 166 (1989) 1-14

Bragato P.L., Sukan M., Augliera P., Massa M., Vuan A. & Saraò A., 2011

Moho Reflection Effects in the Po Plain (Northern Italy) Observed from Instrumental and Intensity Data
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 5, pp. 2142–2152, doi: 10.1785/0120100257

Brie A., Pampuri F., Marsala A.F. & Meazza O., 1995

Shear sonic interpretation in gas-bearing sands, SPE 30595

Brocher T.M., 2015

Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 6, pp. 2081–2092, December 2005,

Brune, J.N., 1970

Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes
Jour. Geoph. Res., 75, 4997-5009

Castagna J.P., Batzle M.L., and Eastwood R.L., 1985

Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks
Geophysics, Vol. 50, n.4 (APRIL 1985); P. 571-581,

Fantoni R. & Franciosi R., 2008

8 geological sections crossing Po Plain and Adriatic foreland
Rend. Online Soc. Geol. It., 3 , 365-366

Gardner, G. H. F., L. W. Gardner, and A. R. Gregory (1974).

Formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps,
Geophysics **39**, 770–780.

Goertz -Allmann B. P., Edwards B., Bethmann F., Deichmann N., Clinton J., Fäh D., and Giardini D.

A New Empirical Magnitude Scaling Relation for Switzerland
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 6, pp. 3088–3095, December 2011, doi: 10.1785/0120100291

Hanks, T.C., Kanamori, 1979

A Moment magnitude scale, Jour. Geoph. Res., 84(B5), 2348-2350

Madariaga, R., 1976

Dynamics of an expanding circular fault., Bull. Seis. Soc. Am. 66, 639-666

Malagnini L., Herrmann R.B., Munafò I., Buttinelli M., Anselmi M., Akinci A. & Boschi E., 2012

The 2012 Ferrara seismic sequence: Regional crustal structure, earthquake sources, and seismic hazard
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 39, L19302, doi:10.1029/2012GL053214

Mariucci M.T., Montone P., 2014

P wave velocity and density: Borehole data for a better Shallow Crust model in the Po plain
AGU, FALL MEETING

Molinari I., Argnani A., Morelli A. and Basini P., 2015

Development and Testing of a 3D Seismic Velocity Model of the Po Plain Sedimentary Basin, Italy
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 105, No. 2A, pp. 753–764, April 2015, doi: 10.1785/0120140204

Pieri M., Groppi G., 1981

Subsurface geological structure of the Po plain, Italy
CNR, Prog.Finalizzato Geodinamica, Pubblicazione n.414

Raymer D. G., Leslie H. D., 2011

Microseismic Network Design - Estimating Event Detection

73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2011 Vienna, Austria, 23-26 May 2011

Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., 2007

Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications

Ital.J.Geosci. (Boll.Soc.Geol.It.), Vol. 128, No. 2 (2009), pp. 605-613, 5 figs. (DOI: 10.3301/IJG.2009.128.2.605)

Vuan A., Klin P., Laurenzano G. & Priolo E., 2011

Far-Source Long-Period Displacement Response Spectra in the Po and Venetian Plains (Italy) from 3D Wavefield Simulations

Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 3, pp. 1055-1072, doi: 10.1785/0120090371

Williams, D.M., 1990

The acoustic log hydrocarbon indicator

SPWLA 31st Ann. Logging Symp., June 24-27, 1990, Paper W.