

ZondGM3D

Programma per l'interpretazione tridimensionale di dati gravimetrici e magnetici. Manuale d'uso

Indice

Introduzione

Requisiti di sistema

Installazione e disinstallazione

Breve richiamo teorico

- Prospezione magnetica

- Prospezione gravimetrica

- Problema diretto e inverso

- Finestra principale

- Barra degli strumenti

- Sottomenu del modello 3D

- Funzioni del menu principale

- Barra di stato

- Tasti rapidi

Creazione di un rilievo sintetico

Caricamento dei dati di campagna

- Formato del file dati *.gm3

- Editor dei profili

- Finestra Mesh constructor

- Campo normale e parametri di misura

Visualizzazione dei dati

- Mappa dei grafici

Modellazione

- Modifica del modello

- Salvataggio e uso dei dati di modello

- Impostazioni dell'inversione

- Trasformazioni del campo (menu Operations)

- Deconvoluzione di Euler

- Trasformazione rapida del campo in sezione

- Sfondi grafici per modelli 2D e 3D

- Creazione dei dati di sondaggio
- Risultati dell'interpretazione
 - Visualizzazione della sezione
 - Visualizzazione del modello 3D
 - Più modelli in un progetto
- Salvataggio dei risultati
- Finestre di impostazione grafica
 - Esportazione della sezione
 - Impostazioni della mappa a isolinee
 - Editor degli assi
 - Impostazioni di visualizzazione del modello
 - Impostazioni della mappa dei grafici e dei punti
 - Editor del grafico
 - Anteprima di stampa
- Algoritmi di elaborazione e prestazioni
- Bibliografia
- Materiali aggiuntivi

Introduzione

ZondGM3D è destinato all'interpretazione tridimensionale di dati areali di prospezione magnetica e gravimetrica.

Il programma risolve i problemi diretto e inverso della magnetometria e della gravimetria (ricostruzione della suscettività magnetica anomala, della densità e della geometria dei corpi anomali).

Nel problema inverso si presta particolare attenzione all'informazione a priori (pesi delle singole misure, intervalli dei parametri).

ZondGM3D utilizza un formato di file dati semplice e chiaro.

Il programma può importare e visualizzare risultati di altri metodi, favorendo un'interpretazione integrata.

La suscettività magnetica è espressa in unità SI ($n \cdot 10^{-5}$), la densità in g/cm³; i valori misurati in nanotesla e milligal.

Un'interfaccia comoda e ampie possibilità di rappresentazione permettono di risolvere il problema geologico nel modo più efficiente.

Requisiti di sistema

ZondGM3D si installa su un computer con Windows 7 a 64 bit o successivo. Configurazione minima: processore P IV-2 GHz, 4 GB di memoria (consigliati almeno 32 GB), risoluzione 1024 X 768 (non cambiare la risoluzione durante il lavoro con i dati), modalità colore True color.

Poiché il programma usa il registro di sistema, nei sistemi successivi a Windows XP va eseguito come amministratore (clic destro sull'icona – Esegui come amministratore).

Installazione e disinstallazione

ZondGM3D è distribuito via Internet. Il presente manuale è incluso nel pacchetto. Gli aggiornamenti si scaricano da <http://zond-geo.com/>.

Per installare, salvare il programma nella cartella desiderata (ad esempio C:\Zond). Per aggiornare, sovrascrivere la vecchia versione con la nuova.

Prima del primo avvio va installato il driver della chiave di protezione SenseLock: aprire la cartella SenseLock (il driver si scarica dal sito) ed eseguire InstWiz3.exe. Dopo l'installazione inserire la chiave; se tutto è corretto, nell'area di notifica compare un messaggio di chiave rilevata.

Per disinstallare il programma, eliminare la sua cartella di lavoro.

Breve richiamo teorico

Un manuale non può coprire tutta la teoria dei metodi geofisici, delle proprietà fisiche delle rocce e della soluzione del problema inverso; si forniscono quindi solo brevi nozioni.

Prospezione magnetica

Il metodo tradizionale per la ricerca di corpi ferriferi è la magnetometria, che studia il campo magnetico generato da corpi contenenti minerali ferromagnetici. Il legame tra le grandezze misurate in superficie e le proprietà magnetiche del sottosuolo consente di dedurre la presenza di corpi magneticamente perturbanti.

Si misura il campo magnetico totale, somma del campo normale terrestre, del campo anomalo dei corpi magnetizzati e delle variazioni del campo, legate soprattutto all'attività solare. La componente utile è il campo anomalo, separabile tenendo conto del campo normale e misurando le variazioni nell'area di lavoro.

Il campo in superficie è la somma vettoriale $T = T_n + T_a + \delta T_v$, dove T_n e T_a sono i campi normale e anomalo e δT_v il campo delle variazioni. Il campo normale si divide in parte dipolare T_d e non dipolare T_m : $T_n = T_d + T_m$.

Il campo dipolare T_d , che descrive in prima approssimazione il campo geomagnetico, è il campo di una sfera uniformemente magnetizzata. La differenza tra campo dipolare (calcolato) e campo normale reale (misurato da satellite) è la parte non dipolare T_m , detta campo residuo o delle anomalie continentali (di dimensioni paragonabili ai continenti); i suoi valori massimi non superano il 30% del campo dipolare.

T_n cresce gradualmente da 33000 nT all'equatore a 68000 nT presso i poli; la componente verticale raggiunge 60000 nT presso il polo nord, cambia segno all'equatore e diminuisce da 0 all'equatore a -68000 nT al polo sud. La componente orizzontale è massima presso l'equatore (33000 nT) e si annulla ai poli. Il gradiente del campo normale è di circa 5 nT per chilometro.

T_a è tipicamente circa il 10% di T_n ; fa eccezione l'anomalia magnetica di Kursk, dove T_a raggiunge decine di migliaia di nT.

Le anomalie magnetiche delle rocce si dividono convenzionalmente in regionali e locali.

La parte variabile δT_v è formata dalle variazioni magnetiche, con contributo inferiore all'1% del campo totale. Le principali sono periodiche (oscillazioni solari diurne e di breve periodo) e aperiodiche (baie e tempeste magnetiche).

Tutte le variazioni sono dovute a sorgenti esterne alla Terra: interazione di particelle cariche con la ionosfera, correnti elettriche nelle zone ad alta latitudine a 100-150 km di quota, ecc. La correzione delle variazioni è in generale importante, perché distorcono sensibilmente i dati osservati.

La capacità di materiali e rocce di magnetizzarsi è caratterizzata dalla suscettività magnetica χ , principale proprietà magnetica delle rocce.

Nel SI è adimensionale e si misura di solito in 10^{-5} unità SI; per le diverse rocce varia da 0 a 10 unità SI. Minerali e rocce si dividono in diamagnetici, paramagnetici e ferromagnetici. Le rocce diamagnetiche hanno suscettività molto piccola (meno di 10^{-5} SI) e negativa; la loro

magnetizzazione è opposta al campo. Sono diamagnetici quarzo, salgemma, marmo, petrolio, ghiaccio, grafite, oro, argento, piombo, rame e altri [Khmelevskoy, 1997].

Le rocce paramagnetiche hanno suscettività positiva e anch'essa piccola; sono paramagnetici la maggior parte dei minerali e delle rocce sedimentarie, metamorfiche e ignee.

I minerali ferromagnetici (magnetite, titanomagnetite, ilmenite, pirrotite) hanno χ particolarmente alta (fino a diversi milioni di 10^{-5} SI).

La suscettività della maggior parte delle rocce dipende soprattutto dalla presenza e dalla percentuale di minerali ferromagnetici.

La tabella riporta χ di alcuni minerali e rocce. I minerali ferromagnetici sono fortemente magnetici; tra le rocce ignee le ultrabasiche e basiche hanno la suscettività maggiore, le acide sono debolmente magnetiche; le metamorfiche hanno suscettività inferiore alle ignee; le sedimentarie, salvo alcune arenarie e argille, sono praticamente non magnetiche.

Minerale, roccia	$\chi \cdot 10^{-5}$ SI, intervallo	media
Quarzo	-	10
Calcite	7 - 12	-
Gesso	-	12
Carbone	-	25
Sfalerite	-	750
Ematite	500 - 50000	6000
Pirrotite	10^3 - 10^7	150000
Ilmenite	$5 \cdot 10^5$ - $5 \cdot 10^6$	10^6
Magnetite	10^6 - 10^7	$5 \cdot 10^6$
Calcare	25 - 3500	300
Arenaria	0 - 20000	400
Gneiss	100 - 20000	-
Granito	0 - 40000	2000
Diabase	1000 - 15000	5000
Gabbro	1000 - 100000	60000
Basalto	30 - 150000	60000
Peridotite	90000 - 200000	150000
Sedimentarie (media)	0 - 5000	1000
Metamorfiche (media)	0 - 75000	50000
Ignei acide (media)	50 - 80000	8000
Ignei basiche (media)	60 - 120000	30000

Per convertire χ nel sistema CGS usato dal programma, la suscettività SI si divide per 4π .

La suscettività di para- e ferromagnetici diminuisce con la temperatura e quasi si annulla alla temperatura di Curie, compresa tra +400 e +700 °C. La profondità massima d'indagine della

magnetometria è di circa 25 - 50 km; più in profondità la temperatura supera il punto di Curie e tutte le rocce diventano praticamente non magnetiche.

Le rocce delle strutture geologiche sono inglobate in rocce incassanti; perciò, come in gravimetria, interessa non la suscettività assoluta delle strutture (χ_{str}) ma il suo contrasto, la cosiddetta suscettività efficace ($\Delta\chi$), positiva o negativa e di diversa entità. Le anomalie magnetiche nascono perché $\Delta\chi$ è diversa da zero [Khmelevskoy, 1997].

Prospezione gravimetrica

Per progettare un rilievo gravimetrico e soprattutto interpretarlo occorre conoscere la densità delle rocce σ , unico parametro fisico su cui si basa la gravimetria.

La densità di una roccia è la massa per unità di volume, in g/cm^3 . Si determina di solito su campioni da affioramenti, sondaggi e scavi. Il metodo più semplice è pesare il campione in aria e in acqua e calcolare σ ; su questo principio si basa il densimetro, che misura σ con precisione di $0,01 \text{ g/cm}^3$ [Khmelevskoy, 1997].

Per risultati affidabili servono molti campioni (fino a 50). Dalle misure ripetute su un complesso litologico si costruisce una curva di variazione (numero di campioni in funzione della densità), il cui massimo dà la densità più probabile. Esistono anche metodi gravimetrici e altri metodi geofisici per determinare la densità in campagna e in pozzo.

La densità di rocce e minerali dipende dalla composizione chimico-mineralogica, cioè dalla densità dei grani, dalla porosità e dal fluido nei pori (acqua, salamoie, petrolio, gas). Nelle rocce ignee e metamorfiche dipende soprattutto dalla composizione mineralogica e cresce dalle acide alle basiche e ultrabasiche. Nelle sedimentarie dipende soprattutto da porosità e saturazione e meno dalla composizione; cresce con consolidazione, età e profondità. Esempi nella tabella [Khmelevskoy, 1997].

Roccia	Densità (g/cm^3)
Petrolio	0,8 - 1,0
Carbone	1,0
Acqua	1,1 - 2
Suolo	1,13 - 2,0
Sabbia	1,4 - 2
Argilla	2 - 2,2
Arenaria	1,8 - 2,8
Calccare	2,3 - 3,0
Sale	2,1 - 2,4
Granito	2,4 - 2,9
Gneiss	2,6 - 2,9
Gabbro	2,8 - 3,1
Basalto	2,7 - 3,3
Peridotite	2,8 - 3,4
Calcopirite	4,1 - 4,3

Roccia	Densità (g/cm ³)
Magnetite, ematite	4,9 - 5,2
Crosta superiore (media)	2,67

Problema diretto e inverso

Il calcolo della risposta geofisica di un modello di geometria e proprietà note è il problema diretto; la ricerca di geometria e proprietà a partire dai valori osservati è il problema inverso.

Il problema diretto si risolve in modo semianalitico, quello inverso con i minimi quadrati regolarizzati. La regolarizzazione aumenta la stabilità e fornisce una distribuzione dei parametri più regolare:

$$(A^T W^T W A + \mu C^T R C) \Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T R C m$$

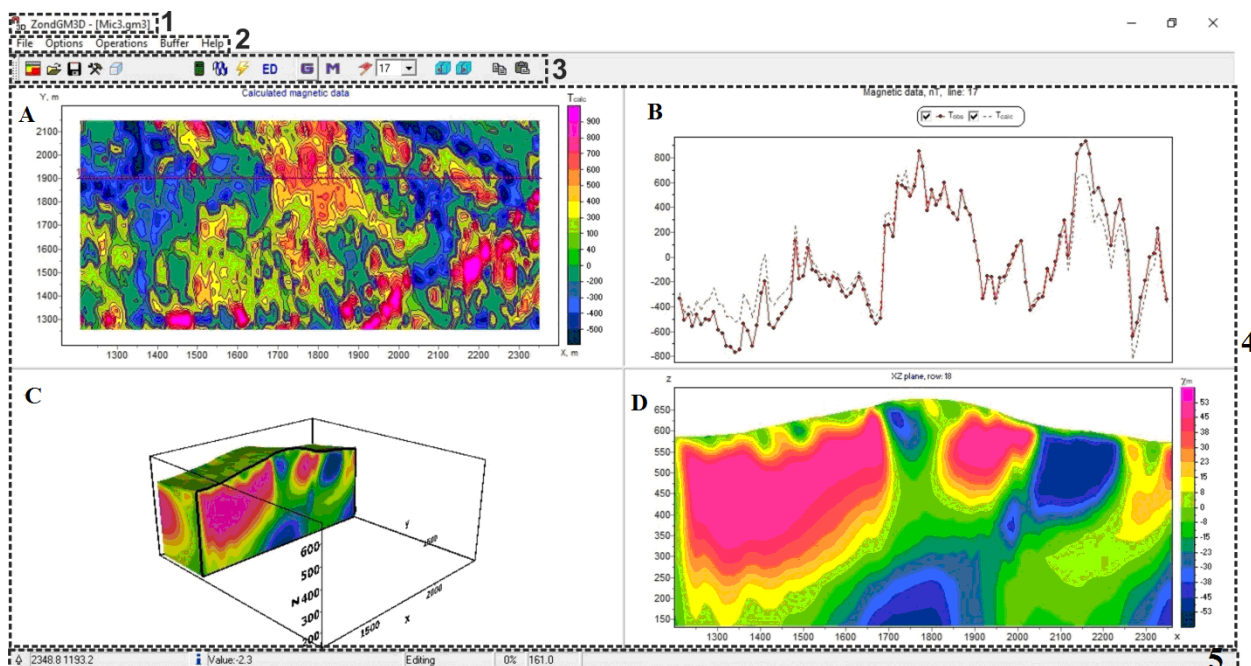
dove A è la matrice delle derivate parziali dei valori misurati rispetto ai parametri (jacobiano), C l'operatore di lisciatura, W la matrice degli errori relativi di misura, m il vettore dei parametri, μ il parametro di regolarizzazione, Δf il vettore dei residui tra valori osservati e calcolati e R l'operatore di focalizzazione. # Primi passi

Questa sezione descrive la finestra principale, le funzioni del menu, i pulsanti della barra degli strumenti e i tasti rapidi.

Per un suggerimento su un'opzione di menu, fare clic destro su di essa.

Finestra principale

La finestra principale è mostrata sotto: barra del titolo, menu principale, icone della barra degli strumenti, area di lavoro e barra di stato.



1. Finestra principale. 1 - titolo, 2 - menu principale, 3 - barra degli strumenti, 4 - area di lavoro (A - pianta, B - area dei dati di profilo, C - area del modello 3D, D - editor del modello), 5 - barra di stato

L'area di lavoro di **ZondGM3D** è divisa in 4 sezioni:

A - in alto a sinistra la **pianta dei dati**: valori osservati, calcolati o residui come mappa a isolinee, mappa dei grafici o mappa a punti.

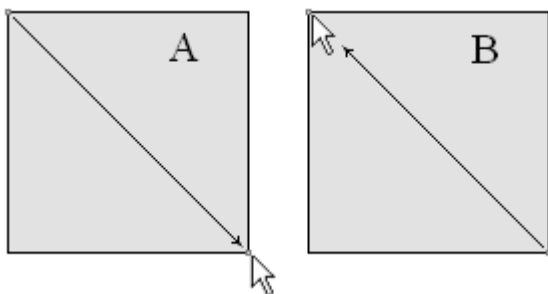
B - in alto a destra l'**area dei dati di profilo** con curve osservate e calcolate. Il profilo si sceglie nella barra .

C - in basso a sinistra l'**area del modello 3D**.

D - in basso a destra l'**editor del modello** come sezione (2D) lungo il taglio scelto, selezionato con i pulsanti «   ». L'orientamento si cambia con **Options / Model / Plane**.

Il clic destro su una parte dell'area di lavoro apre un menu di impostazioni, descritte nelle sezioni corrispondenti.

Per tutti gli oggetti tranne il modello 3D, zoom e spostamento si eseguono con il tasto sinistro premuto («rettangolo elastico»): spostare il mouse in basso a destra per ingrandire (figura, A), in alto a sinistra per tornare alla scala originale (figura, B).



2. Movimento del mouse per lo zoom

Barra degli strumenti

La barra dà accesso rapido alle funzioni più usate (da sinistra a destra):

-  — Creare un rilievo sintetico per la modellazione.
-  — Aprire un file dati o progetto *.GM3.
-  — Salvare il file dati o progetto.
-  — Parametri di inversione.
-  — Impostazioni di visualizzazione del modello 3D.
-  — Calcolo del problema diretto. Al primo avvio per la maglia (e il metodo) correnti si calcolano i nuclei, operazione lunga che può richiedere molta memoria; poi restano in memoria e si ricalcolano solo se cambiano la maglia o i parametri del campo normale.
-   — Avviare l'inversione o fermarla (secondo clic).

-  — Trasformazione rapida del campo in sezione.
-  — Finestra della deconvoluzione di Euler.
-  — Modalità dati gravimetrici.
-  — Modalità dati magnetici.
-  — Elenco per scegliere il profilo corrente.
-  — Sezione precedente/successiva del modello.
-  — Copiare la sezione corrente negli appunti.
-  — Clic sinistro: incollare il modello dagli appunti nella sezione corrente. Clic destro: opzioni **Current** (sezione corrente), **Current&+** (corrente e successive), **Current&-** (corrente e precedenti), **All params** (tutti i parametri della sezione).

Sottomenu del modello 3D

Si apre con il pulsante  della barra principale e contiene:

- **3D view settings** — Impostazioni del modello 3D.
- **Print preview** — Stampa del modello 3D.
- **Plane cut** — Orientamento della sezione (XZ, YZ, XY).
- **Model** — Modello iniziale: *Halfspace value* - nuovo valore del mezzo incassante; *Clear model* - cancellare il modello; *Clear limits* - eliminare i limiti; *MinMax auto* - limiti automatici; *Smooth/raster model* - lisciare/raggruppare il modello (con **rasterization** si raggruppano celle simili secondo il contrasto **Degree**, con **Smoothing** si mediano i parametri secondo il fattore **Degree**).
- **Axes settings** — Impostazioni degli assi (X,Y,Z).
- **Show** — Oggetti visualizzati: *Cutting plane* - posizione della sezione; *Survey points* - punti di misura; *Boreholes* - log e litologia; *Background* - sfondo 3D.
- **Synchronous cut** — Spostare la sezione 3D insieme alla pianta 2D con i pulsanti .
- **X:Y:Z 1:1:1** — Scale uguali sui tre assi.

Funzioni del menu principale

- **File**
- **File / Create survey** — Creare un rilievo sintetico.
- **File / Open file** — Aprire un file dati o progetto *.GM3.
- **File / Import from text/excel** — Importare dati da un file di testo (o tabella Excel) a più colonne; i nomi delle colonne vanno nella prima riga.
- **File / Save file** — Salvataggio.

- **File / Edit file** — Aprire il file dati in Blocco note.
- **File / Print preview** — Stampa della finestra principale.
- **File / Recent** — Progetti recenti.
- **File / Exit** — Uscire.
- **Options**
- **Options / Project information** — Informazioni modificabili sul progetto.
- **Options / Mesh constructor** — Costruttore della maglia di modellazione con opzioni automatiche e impostazioni fini per utenti esperti; la scelta corretta della maglia è uno dei compiti principali dell'interprete.
- **Options / Set survey line** — Definire le linee di profilo e visualizzare le curve lungo di esse.
- **Options / Lines from mesh** — Creare automaticamente le linee di profilo dalla geometria del rilievo (se non definite nel file).
- **Options / Observation settings** — Parametri del campo magnetico normale e altri parametri di misura.
- **Options / Program setup** — Impostazioni principali, in gran parte per l'inversione.
- **Options / Data / Contour map, Graphics map, Points map** — Dati come mappa a isolinee, mappa dei grafici o punti (colore secondo la scala, dimensione con la rotella).
- **Options / Data / Observed data, Calculated data, Data misfit** — Mostrare in pianta dati osservati, calcolati o residui.
- **Options / Model / Block-section** — Modello a blocchi.
- **Options / Model / Smooth section** — Modello a isolinee; per una tavolozza continua attivare **Continuous** nella scheda **Colors** di **Model setup**.
- **Options / Model / 2D mode** — Per un solo profilo o una sezione 2D: le celle in Y vengono unite.
- **Options / Model / Infinite borders** — I corpi di bordo vengono prolungati oltre l'area visibile; utile quando i campi ai bordi non raggiungono il valore di fondo.
- **Options / Model / Plane** — Orientamento XZ, YZ, XY della sezione; **Autosize** - scala automatica.
- **Options / Model / Model histogram** — Distribuzione del parametro; permette di fissare minimo e massimo della scala.
- **Options / Inversion / Smoothness** — Opzioni di lisciatura (secondo termine della funzione obiettivo $C^*(m-m_0)$), con forte influenza sul risultato: «**0**» - m_0 modello nullo senza sorgenti; **Median** - m_0 mediana del modello all'iterazione corrente (scelta migliore per *Focused*); **Start model** - m_0 modello di riferimento dell'utente o di un'inversione precedente; **Previous** - m_0 modello dell'iterazione precedente; la vicinanza è controllata da *Smoothing factor* (per *Occam* e *Focused*). **Diagonal filter** - lisciatura diagonale per strutture inclinate.
- **Options / Inversion / Resolution** — Aumentano l'influenza delle celle poco sensibili e riducono quella delle molto sensibili per rilevare corpi più piccoli in profondità; usare con cautela. **Log norm** - norma log-lineare, corpi più compatti e contrastati, convergenza più lenta e non garantita.

- **Options / Inversion / Cross-gradient / Pushing factor** — Parametro principale dell'inversione congiunta (somiglianza dei modelli tramite gradiente incrociato), scelto per tentativi tra 0 e 1000; con 0 i modelli sono indipendenti.
- **Options / Inversion / Cross-gradient / Up Off layers num** — Escludere alcuni strati superiori, spesso molto eterogenei, dall'operatore di gradiente incrociato.
- **Options / Inversion / Cross-gradient / Joint inversion** — Inversione congiunta magnetica e gravimetrica; richiede il doppio della memoria.
- **Options / Inversion / Line search** — Ricerca dello smorzamento ottimale a ogni iterazione (rallenta di 3-4 volte); di solito raggiunge il residuo minimo in poche iterazioni, ma può portare a un minimo locale.
- **Options / Inversion / Optimization / Lim based inv** — Con limiti stretti, riduce il contributo delle celle che li superano e usa norme che ne ostacolano l'uscita.
- **Options / Inversion / Groups blank cells** — Raggruppare le celle fuori dall'area del rilievo.
- **Options / Inversion / With derivative** — Includere le derivate orizzontali del campo: risultati più stabili, più memoria e tempo.
- **Options / Import/Export / Background 2D** — Caricare (**Load background**, con coordinate degli angoli) o rimuovere (**Remove current**) lo sfondo della sezione 2D.
- **Options / Import/Export / Background 3D** — Caricare uno sfondo per il modello 3D con coordinate 3D degli angoli (un colore può diventare trasparente) o rimuoverlo.
- **Options / Import/Export / Import mod3D, Export mod3D** — Importare/esportare il modello 3D in formato MOD3D.
- **Options / Import/Export / Export mod2D** — Esportare la sezione 2D in MOD2D (apribile in **ZondGM2D**).
- **Options / Import/Export / Import mod2D's** — Importare un insieme di modelli 2D con le loro coordinate e inserirli nel modello 3D.
- **Options / Import/Export / Save rotations, Save slides, Save 3D image** — Salvare il modello 3D come serie di immagini per diverse rotazioni o posizioni della sezione, o come *.bmp.
- **Options / Import/Export / Output settings** — Impostazioni dell'immagine esportata.
- **Options / Import/Export / Draw to surfer, Draw to voxler** — Costruire il modello in Surfer (sezioni in profondità) o in Voxler (indicare una volta il percorso di Scripiter.exe).
- **Options / Boreholes** — **Load borehole data** (log e colonne litologiche crt, file mod1d), **Create/Edit borehole data**, **Remove borehole data**, **Set column's width** (percentuale della lunghezza del profilo), **Edit positions**.
- **Operations**
 - **Operations / Bouguer&Free Air** — Densità dello strato intermedio in kg/m³ e relative correzioni (modalità gravimetrica).
 - **Operations / Subtract incident field** — Sottrarre il campo normale dai valori magnetici misurati.

- **Operations / Smooth data** — Lisciare i dati areali della modalità corrente. Il programma chiede il raggio R (predefinito: due spaziature medie). In ogni punto si adatta ai vicini entro 1,5R una superficie quadratica locale con pesi gaussiani ($\sigma = R/2$), il cui valore sostituisce quello osservato. Si usano tutti i punti; quelli coincidenti (entro 0,1 m) sono esclusi. Ogni nuovo raggio si applica ai dati originali. Dopo la lisciatura le derivate dello strato equivalente vengono azzerate e lo strato va ricalcolato.
- **Operations / Subtract median field** — Sottrarre la mediana.
- **Operations / Subtract user value** — Sottrarre un valore dato.
- **Operations / Return to original data** — Tornare ai dati originali.
- **Operations / Reduce to pole** — Riduzione al polo (RTP): i valori osservati sono sostituiti dal campo dello strato equivalente con magnetizzazione e campo normale verticali (componente verticale); le anomalie si portano sopra i centri delle sorgenti. Prima va calcolato lo strato equivalente (**Operations / Equivalent layer**). Non si applica in modalità gravimetrica. Vicino all'equatore magnetico (inclinazione sotto 15-20°) è instabile: controllare l'errore di verifica dello strato.
- **Operations / Equivalent layer** — Calcolare lo strato equivalente: sorgenti puntiformi sotto la topografia il cui campo coincide con quello osservato. Da esso si calcolano analiticamente campo, derivate dT/dx , dT/dy , dT/dz e riduzione al polo; serve per Euler e **Reduce to pole**. Vedere «Trasformazioni del campo».
- **Buffer** — **Model 1, 2....** - fino a quattro modelli 3D per il confronto; **Open** - finestra con tutti i modelli per la sezione corrente; **Only current** - solo il parametro corrente.
- **Help** — **Manual**; **Check for updates**; **Restart library** (riavvio delle DLL; se il calcolo si ferma a ogni inversione, controllare l'antivirus); **Bing maps api_key** (chiave propria se le mappe non si caricano); **Show news**; **Send message to us** (solo caratteri latini).

Barra di stato

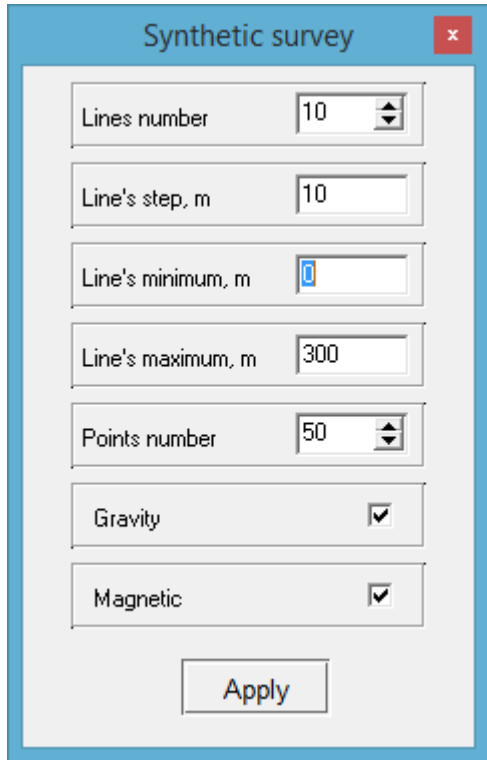
La barra di stato in basso mostra: coordinate del cursore e della cella attiva; parametri della cella attiva; modalità dell'editor; indicatore di processo; residuo relativo; informazioni aggiuntive (numero di misure e celle, stato dell'inversione).

Tasti rapidi

- **Frecce / cursore nell'editor** — Cambiare la cella attiva.
- **Delete / cursore nell'editor** — Riportare la cella al valore del semispazio.
- **Insert / cursore nell'editor** — Assegnare il valore corrente alla cella attiva.
- **X / cursore nell'editor** — Selezionare celle di valore simile.
- **V / cursore nell'editor** — Annullare la selezione.
- **Ctrl+C / cursore nell'editor** — Spostare con il mouse l'area selezionata.
- **Su/Giù / cursore sulla scala colori** — Cambiare il valore corrente.
- **Alt+1, Alt+2, Alt+3** — Sezione 2D nei piani XZ, YZ, XY.

Creazione di un rilievo sintetico

Il costruttore del rilievo si apre con **File / Create survey**. La finestra Synthetic survey (figura) crea la geometria della rete di misura.



The image shows a software window titled "Synthetic survey" with a close button (X) in the top right corner. Inside the window, there are several input fields and checkboxes arranged vertically:

- Lines number:** A numeric input field with the value "10" and a small up/down arrow icon.
- Line's step, m:** A numeric input field with the value "10".
- Line's minimum, m:** A numeric input field with the value "0".
- Line's maximum, m:** A numeric input field with the value "300".
- Points number:** A numeric input field with the value "50" and a small up/down arrow icon.
- Gravity:** A checkbox that is checked (indicated by a small square with a checkmark).
- Magnetic:** A checkbox that is checked (indicated by a small square with a checkmark).
- Apply:** A button located at the bottom of the window.

3. Finestra «Synthetic survey»

Parametri: **Lines number** – numero di profili; **Line's step, m** – distanza tra i profili; **Line's minimum, m** e **Line's maximum, m** – distanza minima e massima lungo il profilo; **Points number** – punti per profilo; **Gravity** – modellare il campo gravimetrico; **Magnetic** – modellare il campo magnetico. Infine premere **Apply**.

Caricamento dei dati di campagna

Formato del file dati *.gm3

Per lavorare con **ZondGM3D** occorre un file dati con coordinate dei punti, topografia e risultati di misura.

I file di testo nel formato **ZondGM3D** hanno estensione «*.gm3» e possono essere file dati di testo (descritti sotto) o file di progetto (creati al salvataggio). Il file di progetto è binario, leggibile solo da **ZondGM3D**, e contiene tutte le informazioni: dati osservati e calcolati, modelli, informazione a priori, ecc.

Un file «*.gm3» di testo si crea con qualsiasi editor (ad es. Blocco note) cambiando l'estensione in *.gm3. Non deve contenere separatori insoliti (usare TAB o SPAZIO) né valori assurdi. È preferibile non superare 100 000 misure per file; per volumi maggiori decimare o grigliare i dati.

Il blocco dei dati gravimetrici (magnetici) inizia con **start_d_grav** (**start_d_mag**) ed è seguito da righe con: colonna 1 – numero di profilo; colonne 2 e 3 – coordinate (m); colonna 4 – campo gravimetrico (mGal) o magnetico (nT); colonna 5 – coordinata verticale con segno meno (m, valore negativo); colonna 6 – peso (facoltativo). Il blocco termina con **end_d_grav** (**end_d_mag**). Non è obbligatorio avere entrambi i tipi di dati.

```
start_d_mag
1      350869.00      7422345.00      -56.00  -941.00  1.00
1      350873.00      7422354.00      -69.68  -939.00  1.00
1      350877.00      7422363.00      -74.42  -938.00  1.00
<.....|.....>
138    358902.00      7423356.00      -60.81  -758.00  1.00
138    358906.00      7423365.00      -61.38  -758.00  1.00
138    358910.00      7423374.00      -61.13  -759.00  1.00
end_d_mag
start_d_grav
1      352695.85      7426168.80      0.90    -951.82    1.00
2      352685.45      7425961.95      0.80    -965.42    1.00
2      352930.02      7425981.16      0.80    -1030.04   1.00
<.....>
27     356667.44      7419736.73      -0.80    -972.00    1.00
27     356968.89      7419733.04      -0.90    -1034.73   1.00
27     357190.99      7419696.53      -0.90    -919.35    1.00
end_d_grav
start_setting
* 6.0 56000.0 7.0 * 5.0 * * 11.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 1.0 * * 0.1 2.0 * * * * *
end_setting
```

4. Esempio di file

Importazione da file di testo o tabella Excel

Selezionare **File / Import from text/excel**; compare la finestra **Import text data** (figura). I pulsanti **Start** e **End** fissano la prima e l'ultima riga dei dati, evidenziate nella tabella.

3D Import text data

OK Start End Read every 1

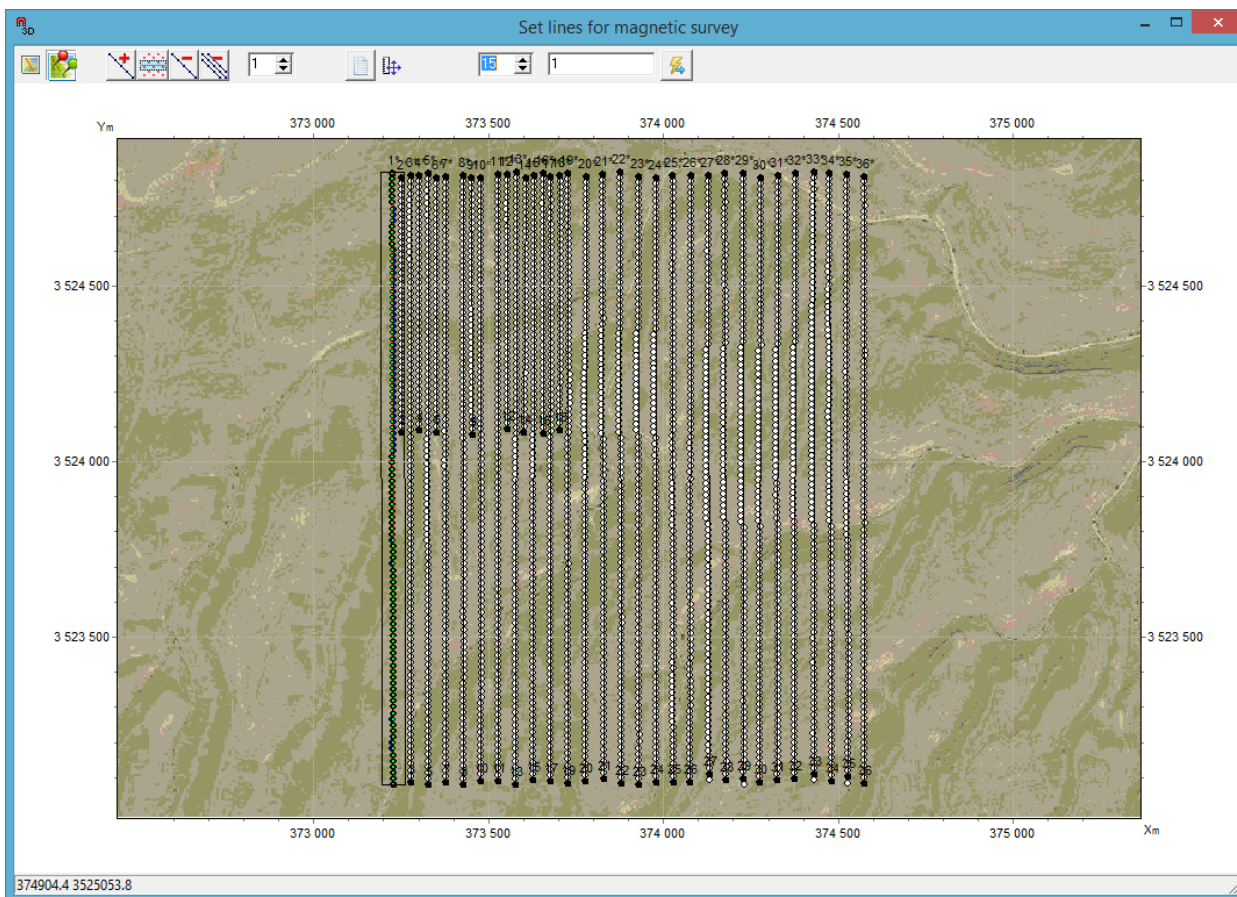
Type	line	None	X/Longitude	Y/Latitude	Z	Mag
Units	none	None	m	m	m	nTl
1	Line	ProfPos	X	Y	Z	T, nT
2	23	X/Longitude	1210	2140	550.37817382	122.7
3	23	Y/Latitude	1220	2140	550.34185791	53.16
4	23	Z	1230	2140	550.37542724	-8.39
5	23	Grav	2040	1240	550.40899658	-113.34
6	23	Mag	2050	1250	550.53479003	-140.19
7	23	line	2060	1260	550.66058349	-51.07
8	23		2070	1270	551.39825439	-32.52
9	23		2080	1280	552.13592529	41.04
10	23		2090	1290	552.94412231	-25.01
11	23		2100	1300	553.75231933	-343.45
12	23		2110	1310	554.56295776	-363.67
13	23		2120	1320	555.37359619	-503.95
14	23		2130	1330	556.30715942	-525.04
15	23		2140	1340	557.24072265	-507.89
16	23		2150	1350	558.42581176	-558.26
17	23		2160	1360	559.61090087	-248.83
18	23		2170	1370	561.18948364	-53.68
19	23		2180	1380	562.76806640	211.15
20	23		2190	1390	564.34030151	52.68
21	23		2200	1400	565.91253662	1662.97
22	23		2210	1410	566.95785522	881.68
23	23		2220	1420	568.00317382	638.24
24	23		2230	1430	568.88177490	377.05
25	23		2240	1440	569.76037597	444.22

5. Finestra «Import text data»

La prima riga di ogni colonna contiene il tipo di dato: ProfPos – distanza lungo il profilo, X/Longitude, Y/Latitude, Z – quota, Grav, Mag, line – numero di profilo, mheight e gheight – altezza del sensore magnetico e gravimetrico sul terreno. Scelte le colonne, premere **OK**.

Editor dei profili

Dopo il caricamento dei dati o la creazione di un rilievo sintetico compare la finestra «**Set lines for magnetic (gravity) survey**» (figura), che permette di aggiungere, eliminare e modificare linee di profilo, cambiare coordinate dei picchetti e caricare un'immagine o una carta topografica come sfondo. Si apre anche con **Options / Set survey lines**.

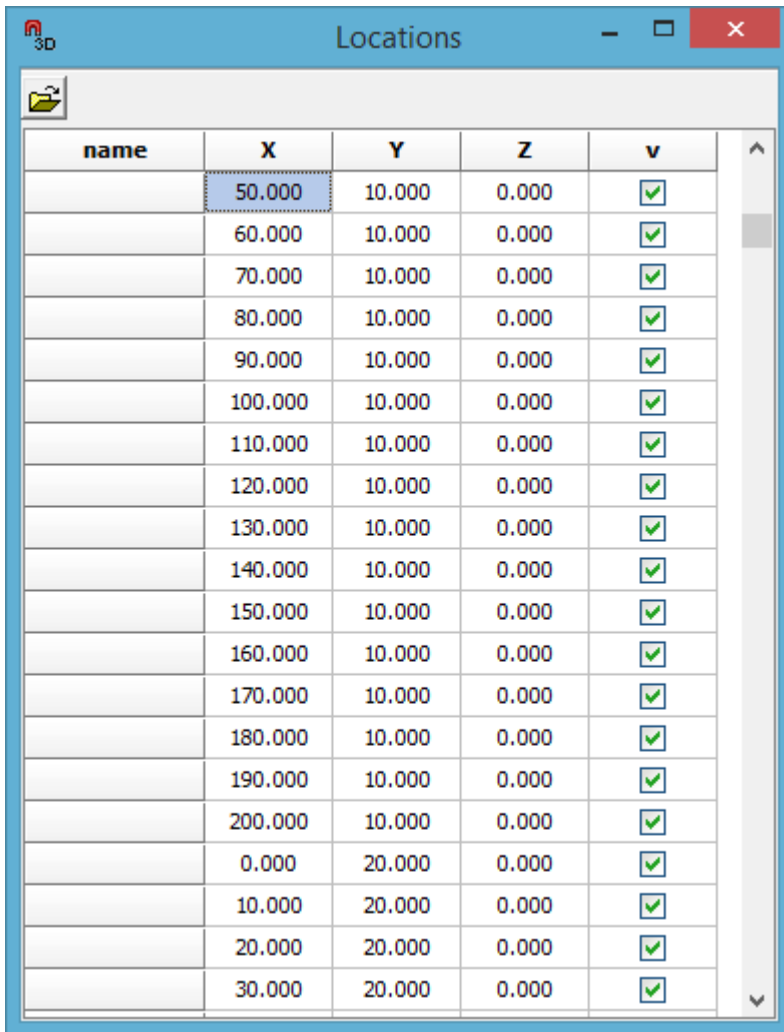


6. Finestra «Set lines for magnetic survey»

Barra degli strumenti:

-  — Caricare un raster o una carta a isolinee come sfondo.
-  — Caricare un'immagine satellitare (zona UTM e coordinate UTM).
-  — Aggiungere una linea: clic sinistro per i punti, clic destro per l'ultimo. Il menu del clic destro offre **Set line coordinates**, **Cursor to near point**, **Invert line**, **Create lines auto**.
-  — Includere i punti entro un rettangolo attorno alla linea.
-  — Eliminare il profilo corrente.  — Eliminare tutti i profili.
-  — Numero del profilo attivo. — Nome del profilo attivo.
-  — Tabella delle coordinate (finestra Locations).
-  — Scala isometrica o riempimento massimo.
-  — Dimensione dell'area di selezione automatica dei punti.
-  — Passare all'inversione.

Le coordinate si modificano nella finestra **Locations** (figura): si caricano da un file di testo (numero, due coordinate orizzontali e quella verticale) o si copiano da Excel.



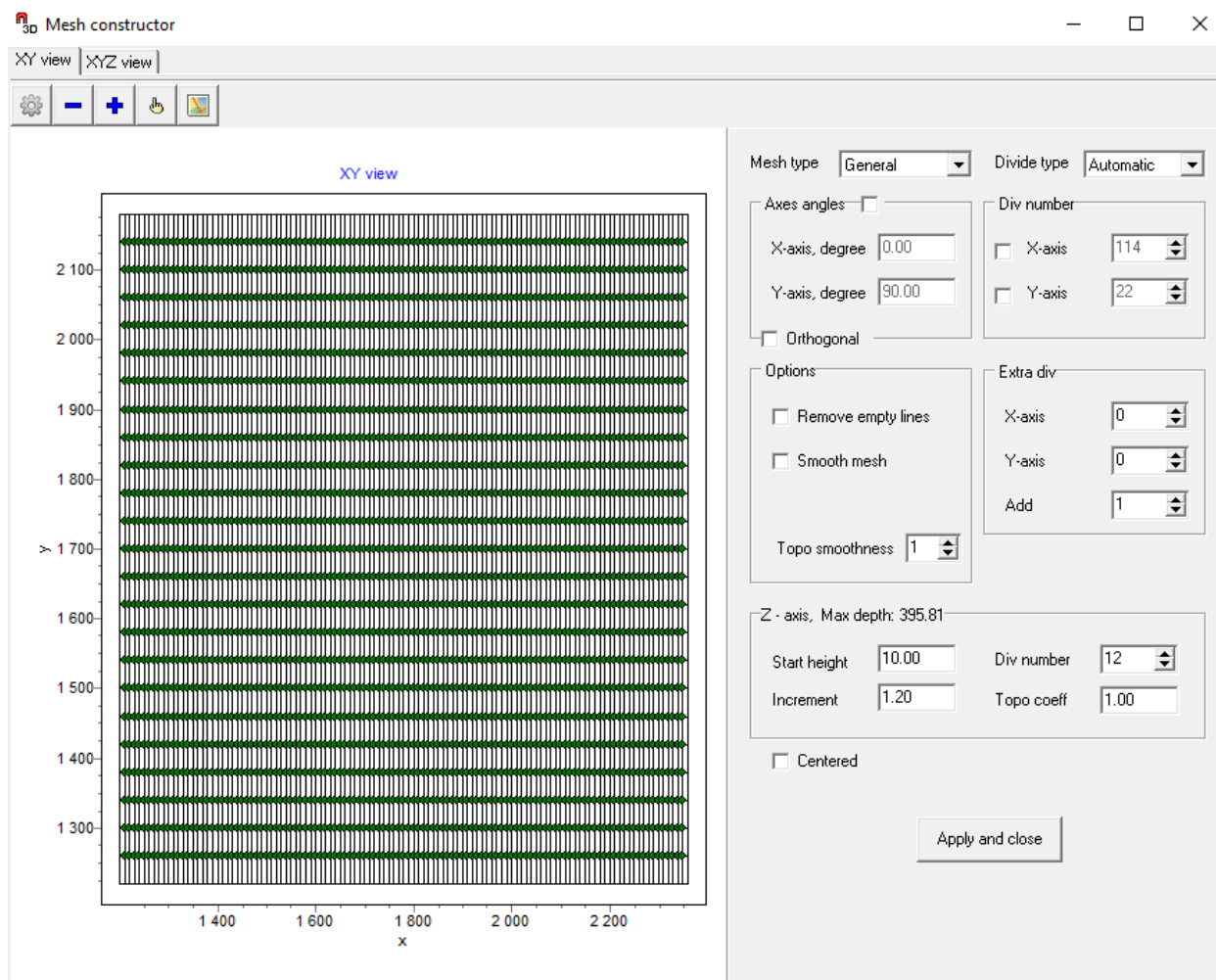
name	X	Y	Z	v
	50.000	10.000	0.000	☒
	60.000	10.000	0.000	☒
	70.000	10.000	0.000	☒
	80.000	10.000	0.000	☒
	90.000	10.000	0.000	☒
	100.000	10.000	0.000	☒
	110.000	10.000	0.000	☒
	120.000	10.000	0.000	☒
	130.000	10.000	0.000	☒
	140.000	10.000	0.000	☒
	150.000	10.000	0.000	☒
	160.000	10.000	0.000	☒
	170.000	10.000	0.000	☒
	180.000	10.000	0.000	☒
	190.000	10.000	0.000	☒
	200.000	10.000	0.000	☒
	0.000	20.000	0.000	☒
	10.000	20.000	0.000	☒
	20.000	20.000	0.000	☒
	30.000	20.000	0.000	☒

7. Finestra Locations

Per passare all'interpretazione premere .

Finestra Mesh constructor

Dopo la scelta dei profili compare **Mesh constructor**, disponibile anche in **Options / Mesh constructor**. Ha due schede: **XY view** (tutti i parametri della maglia) e **XYZ view**.



8. Finestra «Mesh constructor», scheda «XY view»

A sinistra la **pianta orizzontale**, a destra le **impostazioni della maglia**. Pulsanti:

-  — Ricostruire il modello.
-  — Eliminare una riga o colonna (clic sinistro sulla linea; il destro sceglie riga o colonna).
-  — Aggiungere una riga o colonna.
-  — Modificare i nodi con il mouse.
-  — Mostrare/nascondere la topografia (clic sinistro) o caricarla da file XYZ (clic destro).

Impostazioni della maglia

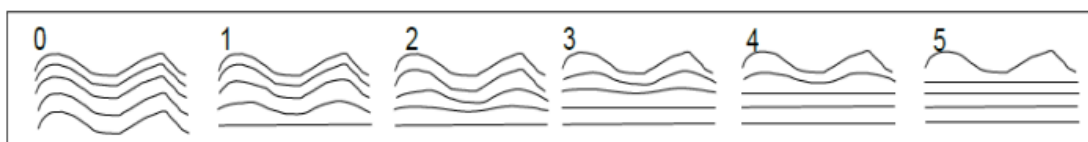
Mesh type: *Regular* – punti distribuiti in modo più o meno uniforme; *General* – rilievi irregolari; *One line* – un solo profilo.

Axes angles – angoli locali degli assi X e Y; con **Orthogonal** si mantiene l'ortogonalità. **Div number** – numero di divisioni in X e Y. **Divide type** – *Automatic* o *Manual*.

Con *Automatic*: **Options** con *Remove empty line* (eliminare righe/colonne senza punti adiacenti), *Smooth mesh* (lisciare le linee guida, utile per rilievi molto irregolari), *Topo smoothness* (lisciatura della topografia, 0-5); **Extra div** – celle intermedie in X e Y.

Con *Manual* si attiva **Axes Range** (divisione uniforme) con coordinate minime e massime in X e Y.

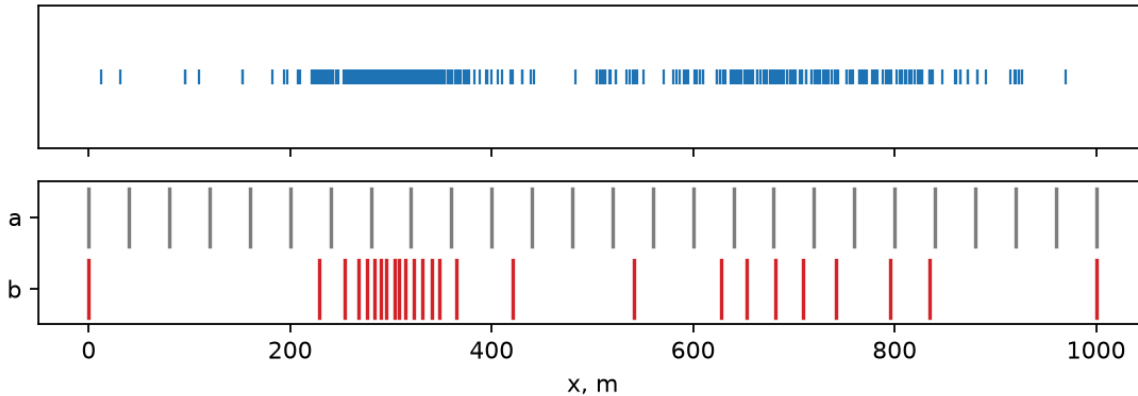
Z-axis, Max depth – divisione verticale: **Max depth** – profondità dello strato inferiore (non eccessiva, perché l'influenza dei parametri diminuisce con la profondità); **Start height** – spessore del primo strato, circa pari alla lunghezza della cella; **Increment** – rapporto tra spessori di strati adiacenti (1-2); **Div number** – numero di strati (di solito 12-20; valori grandi rallentano il calcolo); **Topo coeff** – appiattimento della topografia con la profondità (0-5): 0 – ogni strato ripete il precedente; 1 – la topografia si appiattisce e l'ultimo strato è piano; 5 – già il limite tra primo e secondo strato è piano (figura).



9. Appiattimento degli strati con la profondità per «Topo coeff» da 0 a 5

Con **Centered** i punti di misura cadono prevalentemente al centro delle celle, il che favorisce uno strato equivalente più affidabile.

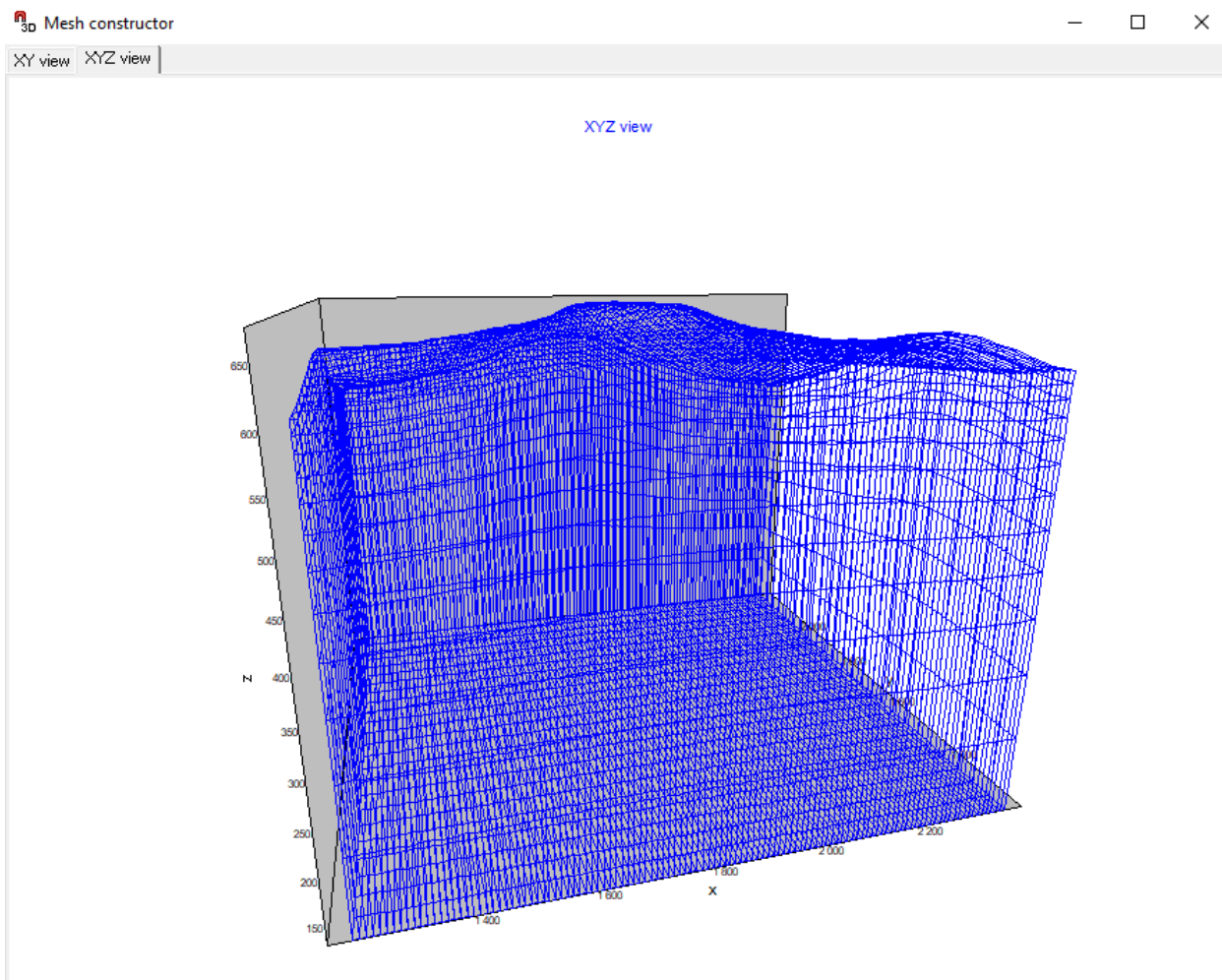
Scelta automatica della maglia. Per il tipo *Regular* il programma prova angoli degli assi e numeri di divisioni in X e Y e valuta ogni variante in base all'uniformità della distribuzione dei punti nelle celle; la migliore viene raffinata localmente. Le varianti sono valutate in parallelo su tutti i core. Per il tipo *General* i nodi lungo ogni asse sono posti in modo adattivo: celle più piccole dove il rilievo è denso e più grandi dove è rado, con celle adiacenti che non differiscono oltre un rapporto dato (variazione graduale del passo).



Posizionamento dei nodi lungo un asse: distribuzione dei punti (in alto), nodi uniformi (a) e nodi adattivi del tipo General (b)

L'interpolazione della topografia (kriging) e la triangolazione sono parallele; una maglia per decine di migliaia di punti si costruisce in pochi secondi.

La scheda **XYZ view** mostra la maglia in 3D (figura): rotazione con il tasto sinistro, zoom con la rotella, spostamento con il destro; clic destro su un asse con Shift apre le impostazioni dell'asse.



10. Finestra «Mesh constructor», scheda XYZ view

Per terminare premere **Apply and close** ; la barra di stato mostra il numero di punti e di celle del modello 3D.

Campo normale e parametri di misura

Per un nuovo progetto vanno impostati i parametri del campo normale in **Options / Observation settings**, con le aree **Magnetic survey** e **Gravity survey**.

Observation settings

Magnetic survey ☒

Incident field, nT ☐ 56000.0

Inclination, deg 7

Declination, deg 6

Azimuth Y, deg 0.0

☐ Magnetometer elev, m 2.00

Data type T

Gradient base, m 0.0

Gravity survey ☒

☐ Gravimeter elev, m 0.1

Data type Gz

Gradient base, m 0.0

DC shift, mG 0.0

Apply Cancel

11. Finestra Observation settings

Area Magnetic survey: **Incident field** - modulo del campo normale, nT (se attivo, viene aggiunto ai valori calcolati); **Inclination** - inclinazione, gradi (angolo tra il vettore di induzione e il piano orizzontale); **Declination** - declinazione, gradi (angolo tra la proiezione orizzontale e il nord geografico, in senso orario); **Azimuth Y** - azimut dell'asse Y dal nord, in senso orario; **Magnetometer elev** - quota del sensore rispetto al terreno (opzione disattivata) o assoluta (attivata); **Data type** - **T** campo totale, **GrZ** gradiente, **Tx**, **Ty**, **Tz** componenti; **Gradient base, m** - distanza tra i sensori del gradiometro.

Il pulsante  a destra di *Magnetic survey* scarica da Internet i parametri del campo per latitudine, longitudine e anno dati (gradi con virgola decimale, figura).

Mag data ✕

Latitude 60.45

Longitude 30.12

Year 2015

Get

12. Finestra Mag data

Area Gravity survey: **Gravimeter elev, m** - quota delle osservazioni rispetto al terreno o assoluta; **Data type** - **Gz** componente verticale della gravità, **Grz** suo gradiente; **Gradient**

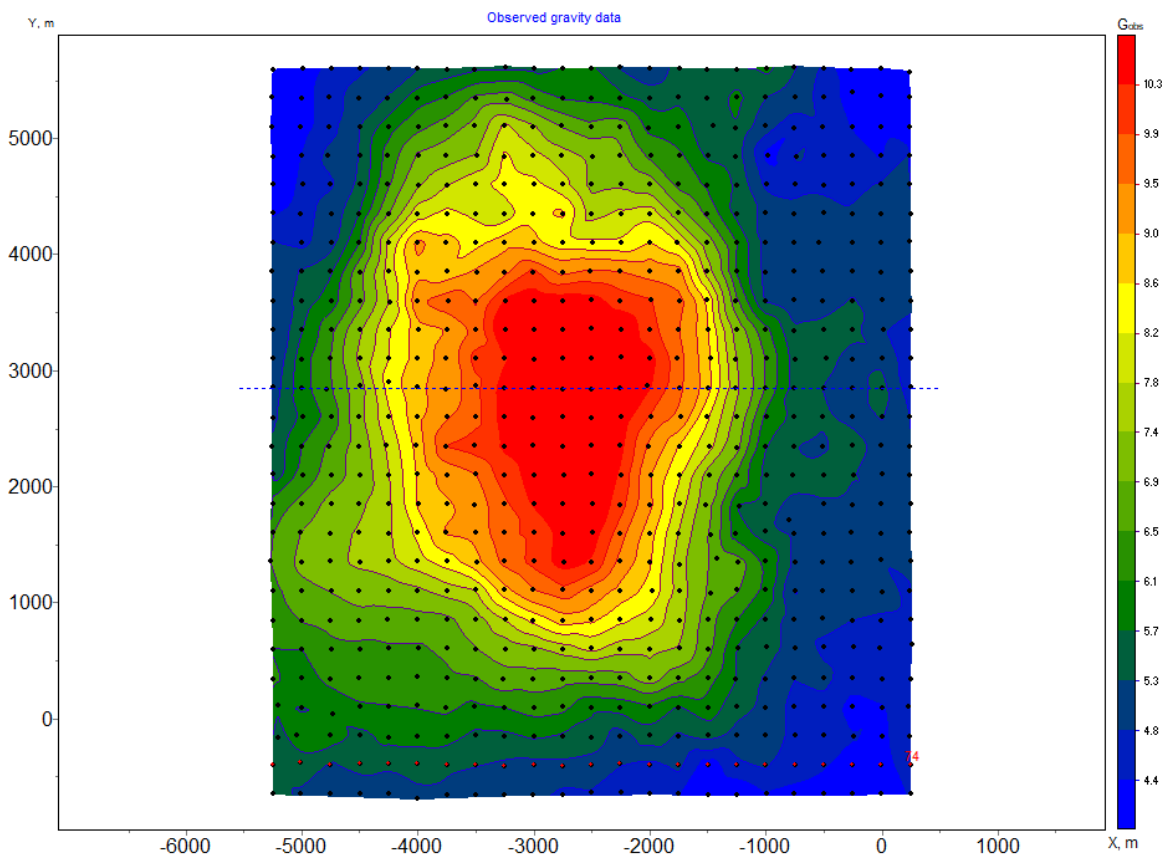
base, m; DC shift, mG – costante aggiunta ai dati gravimetrici calcolati, determinabile automaticamente (clic destro) per una densità media data se in program setup sono corrette le densità minima e massima.

Visualizzazione dei dati

I dati areali si visualizzano come mappa a isolinee (**Options / Data / Contour map**), mappa dei grafici (**Options / Data / Graphics map**) o punti in pianta (**Options / Data / Points map**).

Mappa a isolinee

La mappa del parametro scelto è mostrata sopra il modello 3D e può contenere dati osservati (**Observed data**), calcolati (**Calculated data**) o il residuo (**Data misfit**).

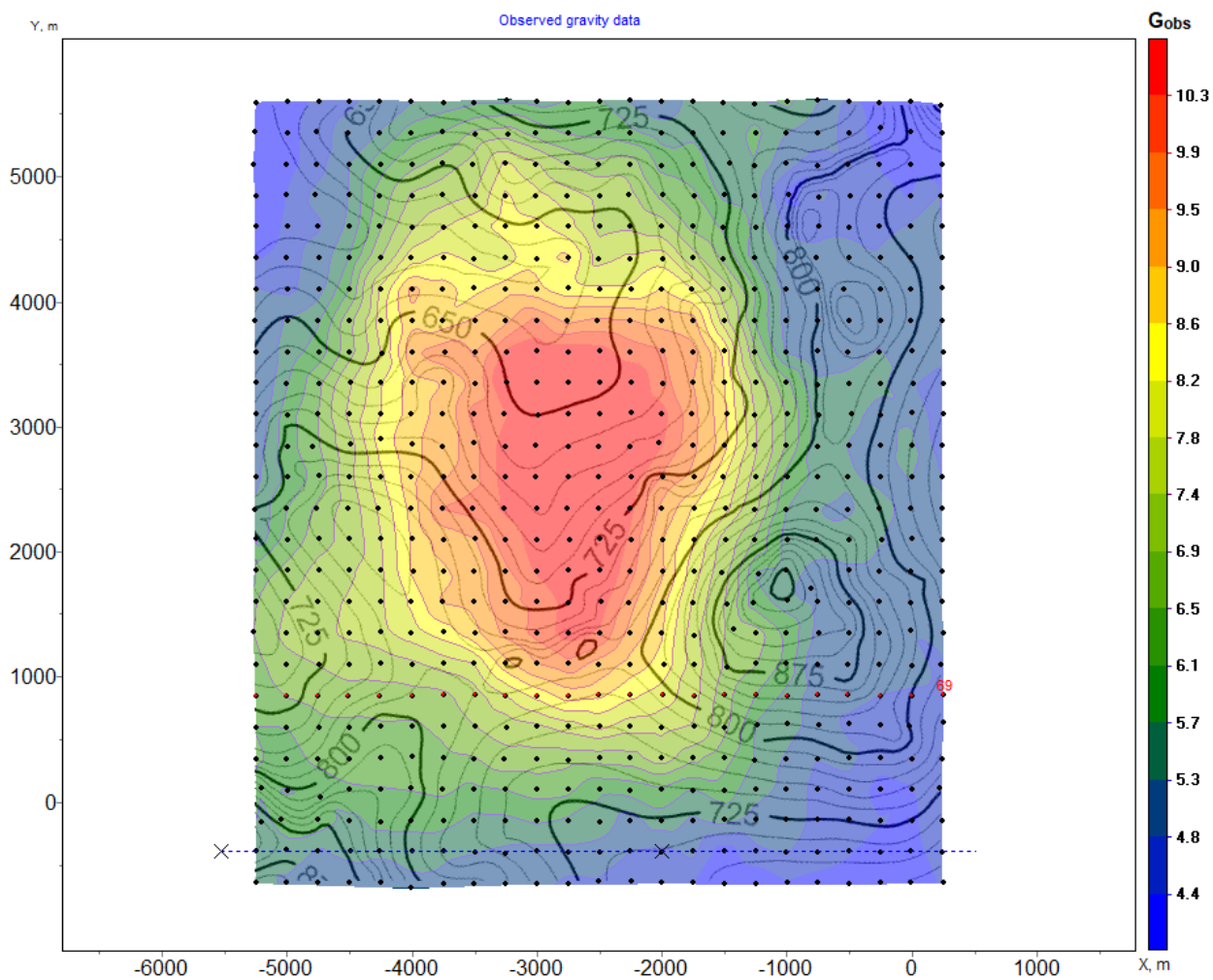


13. Esempio di mappa a isolinee

I punti rossi indicano il profilo la cui curva è mostrata nell'area dei profili, i numeri sono i numeri di profilo, la linea blu la posizione della sezione 3D, le croci nere i sondaggi.

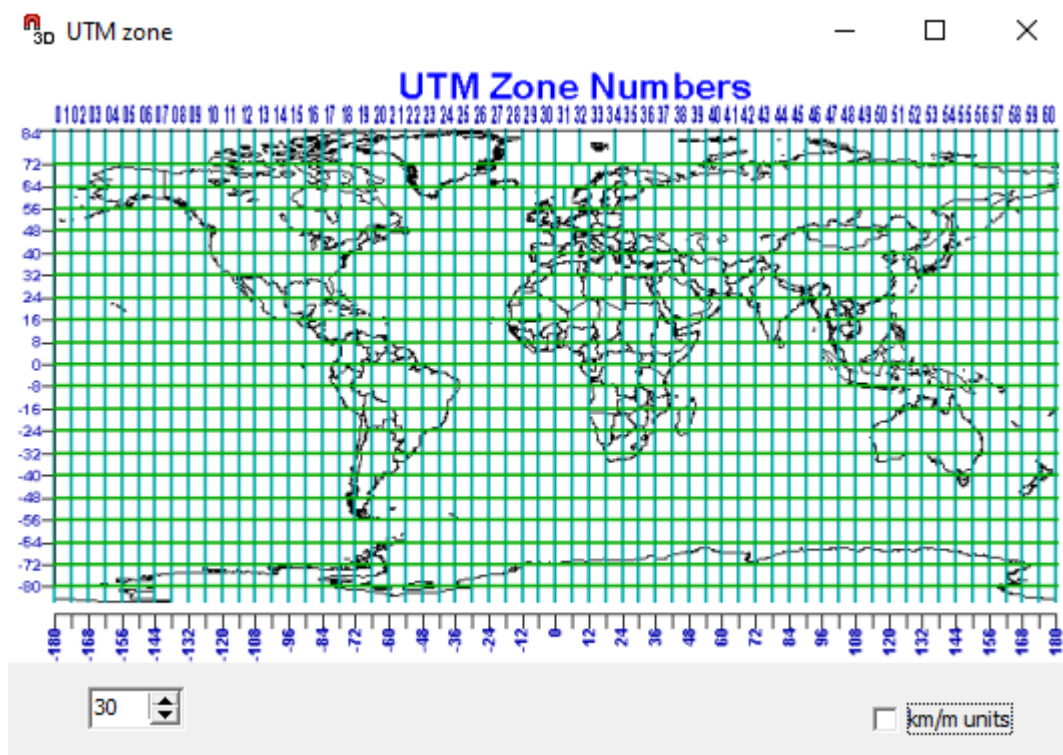
Menu contestuale: **Log data scale** (scala logaritmica), **Smooth mode** (tavolozza continua), **Display grid point** (punti di misura), **Display ColorBar** (scala colori), **Setup** (impostazioni), **Print preview**, **Save picture** (*.bmp, *.png), **Save XYZ file** (*.dat), **X:Y=1:1**, **Load background** (immagine di sfondo), **Load bingmap** (mappa satellitare), **Remove background**, **Draw in Surfer**, **Copy BG from model** (con sezione XY scelta, usare la sua immagine come sfondo).

Load background carica qualsiasi raster come sfondo semitrasparente, utile per confrontare i dati con carte topografiche, schemi strutturali e tettonici, carte geologiche e dati di altri metodi (figura).



14. Confronto della mappa a isolinee con una carta topografica

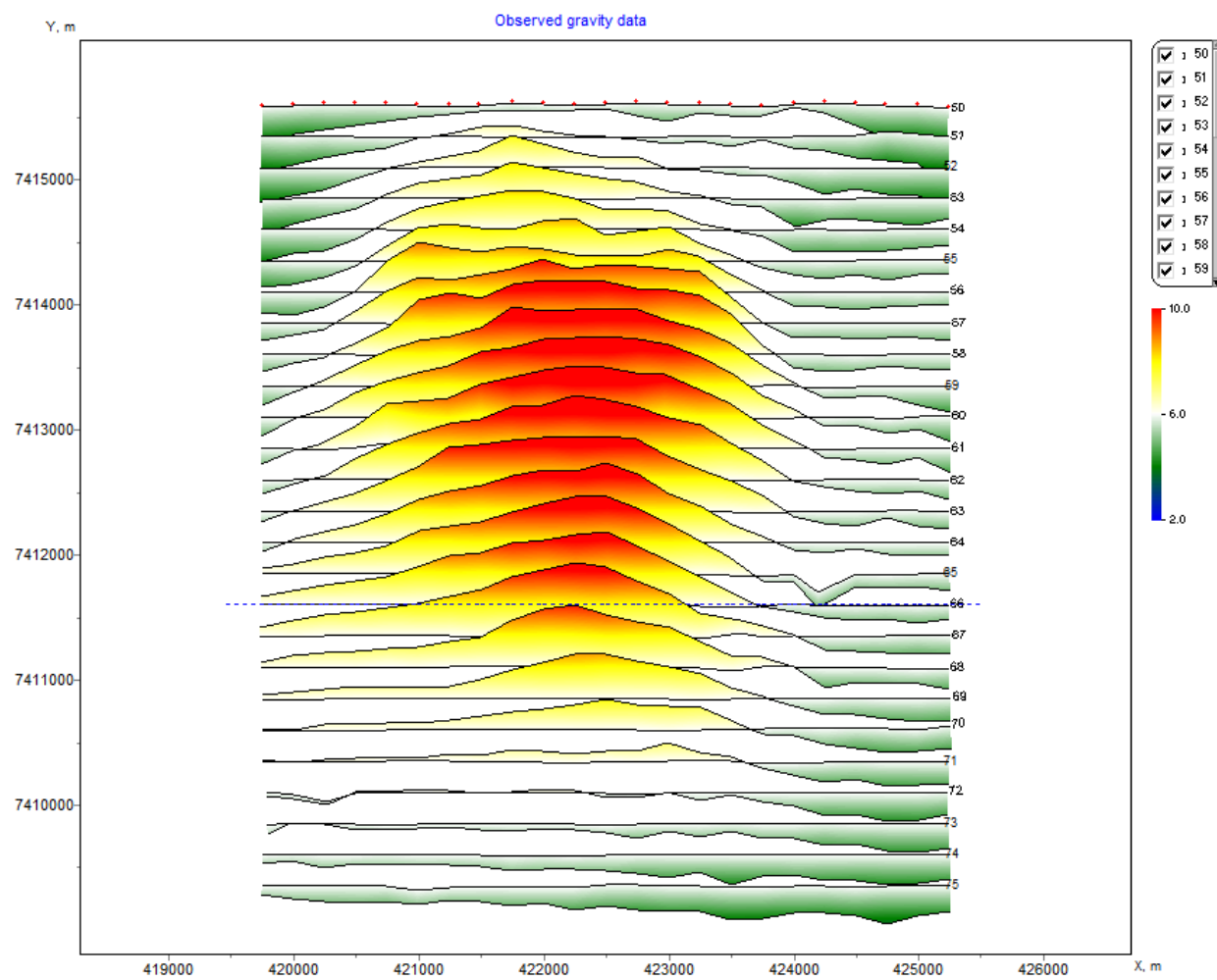
Load bingmap carica una mappa satellitare secondo le coordinate UTM; nella finestra UTM zone si sceglie il numero di zona.



15. Finestra UTM zone

Mappa dei grafici

Mostra le curve dei valori teorici o sperimentali lungo i profili: osservati, calcolati o, in modalità residuo, osservati riempiti e calcolati in rosso. La rotella cambia la scala; la legenda a destra attiva o disattiva i profili.

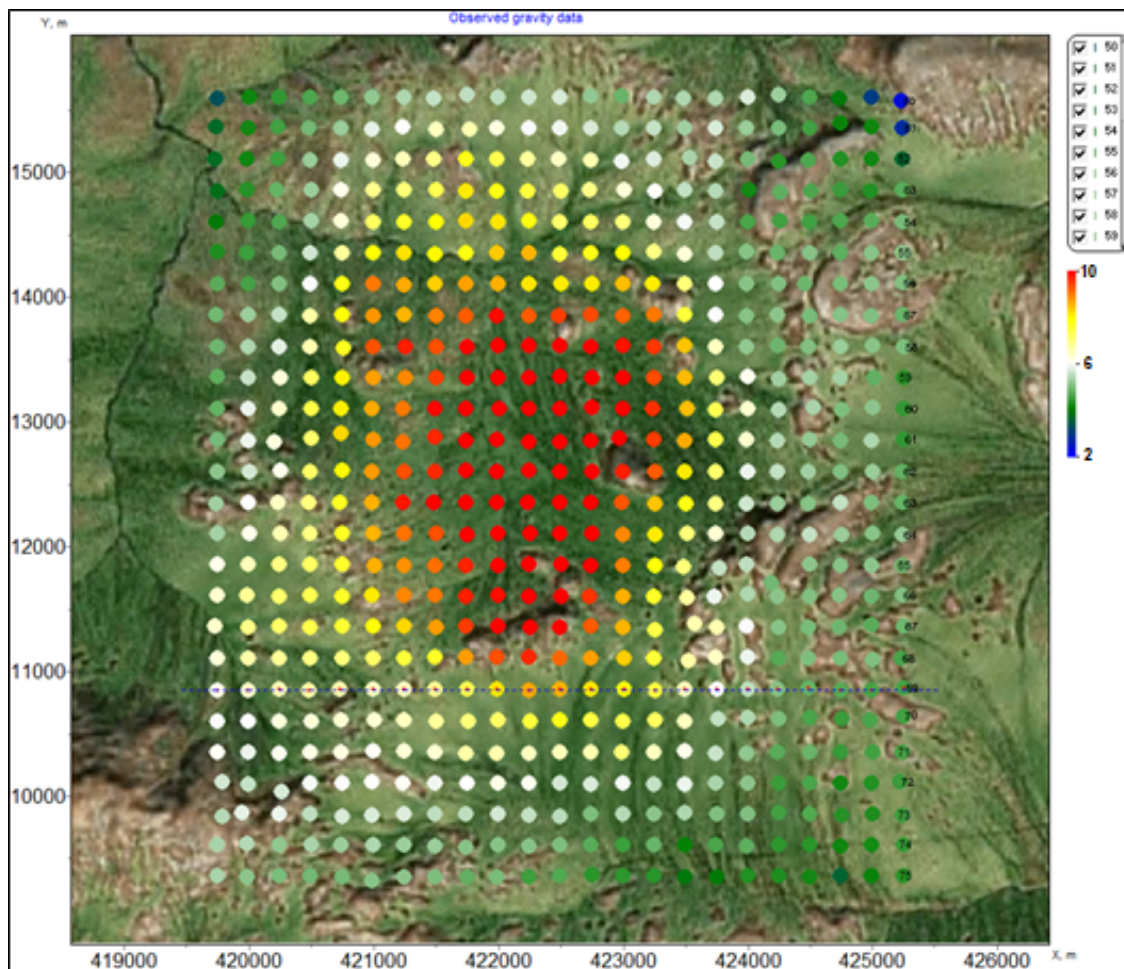


16. Esempio di mappa dei grafici

Menu contestuale: **Setup**, **Print preview**, **Save picture**, **X:Y=1:1**, **Load background**, **Load bingmap**, **Remove background**. Per la scala colori fare clic destro su di essa.

Mappa a punti

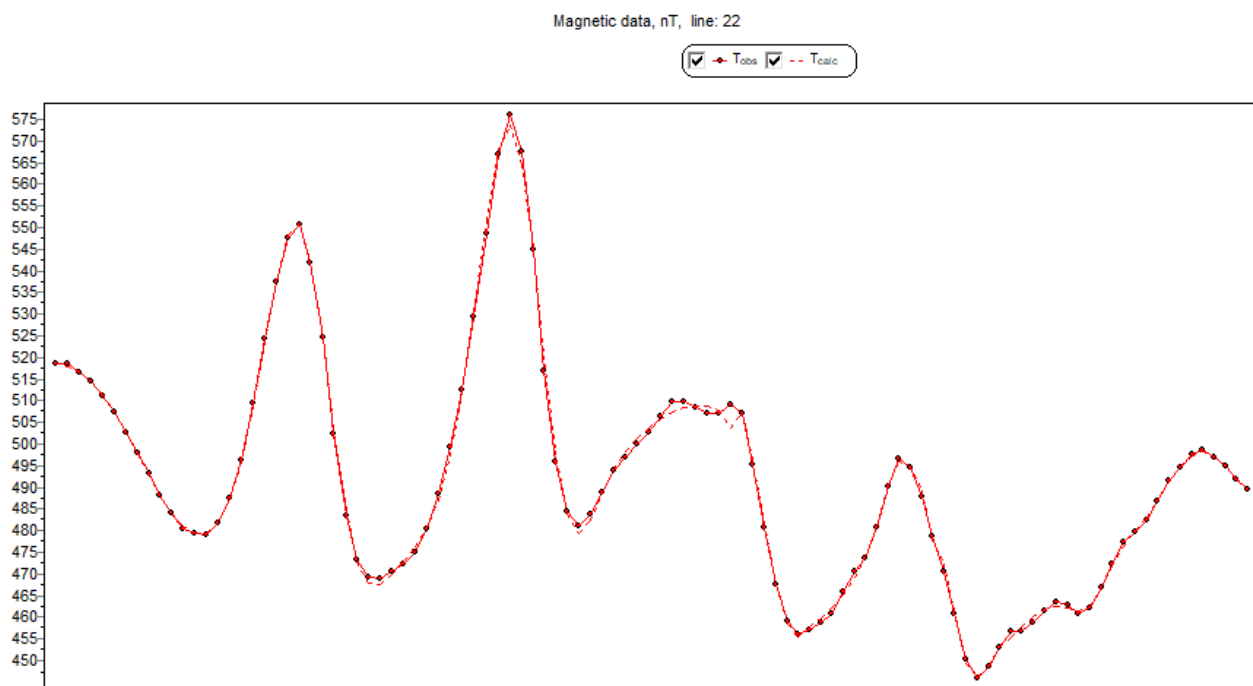
Comoda con uno sfondo; mostra valori osservati o calcolati. La rotella cambia la dimensione dei punti; la legenda attiva o disattiva i profili.



17. Dati rappresentati come punti

Curve di profilo

La curva del profilo scelto è nella sezione in alto a destra (figura). I valori misurati si modificano trascinando un punto con il tasto destro. L'editor del grafico si apre con clic destro e SHIFT sul grafico, quello degli assi con clic destro e SHIFT sull'asse. La rotella passa al profilo successivo (precedente).

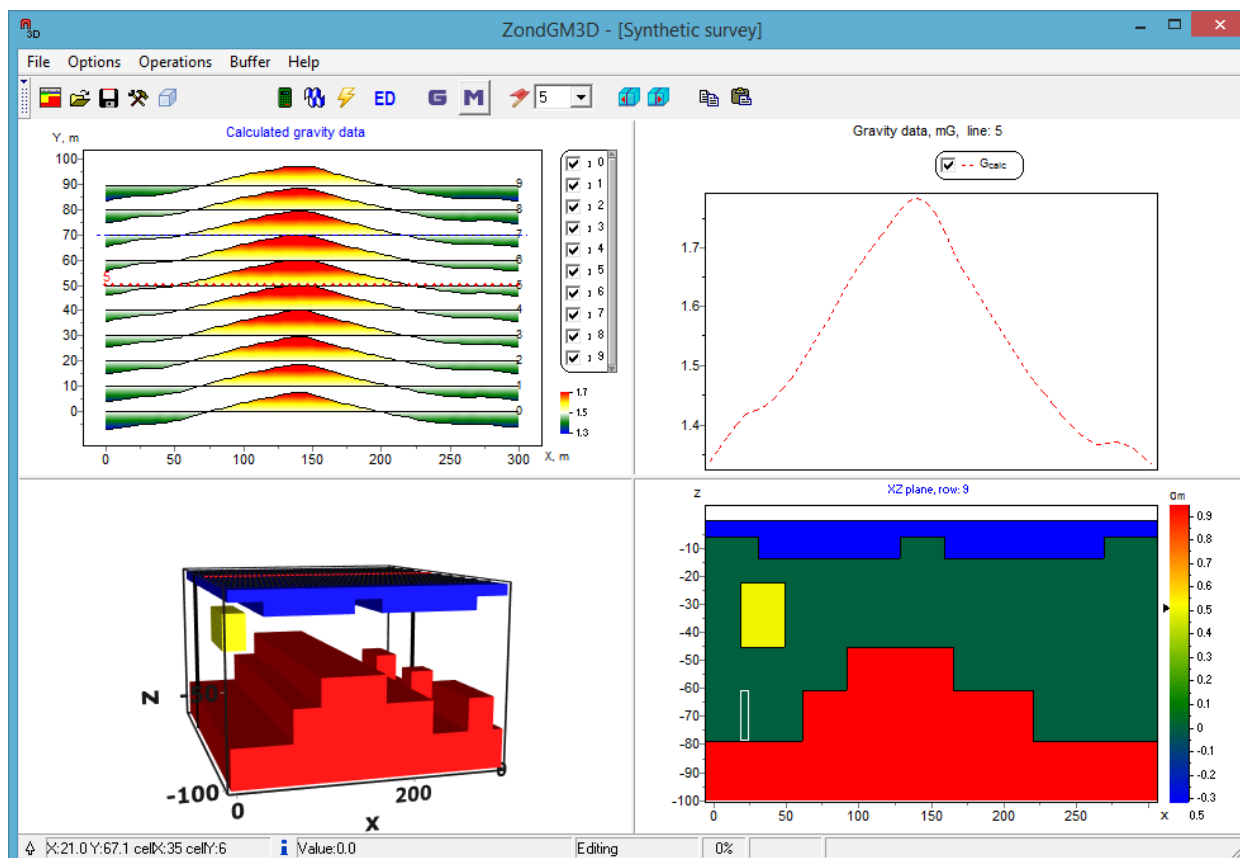


18. Curve calcolata (tratteggiata) e osservata (continua)

Modellazione

La modellazione precede il lavoro di campagna: con l'informazione a priori sull'obiettivo, le sue proprietà e il mezzo incassante si costruisce un modello teorico coerente con la geologia attesa, che mostra carattere e ampiezza dell'anomalia e aiuta a ottimizzare il rilievo.

ZondGM3D modella dati magnetici e gravimetrici in 3D con topografia. Servono la geometria del rilievo, i parametri del campo normale e il modello; si possono usare anche modelli **Zond** e sezioni geologiche raster.



19. Finestra principale in modalità di modellazione

Modifica del modello

Il modello si modifica nell'**editor del modello** (sezione in basso a destra, modalità **Options / Model / Block-section**). La scala colori a destra collega colori e valori; il valore corrente si sceglie con un clic sinistro sulla scala.

Options / Model / Plane sceglie l'orientamento (XZ, YZ, XY); tasti «Alt+1», «Alt+2», «Alt+3».

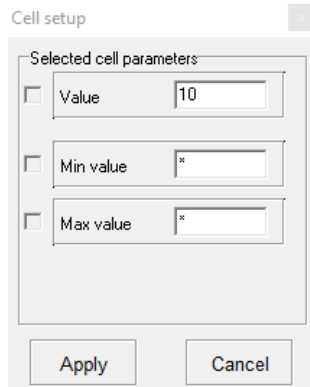
Il lavoro con le celle è simile alla modifica di un'immagine raster: la barra di stato mostra coordinate e parametri della cella attiva (circondata dal cursore rettangolare); le celle selezionate sono segnate da punti bianchi.

Menu del clic destro: **Display cell setup**; **Cell to cursor value** (usare il valore della cella attiva); **Edit mode**; **Selection \ Free form selection, Rectangular selection, Elliptical**

selection; Selection \ Magic wand (cella attiva e adiacenti di valore simile, con tolleranza nelle impostazioni del modello); **Selection \ Remove selection; Clear model**.

Il clic sinistro su una cella o selezione assegna il valore corrente. Zoom e spostamento in modalità **Zoom&Scroll**. Con CTRL la selezione si sposta: con il tasto sinistro si copia, con il destro si taglia.

I valori si possono impostare anche in **Display Cell setup**:



20. Finestra «Display Cell setup»

Value – valore; **Min value**, **Max value** – intervallo nell’inversione; le caselle applicano il nuovo valore a tutte le celle selezionate.

Menu contestuali dell’editor: **Display model mesh** (maglia), **Display objects border**, **Display color bar**, **Setup**, **Zoom&Scroll**, **Print preview**, **X:Y=1:1**; sulla scala colori: **Set range**, **Automatic**, **Log scale**, **Smooth image**, **Set cursor value**.

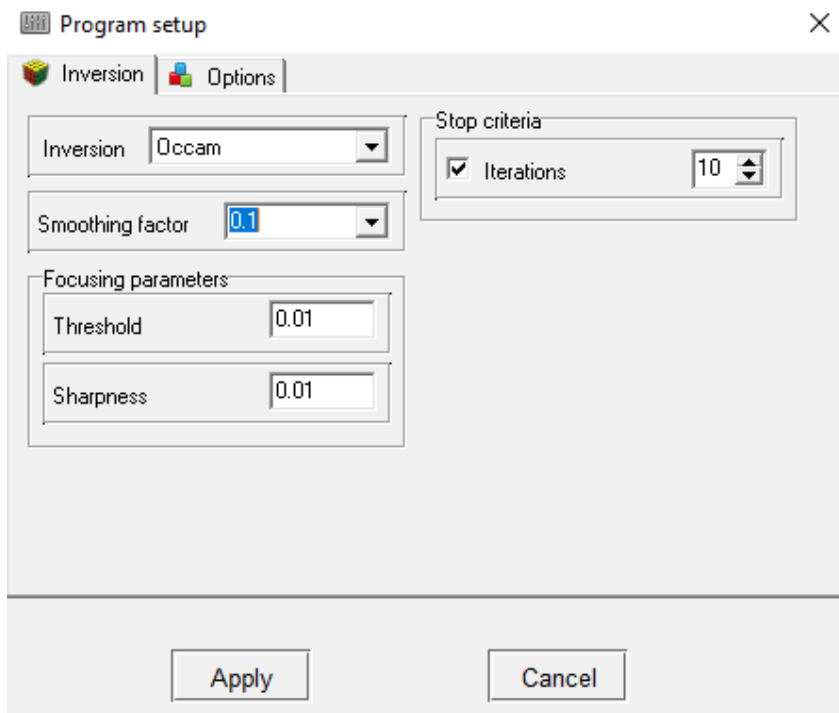
Salvataggio e uso dei dati di modello

Per usare i valori calcolati come dati di campagna, salvare in modalità **Calculated data** (file di testo) e aprirlo come dati osservati, oppure usare **Project with calculated** cancellando il modello prima dell’inversione. Si può quindi invertire e confrontare il modello ricostruito con l’originale, verificando progetti di rilievo e ipotesi. # Interpretazione dei dati di campagna

Impostazioni dell’inversione

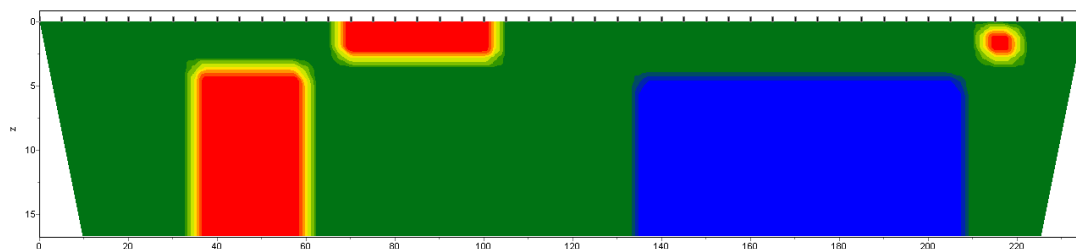
Il programma inverte dati magnetici e gravimetrici separatamente o congiuntamente (**Options / Inversion / Cross-gradient**). Dopo aver caricato i dati e impostato il modello iniziale, scegliere il tipo di inversione con il pulsante  o **Option / Program setup**.

La scheda **Inversion** contiene i parametri dell’inversione:



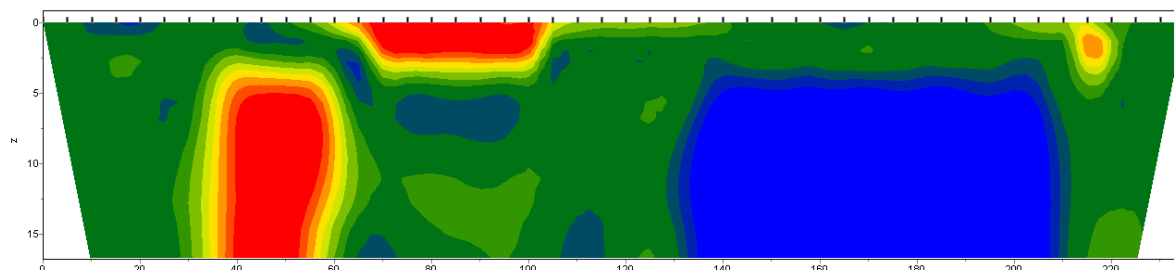
21. Finestra «Program setup», scheda «Inversion»

L'opzione **Inversion** sceglie l'algoritmo. Gli algoritmi sono illustrati su una sezione 2D di un modello a blocchi (figura), con risposta teorica e rumore gaussiano del 5%.



22. Modello di prova

Smoothness constrained – minimi quadrati con operatore di lisciatura; distribuzione regolare e stabile (figura).

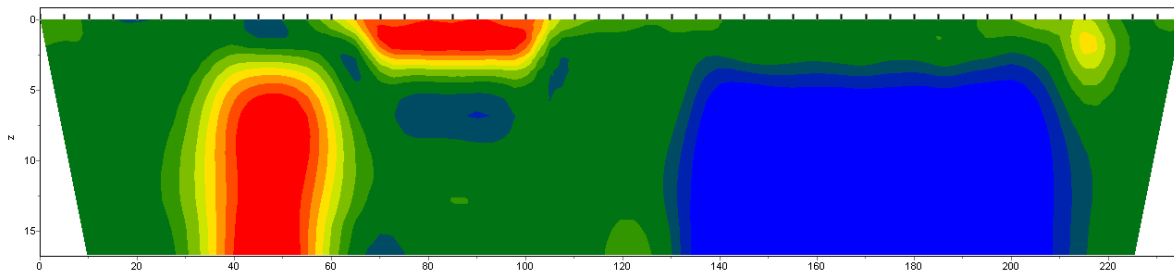


23. Modello ricostruito con Smoothness constrained

$$(A^T W^T W A + \mu C^T C) \Delta m = A^T W^T \Delta f$$

Il contrasto non viene minimizzato; l'algoritmo raggiunge il residuo minimo ed è consigliato nelle prime fasi.

Occam - minimi quadrati con lisciatura e minimizzazione aggiuntiva del contrasto [Constable, 1987]; la distribuzione più regolare (figura).

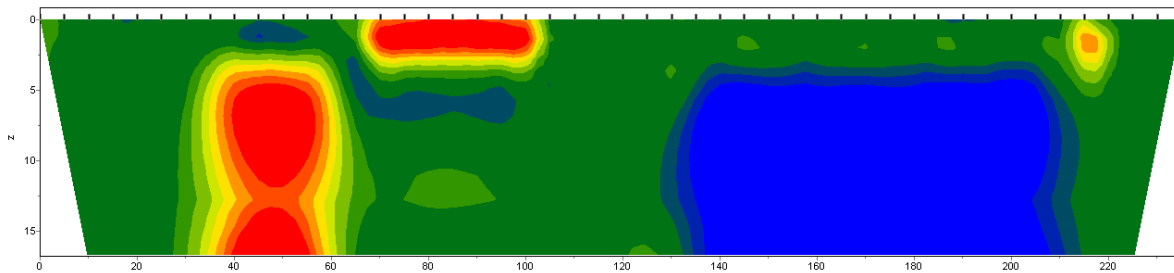


24. Modello ricostruito con *Occam*

$$(A^T W^T W A + \mu C^T C) \Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T C m$$

La regolarità è proporzionale a **Smoothness factor**; valori troppo grandi aumentano il residuo.

Marquardt - minimi quadrati classici con smorzamento (**Ridge regression**) [Marquardt, 1963]; con pochi parametri dà un modello contrastato (figura).

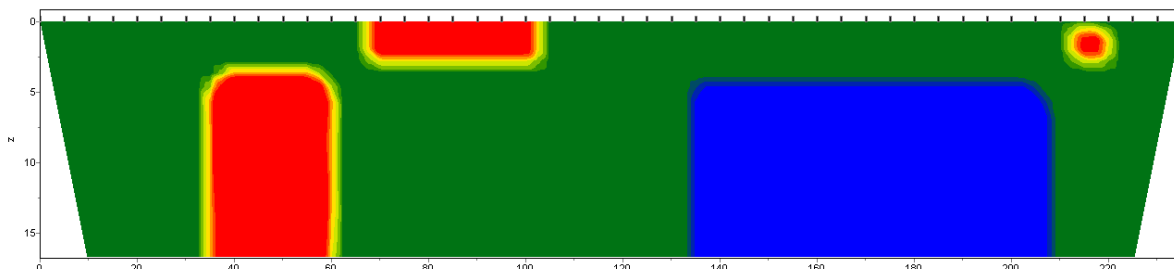


25. Modello ricostruito con *Marquardt*

$$(A^T W^T W A + \mu I) \Delta m = A^T W^T \Delta f$$

Un uso incauto può dare risultati instabili o divergenza; conviene usarlo come raffinamento dopo **Smoothness constrained** o **Occam**.

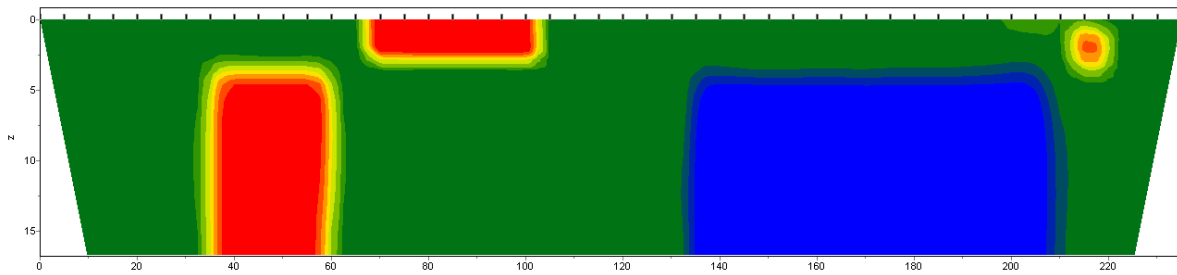
Blocks - adattamento dei parametri di aree con valori diversi, trattate come blocchi (figura). Applicare prima **Rasterization** (3D settings menu / Model / Smooth/raster). L'equazione è la stessa di **Marquardt**.



26. Modello ricostruito con *Blocks*

Si usa per raffinare risultati precedenti (meglio **Focused**). I blocchi si possono definire a mano nell'editor; sono evidenziati mentre la finestra è aperta.

Focused – minimi quadrati con lisciatura e focalizzazione del contrasto [Portniaguine, 2000]; distribuzione regolare a tratti, cioè blocchi di valore costante (figura).



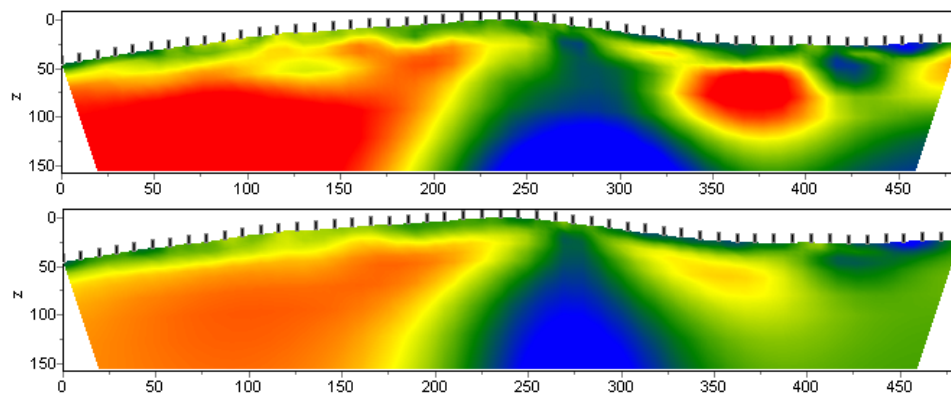
27. Modello ricostruito con *Focused*

$$(A^T W^T W A + \mu C^T R C) \Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T R C m$$

Richiede una scelta accurata della soglia **Threshold**: oltre essa i parametri di celle adiacenti non vengono mediati. Il peso R_i dipende dalla soglia e e dal contrasto r_i :

$$R_i = \frac{e^2}{e^2 + r_i^2}$$

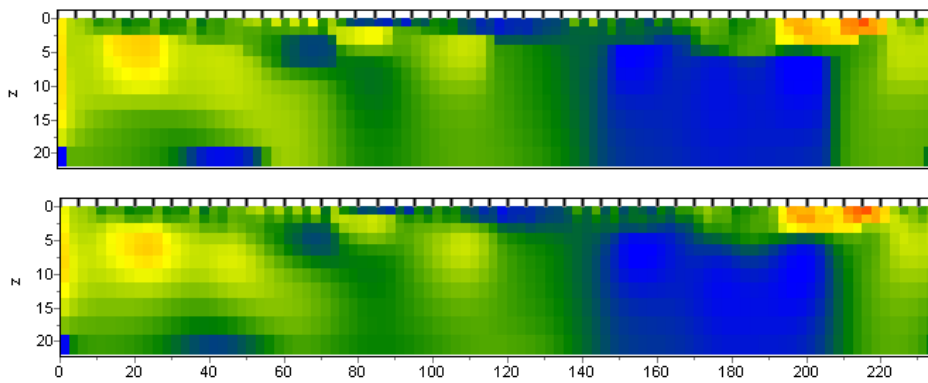
Smoothing factor – equilibrio tra residuo dei dati e del modello: 0,5 - 2 per dati rumorosi o risultati più regolari, 0,005 - 0,01 per dati di alta qualità; valori grandi danno residui maggiori (figura). Usato in **Occam** e **Focused**.



28. Modelli *Occam* con smoothing factor 0,01 (A, in alto) e 1,0 (B, in basso)

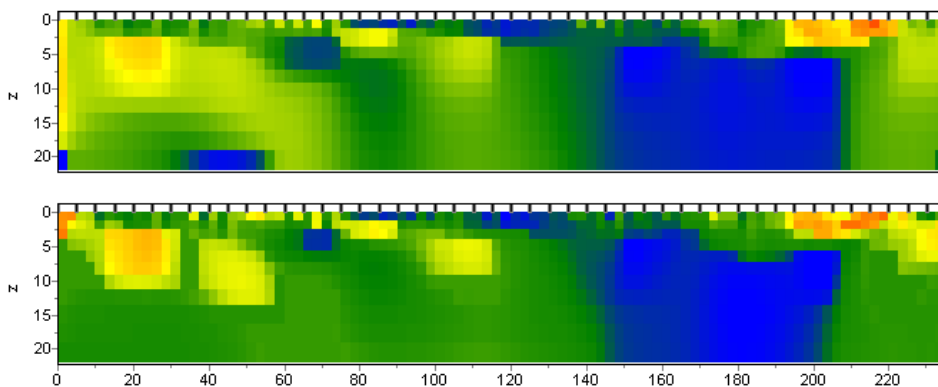
Stop criteria: Iterations – arresto al numero di iterazioni indicato.

Focusing parameters: Threshold – soglia di contrasto (0,001-1, scelta empiricamente; valori troppo piccoli possono causare divergenza, troppo grandi danno una distribuzione regolare) (figura).



29. Modelli *Focused* con Threshold 0,01 (A, in alto) e 0,1 (B, in basso)

Sharpness – equilibrio tra minimizzazione del volume dei corpi anomali (0) e distribuzione regolare a tratti (1) (figura).



30. Modelli *Focused* con Sharpness 0,8 (A) e 0,2 (B)

La scheda **Options** contiene parametri aggiuntivi:

Program setup

Inversion Options

Cell grouping ☐

Layer	X	Y	Z
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	1	4
5	1	1	5
6	1	1	6

Model

Min susceptibility -50.0

Max susceptibility 50.0

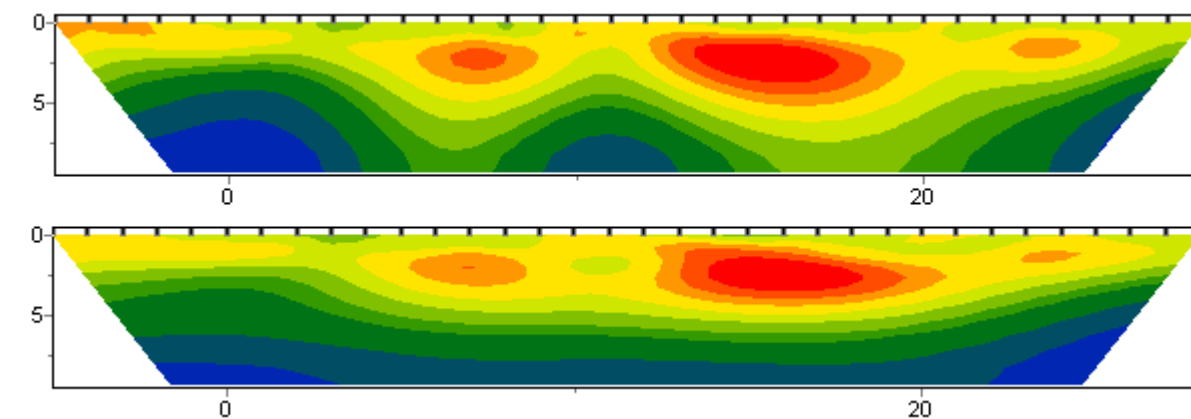
Smoothness ratio ☐ 1.0

Apply Cancel

31. Finestra «Program setup», scheda «Options»

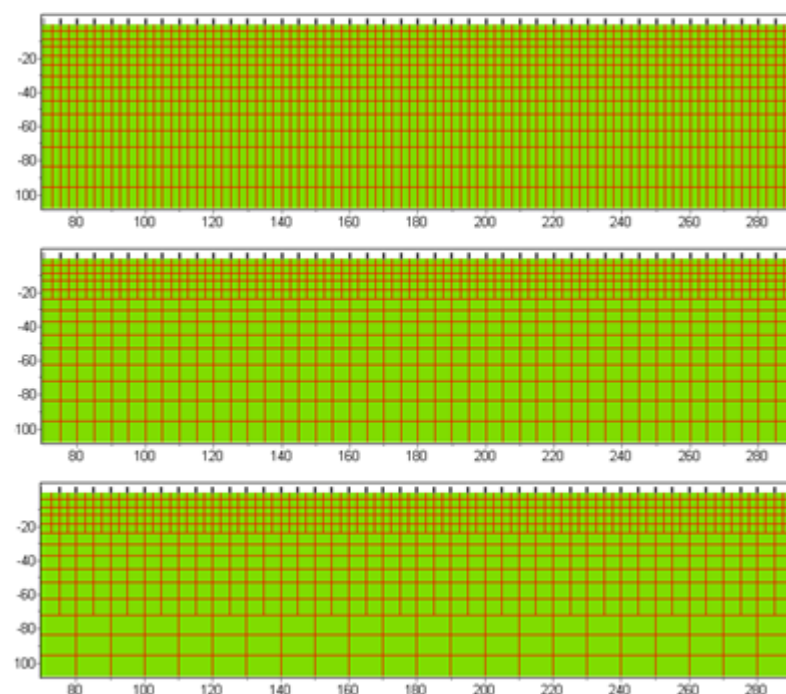
Min susceptibility (density), Max susceptibility (density) - limiti dei parametri nell'inversione; se noti con precisione, attivare **lim based inv.**

Smoothness ratio - rapporto tra lisciatura orizzontale e verticale: <1 per strutture orizzontali, >1 per verticali; di solito 0,2-1 (figura).



32. Modelli con Smoothness ratio 1 (A, in alto) e 0,3 (B, in basso)

Cell grouping - per modelli grandi: una tabella unisce celle adiacenti riducendo i parametri di inversione, mantenendo le celle del problema diretto. Colonne: **Layer** - numero dello strato; **X, Y, Z** - numero di celle per cella di inversione. Doppio clic destro nelle colonne X e Y unisce le celle orizzontalmente per lo strato e quelli sottostanti. Esempi: maglia di inversione uguale a quella del modello (A); dallo strato 6 celle unite a due a due (B); dallo strato 6 a due a due e dal 12 a quattro a quattro (C).



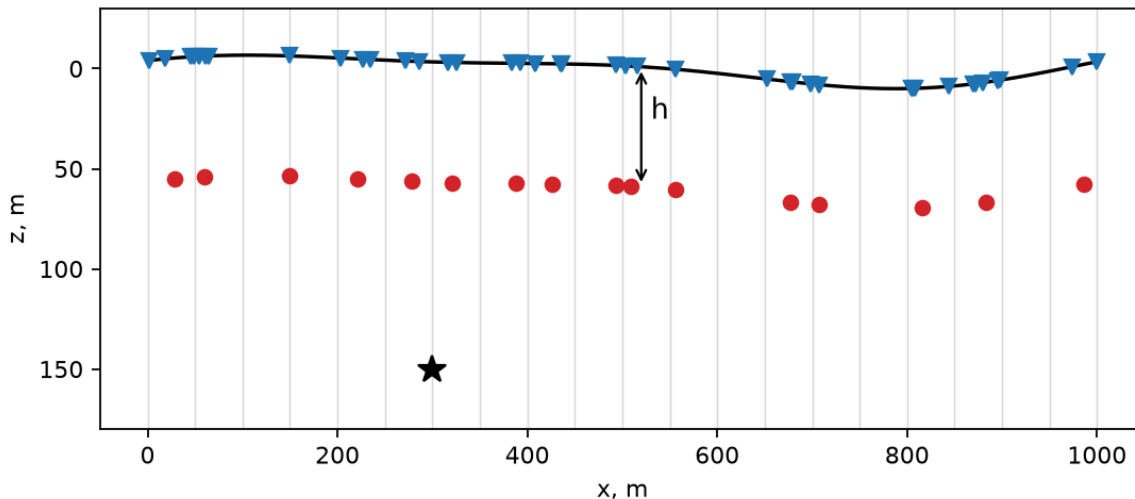
33. Esempi di maglie di inversione (A, B, C dall'alto)

Trasformazioni del campo (menu Operations)

Il menu **Operations** lavora sui dati della modalità corrente (magnetica o gravimetrica) su tutti i profili. I dati originali sono conservati e si ripristinano con **Return to original data**.

Strato equivalente

Lo strato equivalente è un insieme di sorgenti puntiformi (dipoli magnetici o masse puntiformi) a profondità h sotto la topografia, il cui campo nei punti di misura coincide con quello osservato. Il rilievo può essere irregolare; la topografia è considerata: la quota di ogni stazione è presa dai dati e le sorgenti seguono la topografia abbassate di h .



Schema dello strato equivalente: stazioni sulla topografia (triangoli), sorgenti alla profondità h (cerchi, una per blocco), sorgente reale (stella)

Sorgenti. L'area è divisa in blocchi quadrati; ogni blocco non vuoto riceve una sorgente nella posizione media delle sue stazioni. La dimensione iniziale del blocco è la mediana della distanza dalla stazione più vicina (per rilievi a profili è il passo lungo il profilo, non la spaziatura media sull'area); se i blocchi sono più di 4000, la dimensione viene aumentata. Le stazioni coincidenti (entro 1 mm) contano una volta.

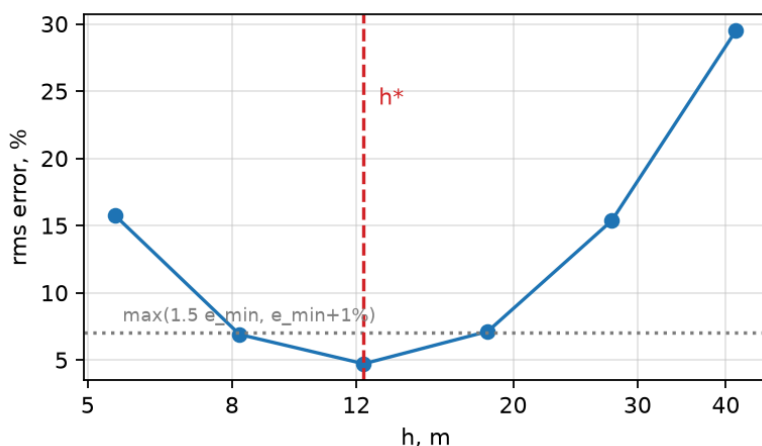
Nucleo. In modalità magnetica si usa il campo di un dipolo magnetizzato secondo il campo normale (inclinazione, declinazione e azimuth da **Options / Observation settings**); per dati di componenti (X, Y, Z), la componente corrispondente. In modalità gravimetrica, l'attrazione verticale di una massa puntiforme.

Adattamento. Intensità e termine costante sono stimati con i gradienti coniugati per i minimi quadrati (CGLS) senza formare il sistema normale. Le colonne sono scalate, la media dei dati viene sottratta prima e si applica una debole regolarizzazione. Le iterazioni (al massimo 300) si fermano quando il residuo diminuisce meno dello 0,5 % in 10 iterazioni. Il calcolo usa tutti i core del processore.

Operations / Equivalent layer apre una finestra:

- **Depth in meters** — profondità h (predefinita: due dimensioni del blocco delle sorgenti).
- **Ok** — calcolare lo strato alla profondità data.

- **Auto** — scegliere la profondità automaticamente: l'errore di adattamento si calcola per 6 profondità (spaziate in modo logaritmico) da $h/2$ al maggiore tra $2h$ e tre spazature medie. Si sceglie la profondità maggiore con errore non superiore a $\max(1,5 \cdot e_{\min}; e_{\min} + 1 \%)$, dove $e_{\min}$ è l'errore minimo: lo strato più liscio che riproduce ancora i dati. Poi lo strato si calcola in modo definitivo.
- **Cancel** — annullare.



Errore di adattamento in funzione della profondità h (20 profili ogni 50 m, passo 4 m); linea punteggiata — tolleranza, h^* — profondità scelta

Al termine un messaggio riporta la profondità e due errori: rms error — scarto quadratico medio in percentuale della dispersione quadratica media dei dati (misura rigorosa) e mean error — scarto assoluto medio in percentuale dell'intervallo dei dati ($\max - \min$). Per anomalie locali su un fondo tranquillo il secondo è 10-50 volte più piccolo del primo. La versione precedente mostrava un valore del secondo tipo, e per le derivate anziché per il campo, quindi i numeri vecchi e nuovi non sono direttamente confrontabili. In Auto viene mostrato anche l'errore di verifica su un punto ogni cinque. **Yes** ripete con un'altra profondità, **No** accetta, **Cancel** scarta.

Risultati: campo dello strato (usato da Euler), derivate dT/dx , dT/dy , dT/dz (analitiche, nei punti di misura) e campo ridotto al polo (solo modalità magnetica).

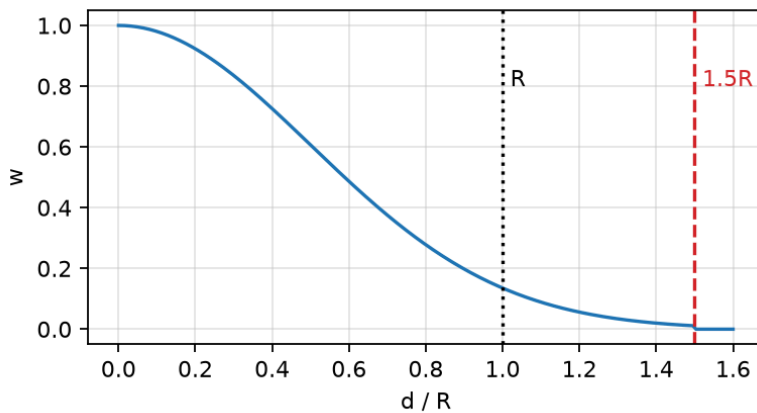
Scelta della profondità. Uno strato troppo profondo non riproduce le anomalie brevi (l'errore cresce rapidamente); uno troppo superficiale produce macchie sotto le stazioni e derivate instabili tra di esse. La profondità ottimale è di solito 1,5-3 dimensioni del blocco. Se l'errore resta grande a qualsiasi profondità, i dati contengono anomalie più brevi della spaziatura o rumore: smussare i dati. Per rilievi molto densi (oltre 4000 blocchi) la dimensione del blocco è limitata dal numero di sorgenti e le anomalie piccole sono riprodotte peggio.

Riduzione al polo

Operations / Reduce to pole sostituisce i valori osservati con il campo dello stesso strato equivalente con magnetizzazione e campo normale verticali. Il calcolo avviene nei punti originali, senza interpolazione su griglia regolare e senza FFT, ed è quindi adatto a rilievi irregolari e con topografia. È instabile a basse inclinazioni (vicino all'equatore magnetico). Per dati di componenti X e Y non è definita e il programma mostra un messaggio.

Lisciatura dei dati

Operations / Smooth data liscia i dati con una superficie quadratica locale: per ogni punto si usano i vicini entro $1,5R$ con pesi gaussiani ($\sigma = R/2$); con pochi vicini si usa un piano o una media pesata.



Peso di lisciatura in funzione della distanza normalizzata al raggio R

Il raggio si imposta nella finestra (predefinito: due spaziature); la lisciatura si può ripetere con un altro raggio, sempre a partire dai dati originali.

Derivate orizzontali per l'inversione

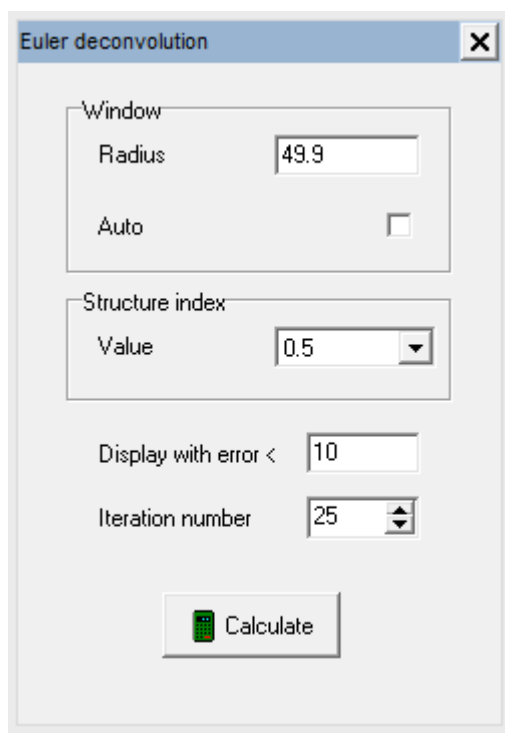
Per l'inversione con derivate (**Options / Inversion / With derivative**) le derivate orizzontali del campo osservato si calcolano come gradiente della stessa superficie quadratica locale con raggio di due spaziature; occorre una frazione di secondo anche per decine di migliaia di punti.

Altre operazioni

- **Bouguer&Free Air** — correzioni di Bouguer e di aria libera con la densità dello strato intermedio (kg/m^3), solo modalità gravimetrica.
- **Subtract incident field** — sottrarre il modulo del campo normale (modalità magnetica).
- **Subtract median field** — sottrarre la mediana.
- **Subtract user value** — sottrarre un valore dato.
- **Calculated2measured** — sostituire gli osservati con i valori calcolati per il modello corrente.
- **Return to original data** — ripristinare i dati originali.

Deconvoluzione di Euler

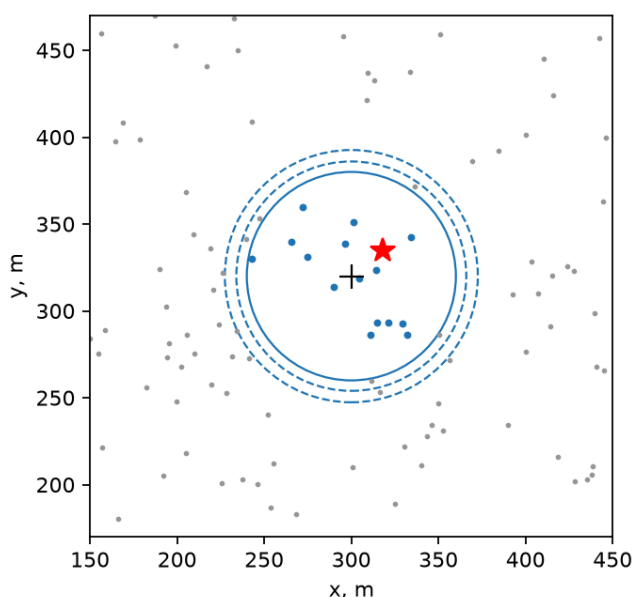
ZondGM3D implementa la deconvoluzione di Euler per ottenere la distribuzione delle sorgenti magnetiche e gravimetriche (punti singolari). Si avvia con un pulsante della barra, che apre la finestra:



Finestra della deconvoluzione di Euler

Window imposta il raggio della finestra (**radius**, m): vi rientrano tutti i punti con distanza dal punto centrale non superiore al raggio.

Auto attiva la scelta automatica: si parte dal raggio dato e si allarga la finestra di un fattore 1,1 (fino a 10 volte) finché contiene abbastanza punti; tra tutte le finestre esaminate si sceglie la soluzione con l'errore minore. Senza **Auto** si usa una sola finestra.



Finestra di deconvoluzione: punto centrale (+), punti della finestra (blu), finestre allargate di Auto (tratteggio) e sorgente trovata (stella)

Structure index imposta l'indice strutturale N , velocità di decadimento del campo: $N = 0,5$ (gradino inclinato in magnetometria; strati sottili, dicchi e sill in gravimetria), $N = 1$ (masse lineari, contatto), $N = 1,5$, $N = 2$ (masse puntiformi e linee di dipoli), $N = 3$ (dipolo), $N = 4$. Ogni indice ha un simbolo diverso.

Display with error — mostrare le soluzioni con errore inferiore al valore dato (percentuale).

Iteration number — numero di iterazioni di ripesatura robusta: con 1 si risolvono i minimi quadrati ordinari; con valori maggiori i punti con residui grandi (valori anomali, sorgenti vicine) ricevono pesi minori (pesi di Huber).

Calculate — calcolare le posizioni dei punti singolari.

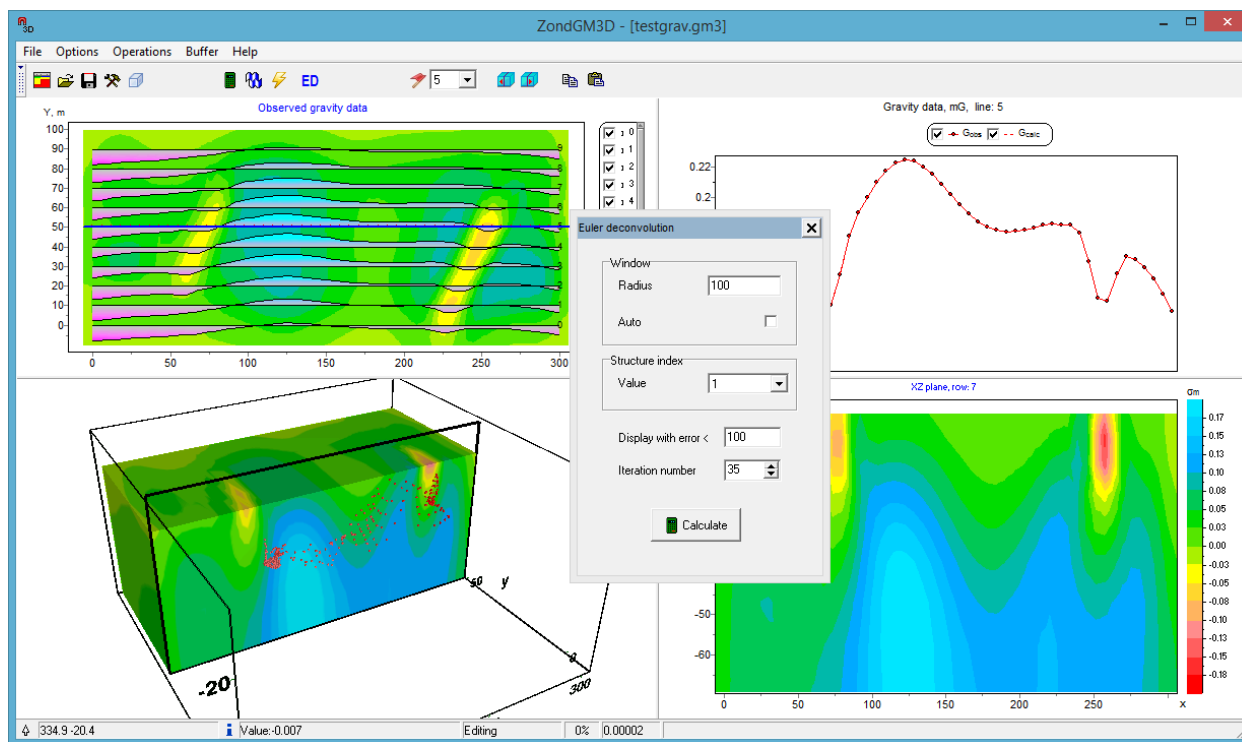
Come avviene il calcolo. Per ogni punto con campo T e derivate Tx, Ty, Tz noti, l'equazione di Euler

$$(x - x_0) \cdot T_x + (y - y_0) \cdot T_y + (z - z_0) \cdot T_z = N \cdot (B - T)$$

si scrive per tutti i punti della finestra. È un sistema lineare in x_0 , y_0 , z_0 , B risolto ai minimi quadrati (sistema 4×4 , fattorizzazione di Cholesky). La soluzione è accettata se la sorgente si trova orizzontalmente entro $\pm 0,95$ di tre raggi della finestra, sotto la topografia e non oltre 1,5 altezze del modello. L'errore è il residuo assoluto medio dell'equazione diviso per la variazione assoluta media del secondo membro, in percentuale. I vicini si cercano con una griglia spaziale, quindi il tempo cresce linearmente con il numero di punti.

Prima della deconvoluzione si calcola lo strato equivalente (**Operations / Equivalent layer**), che fornisce T e le derivate analitiche. I punti con campo o derivate non definiti sono esclusi.

Esempio di deconvoluzione di Euler:

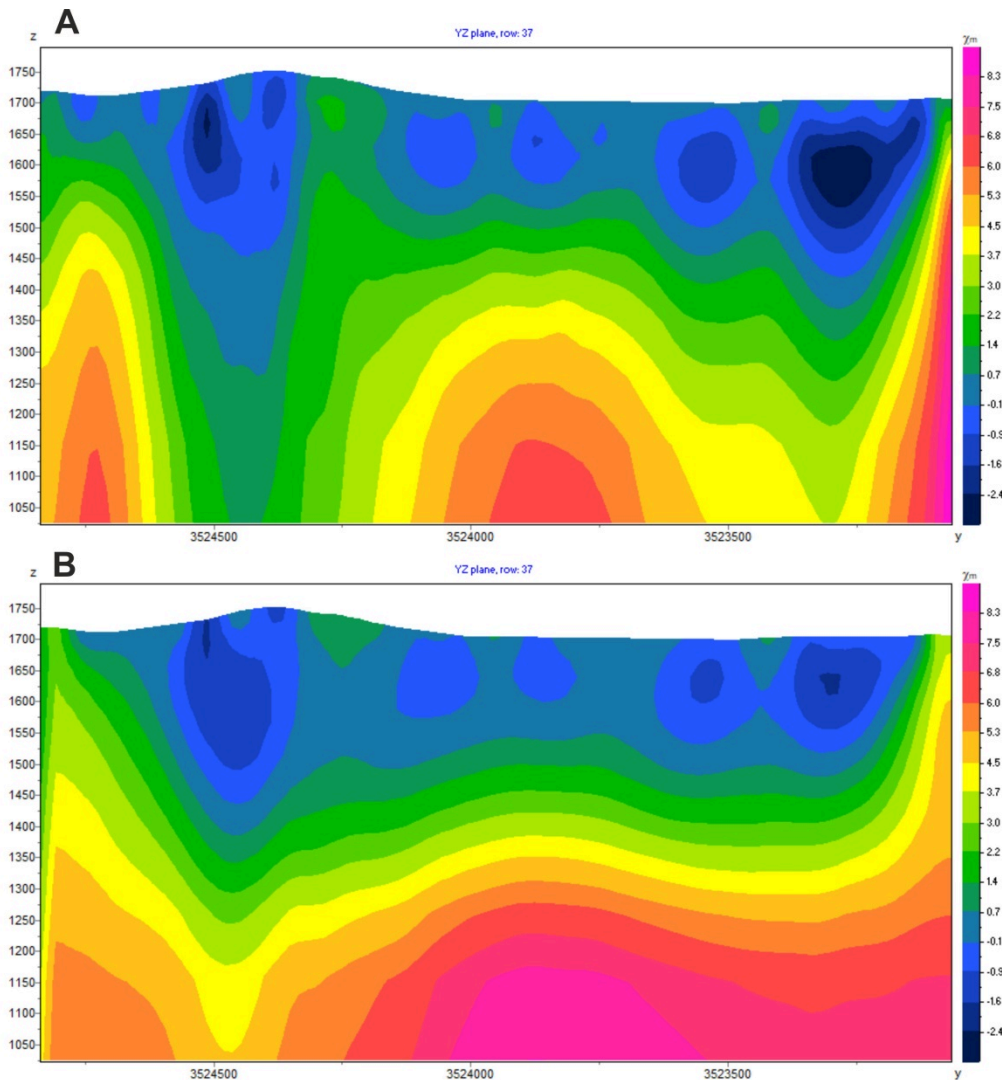


Esempio di deconvoluzione di Euler

Raccomandazioni. Scegliere un raggio di 2-4 spaziature medie. Per dati magnetici iniziare con $N = 3$ (corpi compatti) e $N = 1$ (contatti), per dati gravimetrici con $N = 2$ e $N = 1$. Soluzioni raggruppate con errore piccolo indicano una sorgente affidabile; scartare quelle sparse con errore grande con il filtro **Display with error**.

Trasformazione rapida del campo in sezione

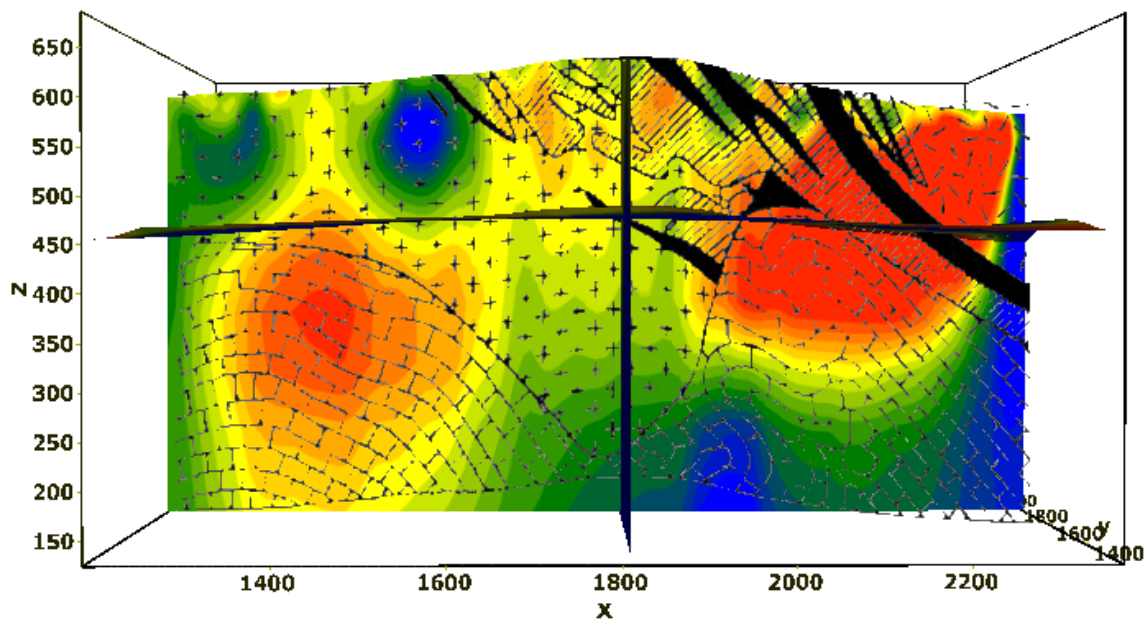
Questo algoritmo, basato sul criterio di massima verosimiglianza, fornisce rapidamente sezioni di densità e magnetiche senza impostazioni aggiuntive. Si avvia con il pulsante  della barra principale.



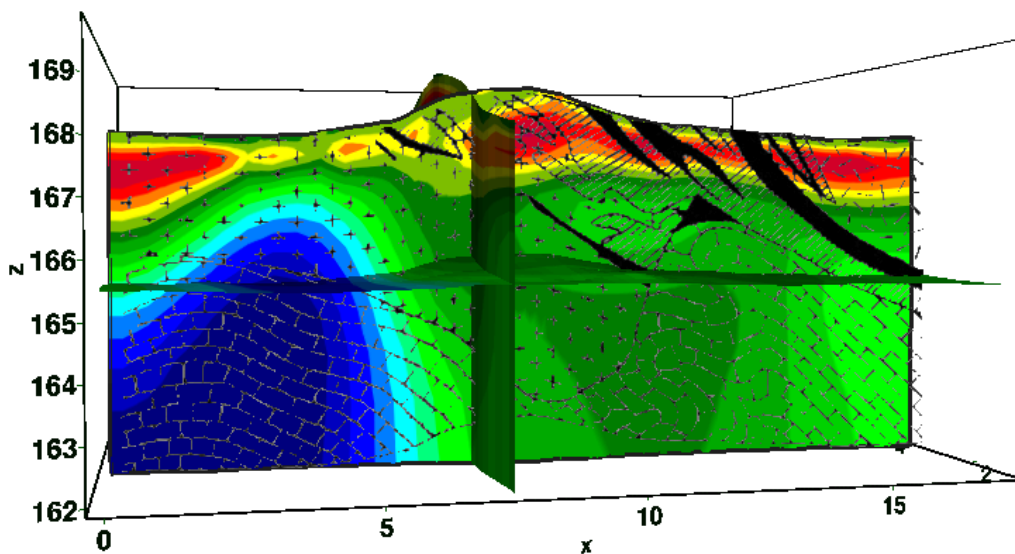
36. Confronto della sezione dopo l'inversione (A) e dopo la trasformazione rapida (B) #
Informazione a priori

Sfondi grafici per modelli 2D e 3D

Integrazione dei metodi e informazione a priori sono i modi più efficaci per migliorare l'interpretazione. Con **Options / Import/Export** si caricano modelli di altri programmi **Zond** e immagini come sfondo della sezione (ad es. sezioni geologiche o sismiche) (figura).



37. Esempio di «Background 2D»

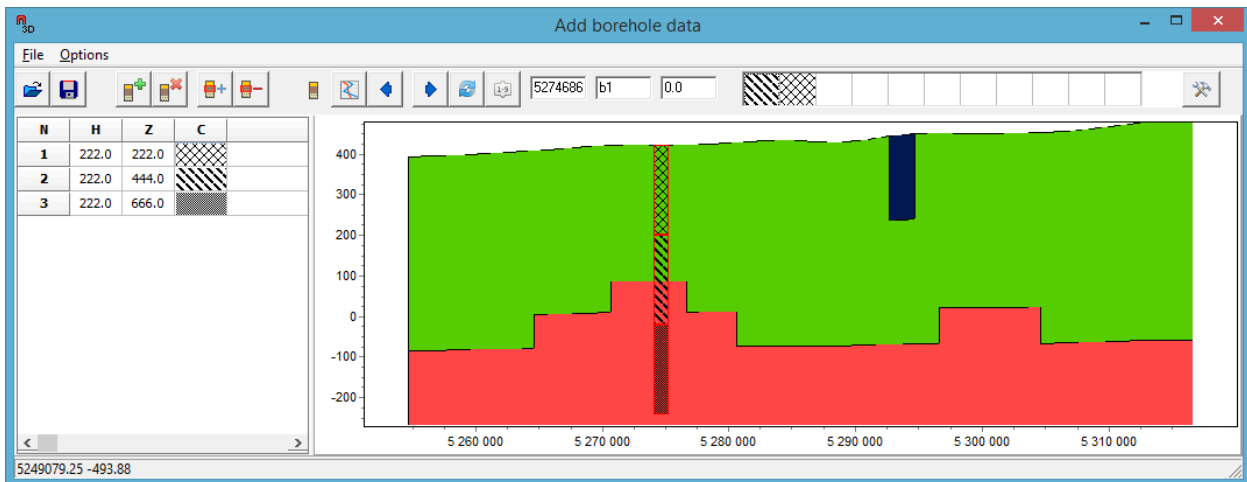


38. Esempio di «Background 3D»

Import mod2d's e **Import mod3d** caricano nel modello corrente modelli salvati in altri programmi **Zond** (MOD2D e MOD3D).

Creazione dei dati di sondaggio

Log e litologia si aggiungono in **Options / Borehole / Create / Edit borehole data** (figura), che crea, modifica e visualizza colonne litologiche e log lungo il profilo.

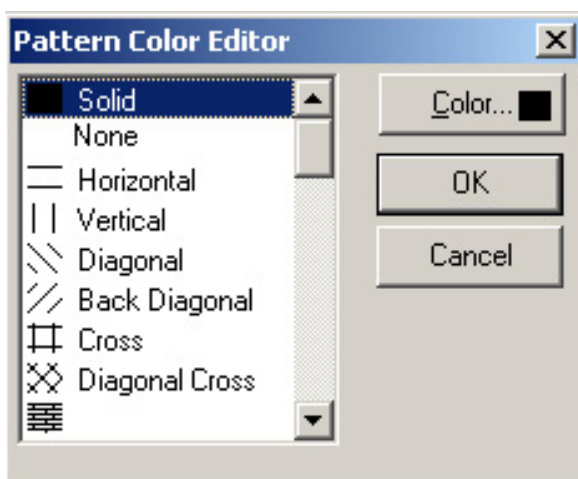


39. Modulo dei **dati di log e litologia**

Pulsanti: apri file di litologia; salva; nuovo sondaggio; elimina sondaggio; aggiungi strato; elimina strato; modalità colonne litologiche; modalità log; sondaggio precedente; successivo; aggiorna il disegno; ordina per coordinata; coordinata orizzontale; etichetta (max 5 caratteri); inclinazione nel piano XZ; opzioni aggiuntive.

A sinistra la **finestra dati** con le colonne **N** (numero dello strato), **H** (spessore in metri), **Z** (profondità del letto in chilometri), **C** (tipo di riempimento); a destra la rappresentazione grafica.

Per creare un file di litologia premere , impostare il numero di strati con , inserire spessori o profondità e scegliere il riempimento; **Pattern Color Editor** si apre con doppio clic nella colonna **C** (fig. 40), il colore si sceglie in **Color**.



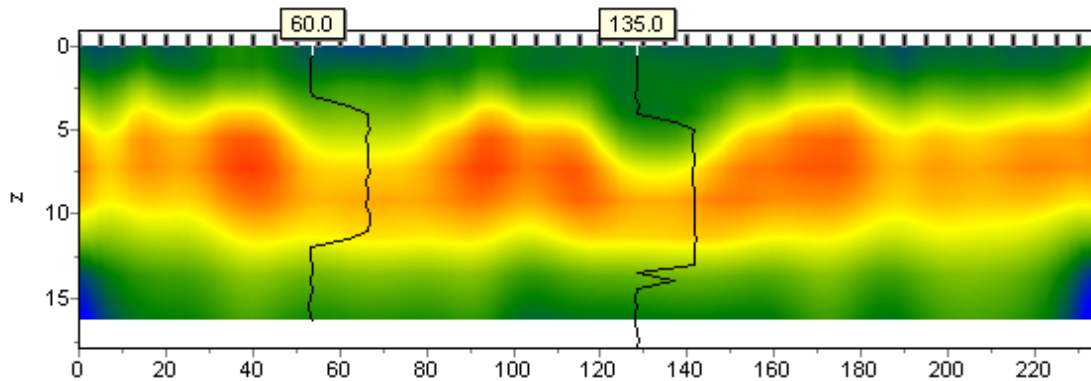
40. Editor del riempimento

Dopo l'inserimento premere e impostare le coordinate orizzontale e verticale in chilometri; il sondaggio attivo è rosso.

Per molti sondaggi si può creare una tavolozza (clic destro nell'area dei riempimenti), salvarla con  - **Save default palette** e ricaricarla con **Load default palette**. **Set borehole width** imposta la larghezza dei sondaggi in percentuale della lunghezza del profilo.

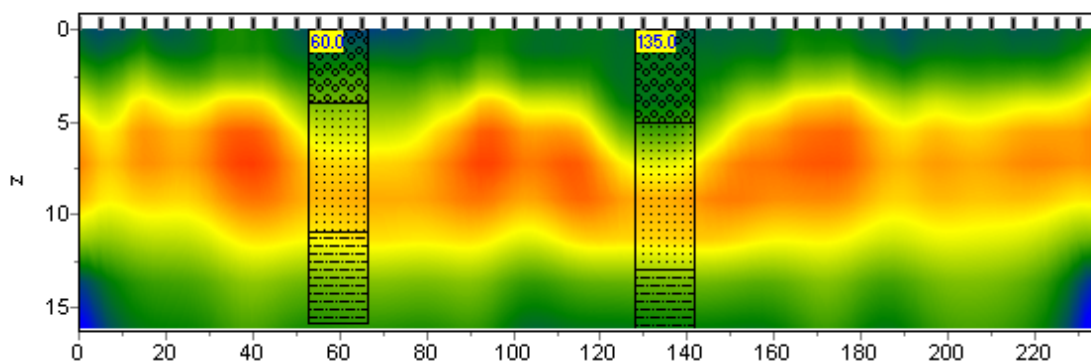
Il salvataggio crea *.crt (progetto del modulo, caricabile in **ZondGM3D**) e un *.txt per sondaggio, con nome secondo le coordinate.

I log si caricano con  nei formati *.txt e *.las. File *.txt: colonna 1 profondità dalla superficie, colonna 2 misura, colonne 3 e 4 zeri, separatore TAB.



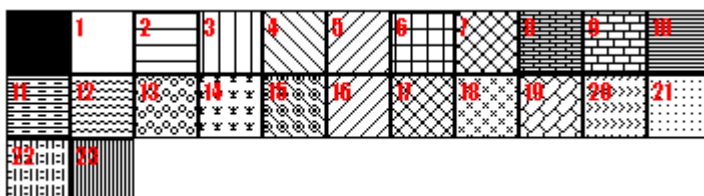
41. Modello con **log**

File di litologia: colonna 1 profondità dell'orizzonte, colonna 2 zeri, colonna 3 colore dello strato, colonna 4 tipo di retino; separatore spazio.

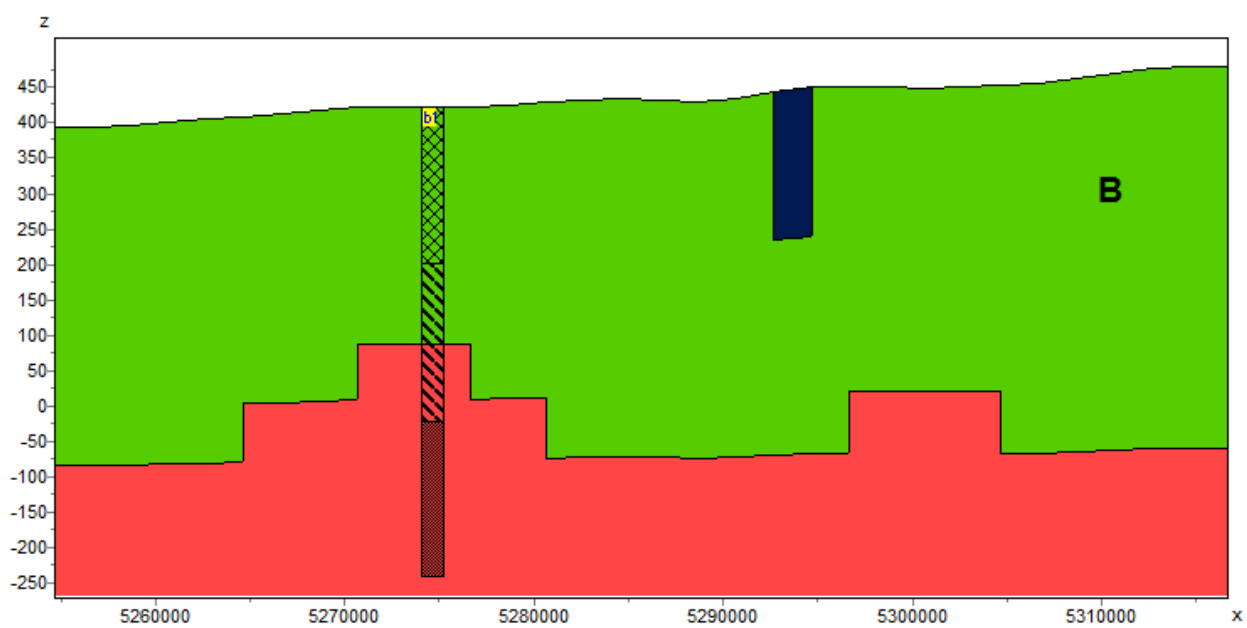
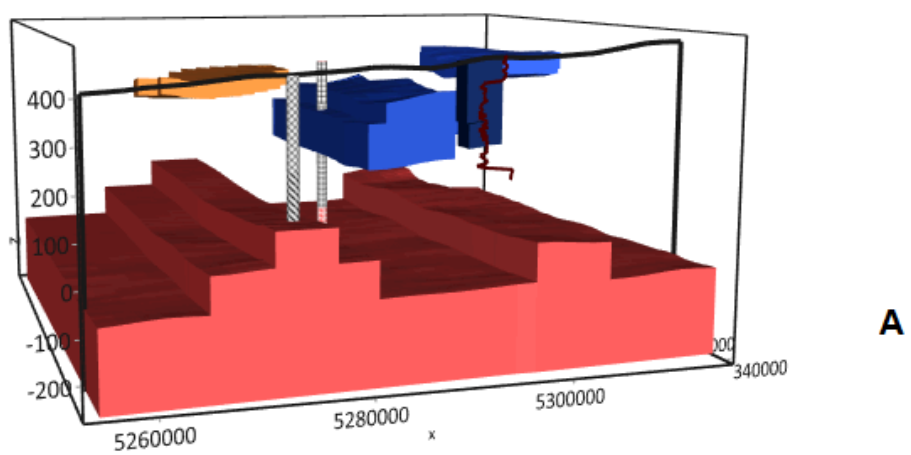


42. Modello con colonne litologiche

I primi 23 retini disponibili:



43. Retini della colonna litologica

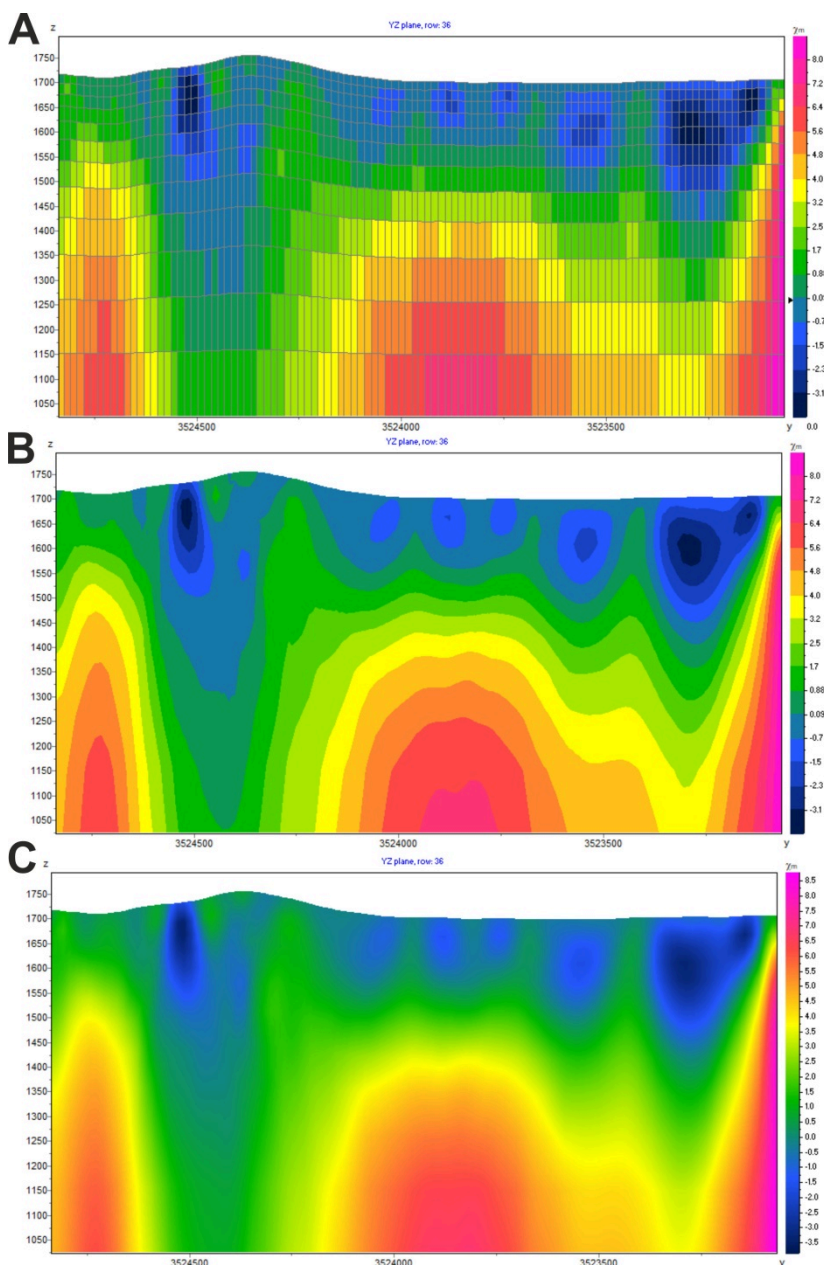


44. Informazioni di sondaggio nel modello 3D (A) e in sezione (B).

Risultati dell'interpretazione

Visualizzazione della sezione

La sezione si mostra a celle (**Options / Model / Block-section**) o con tavolozza continua (**Options / Model / Smooth-section**) (figura); per la tavolozza continua attivare **Continuous** nella scheda **Colors** di **Model setup**.

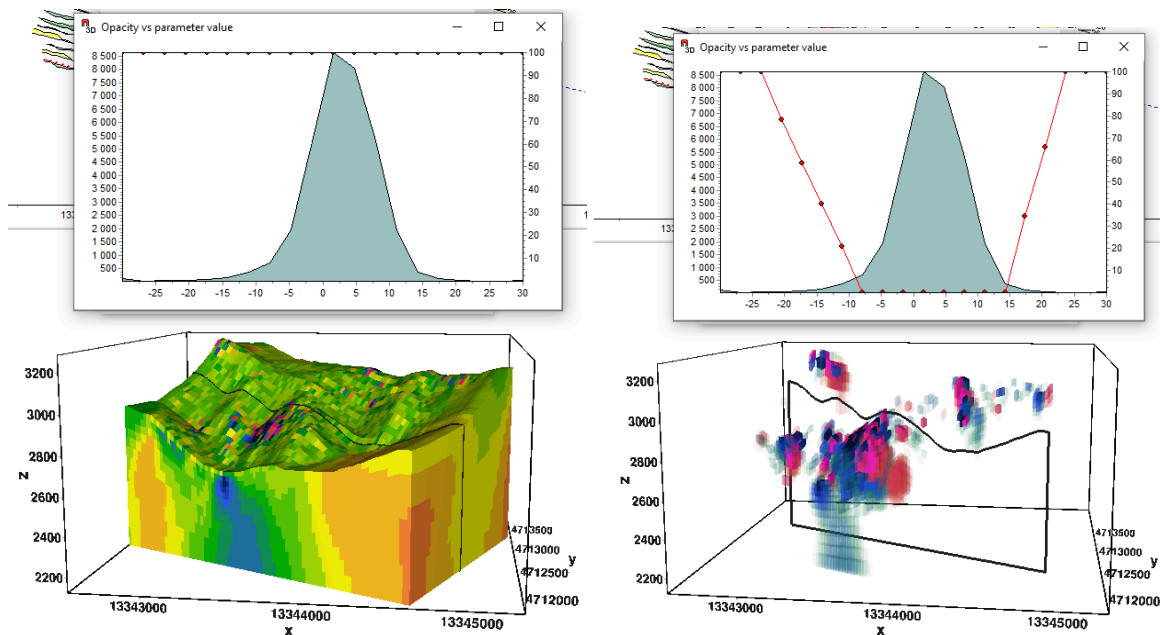


45. Varianti: Block-section (A), Smooth-section a isolinee (B) e con tavolozza continua (C)

Visualizzazione del modello 3D

La rotella controlla la scala, il tasto sinistro ruota il modello, il clic destro apre **3D Options** (cinque schede). **Opacity** (0-100) imposta la trasparenza globale; per impostazioni più fini

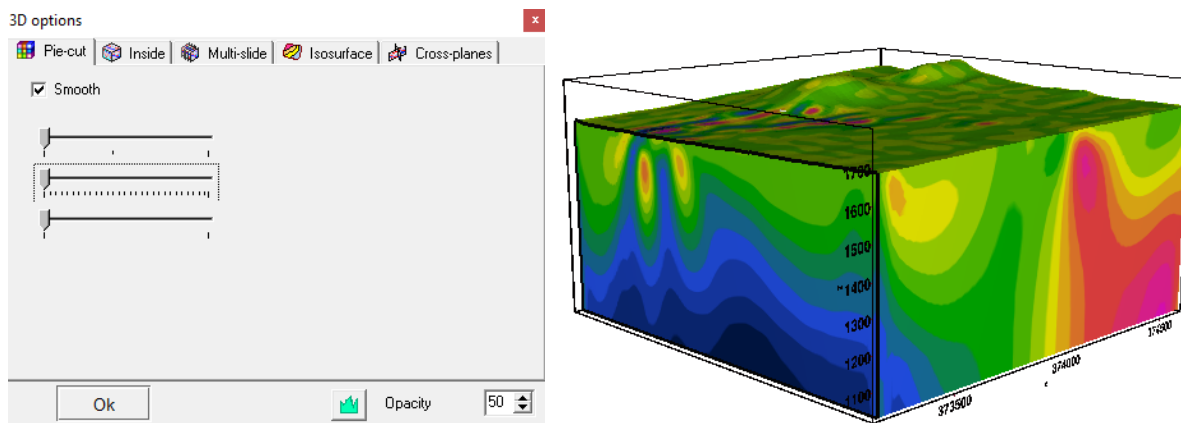
usare  (figura).

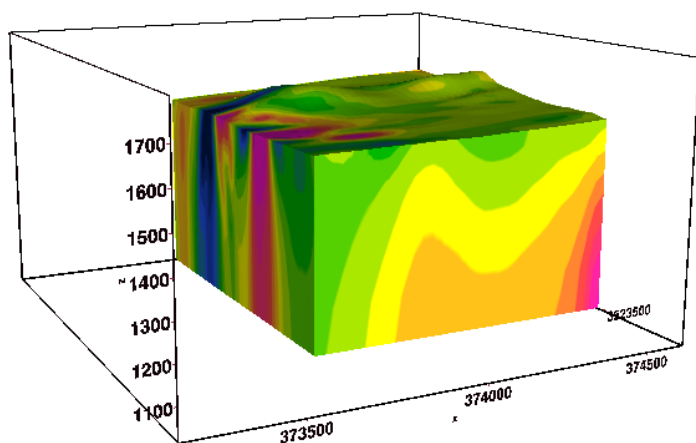


46. Finestra «Opacity vs parameter value»

In «**Opacity vs parameter value**» il grafico blu (riempito) è la distribuzione del parametro, quello rosso l'opacità in funzione del valore. Il valore del mezzo incassante è di solito il massimo della distribuzione; per mostrare solo i corpi anomali ridurre l'opacità dei valori vicini. Il profilo si modifica con il mouse.

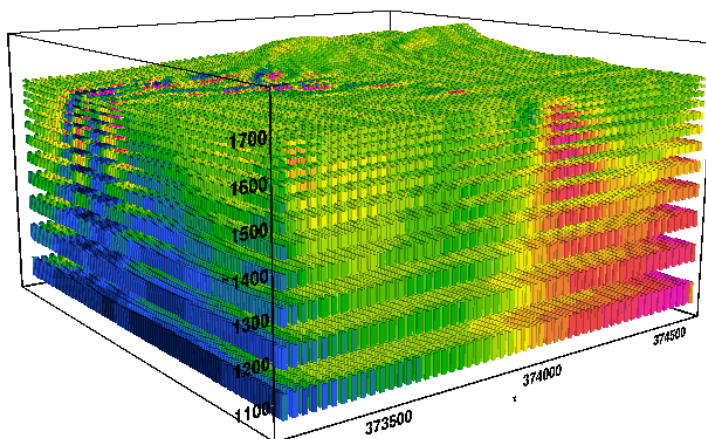
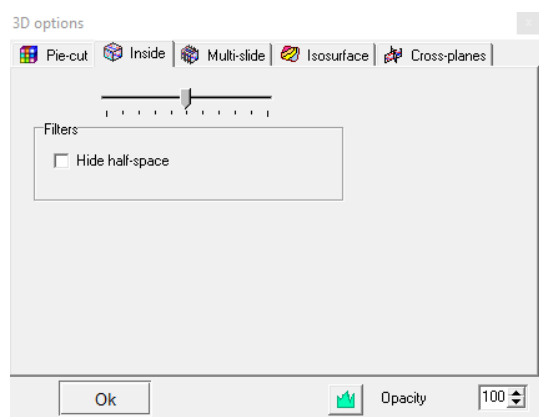
Pie-cut costruisce il modello delimitato dalle sezioni scelte; **Smooth** colorazione continua; tre cursori per i limiti del taglio.





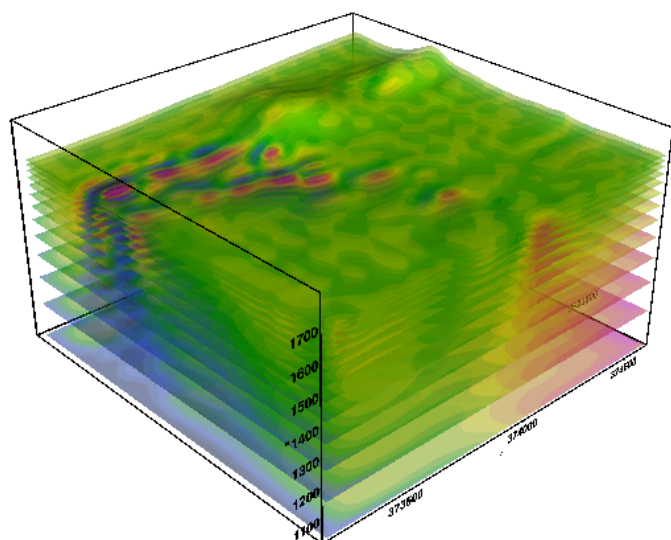
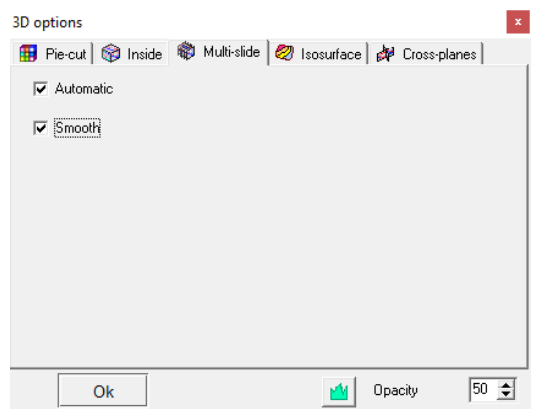
47. Scheda Pie-cut (A) e viste del modello (B, C)

Inside costruisce il modello a blocchi; il cursore superiore imposta la dimensione relativa della cella (0-100%); **Hide half-space** nasconde i blocchi con il valore del semispazio.



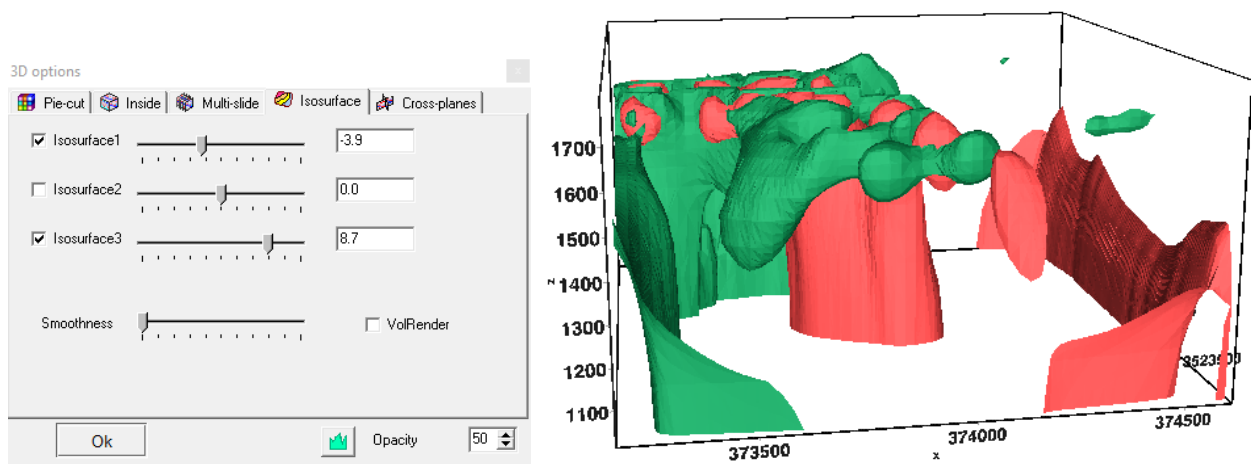
48. Scheda Inside (A) e vista del modello (B)

Multi-slide mostra una pila di sezioni semitrasparenti; **Automatic** sceglie la direzione secondo l'angolo di vista.



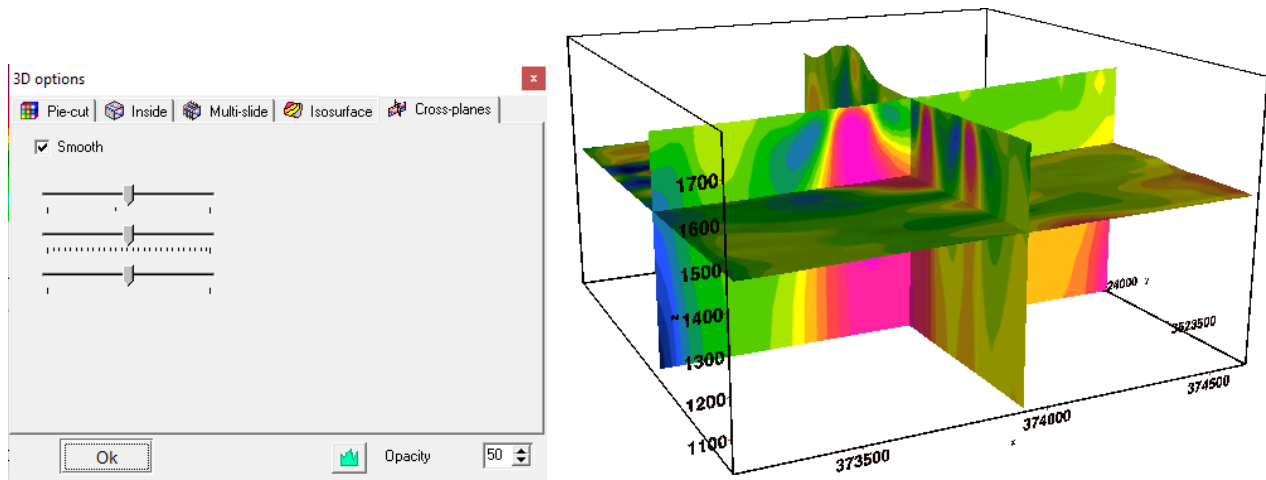
49. Scheda Multi-slide (A) e vista del modello (B)

Isosurface mostra isosuperfici 3D (tre cursori per i valori, **Smoothness** per la regolarità); **VolRender** mostra una nebbia semitrasparente colorata secondo il modello.



50. Scheda Isosurface (A) e vista del modello (B)

Cross-planes mostra tre piani semitrasparenti intersecanti, con tre cursori per le posizioni.



51. Scheda Cross-planes (A) e vista del modello (B)

Più modelli in un progetto

Buffer/Open confronta modelli ottenuti con parametri diversi, con tavolozza e scale comuni. Per salvare il modello corrente premere un pulsante del buffer e inserirne il nome. Se la cella non è vuota, il programma chiede se aprire il modello (**From Buffer**) o sovrascriverlo (**To buffer**). **Only current** carica solo il parametro corrente.

Salvataggio dei risultati

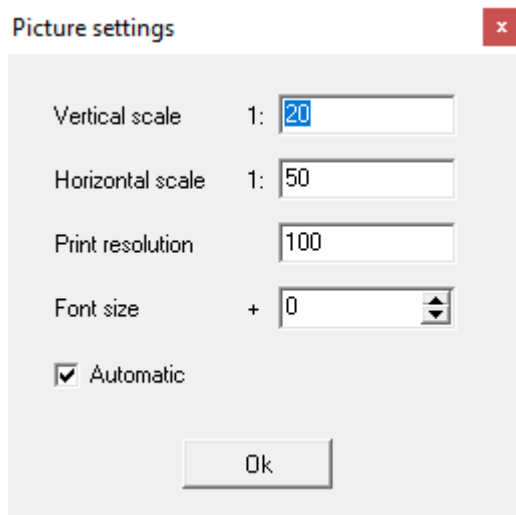
Il progetto è salvato in un file binario **ZondGM3D** (*.gm3) con dati osservati e calcolati, pesi, modello corrente e altro. Per salvare premere  o **File / Save file**.

- **Project file [*.gm3]** — Progetto con dati osservati, modelli e impostazioni.
- **Project with calculated data [*.gm3]** — Progetto con gli osservati sostituiti dai calcolati, utile per provare l'inversione.
- **Observed [*.gm3]** — Valori osservati in gm3 di testo.
- **Calculated data [*.gm3]** — Valori calcolati in gm3 di testo.
- **XYZV [*.dat]** — Modello come testo per la visualizzazione 3D in altri programmi.
- **XYZ [*.dat]** — Sezione corrente come testo per grigliatura e visualizzazione 2D.

Finestre di impostazione grafica

Esportazione della sezione

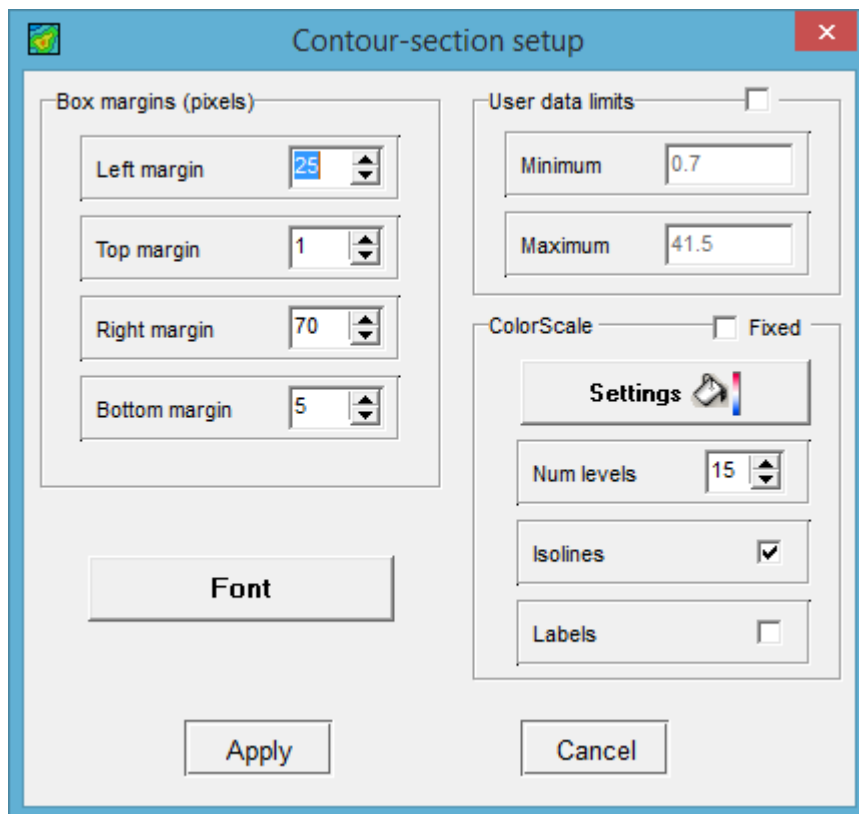
Output settings imposta **Vertical scale** e **Horizontal scale** (metri per centimetro), **Print resolution** (DPI) e **Font size**; valgono per la sezione salvata in BMP se **Automatic** è disattivato, altrimenti l'immagine è salvata come a schermo.



52. Finestra Picture settings

Impostazioni della mappa a isolinee

Si apre con **Setup** nel menu contestuale della mappa.



53. Finestra «Contour-section setup»

Box margins - margini (pixel) da sinistra, destra, alto e basso. **User data limits** - usare minimo e massimo dei dati o i valori **Minimum** e **Maximum** per le isolinee. **ColorScale / Settings** - tavolozza (figura).

3D Edit levels

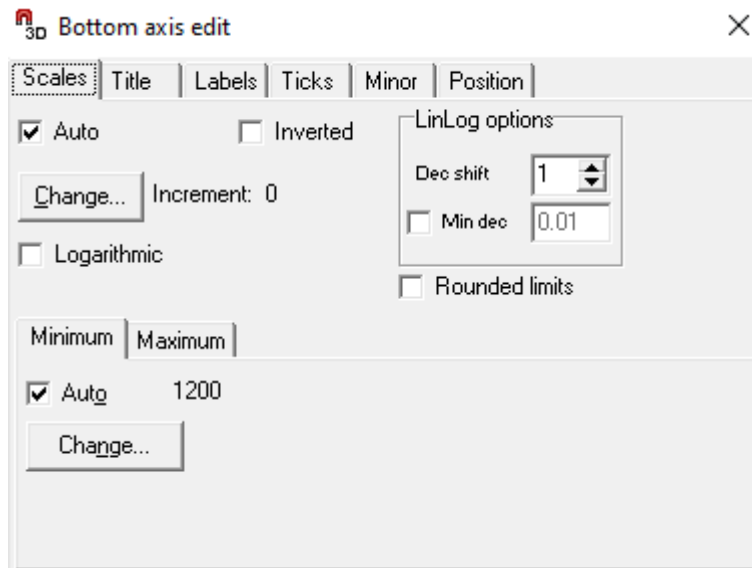
#	C_color	L_color	Level	L_visible
1			-700.00	☒
2			-600.00	☒
3			-500.00	☒
4			-400.00	☒
5			-200.00	☒
6			-100.00	☒
7			0.00	☒
8			100.00	☒
9			200.00	☒
10			300.00	☒
11			400.00	☒
12			600.00	☒
13			700.00	☒
14			800.00	☒
15			900.00	☒

54. Finestra «Settings»

Clic destro sulle intestazioni: **C_color** (colori della scala), **L_color** (colori delle tacche), **Level** (limiti), **L_visible** (disattivare isolinee). Le tavolozze si caricano e salvano nel formato *.clr di Surfer. **Num levels** - numero di livelli (passo lineare o logaritmico); **Isolines**, **Labels**, **Font**.

Editor degli assi

Si apre con clic destro e SHIFT sull'asse (figura); il menu offre **options**, **default** e **fix range**.

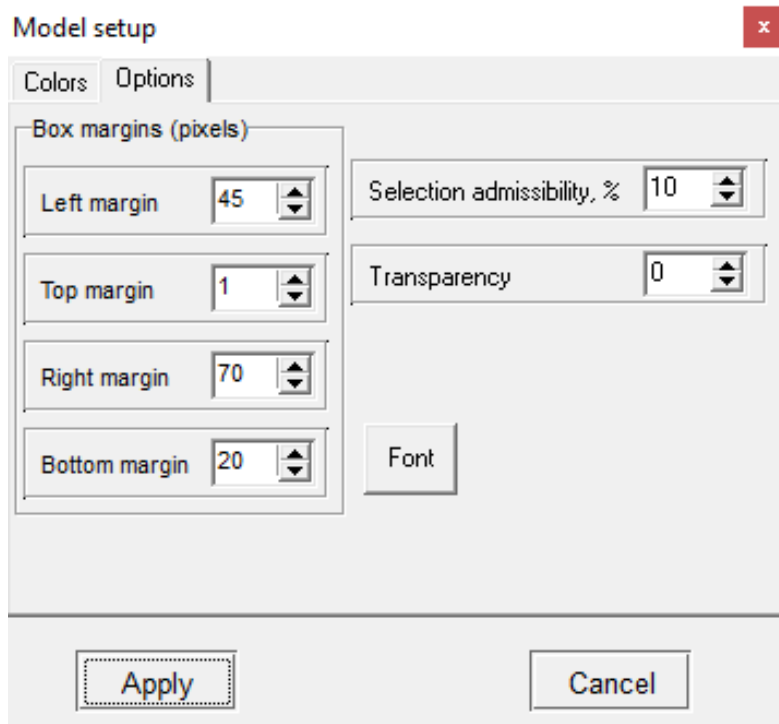


55. Editor dell'asse inferiore

Scales: **Auto** (limiti automatici o in Minimum/Maximum), **Inverted**, **Increment change**, **Logarithmic**, **Lin Log options** (**Dec Shift** - decenni dal limite massimo allo zero, decade pre-zero lineare; **Min dec**), **Rounded limits**, **Minimum/Maximum** con **Auto** o **Change**. **Title:** **Style** (**Title**, **Angle**, **Size**, **Visible**) e **Text** (**Font**, **Outline**). **Labels:** **Visible**, **Offset**, **Angle**, **Min separation%**, **Font**, **Outline**. **Ticks:** **Axis**, **Grid**, **Ticks** (**Len**), **Inner**, **At labels only**. **Minor:** **Grid**, **Ticks** (**Length**), **Count**. **Position:** **Position%**, **Start%**, **End%**.

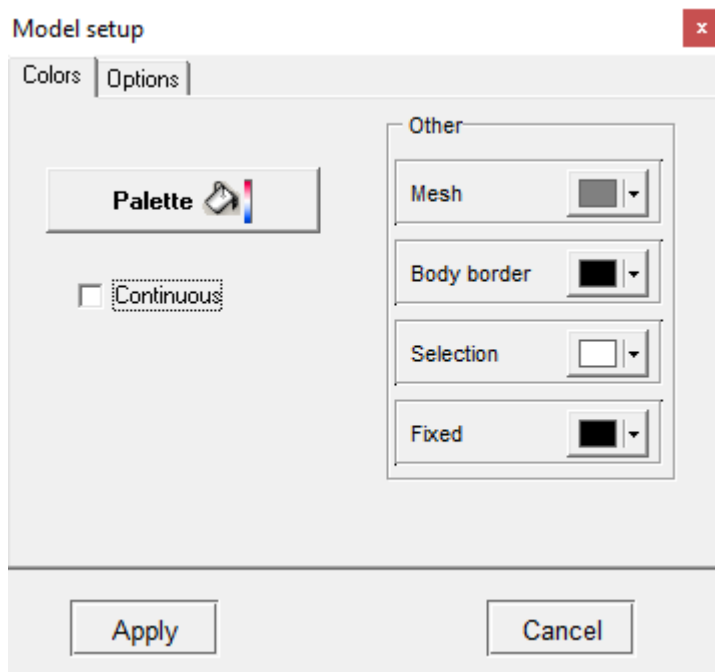
Impostazioni di visualizzazione del modello

Si apre con **Setup** nel menu contestuale della parte superiore del modello.



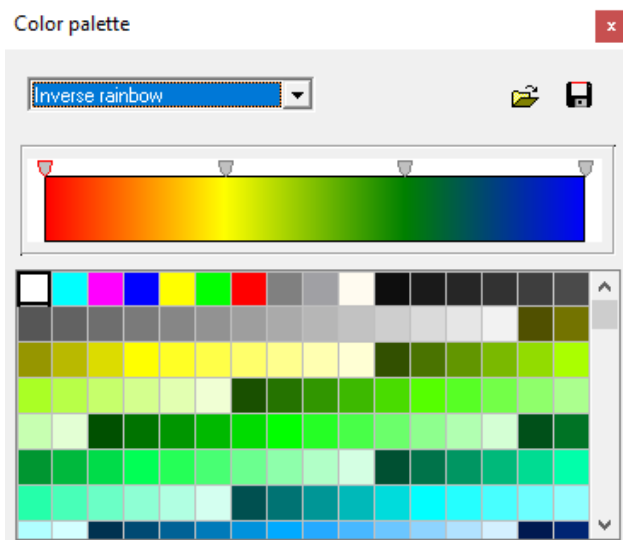
56. Finestra «Model setup», scheda «Options»

Box margins; **Selection admissibility, %** – differenza ammessa tra celle adiacenti per la selezione MagicWand; **Transparency**; **Font**.



57. Finestra «Model setup», scheda «Colors»

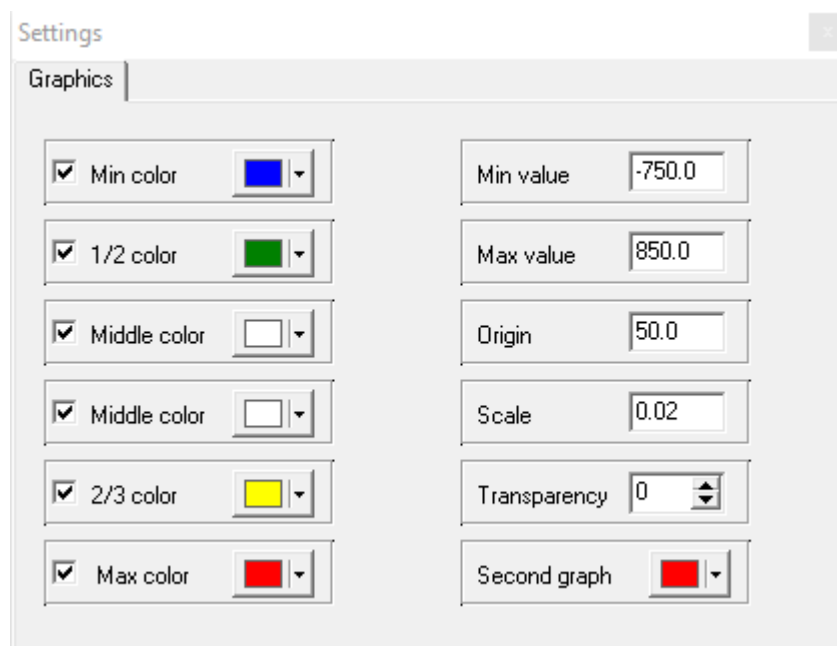
Palette – tavolozza (figura), modificabile e salvabile in *.clr di Surfer; *Continues* – tavolozza continua o a tratti; **Other: Body border, Mesh, Selection, Fixed** – colori del bordo tra celle, della maglia, della cella selezionata e fissata.



58. Finestra «Model setup», pulsante «Palette»

Impostazioni della mappa dei grafici e dei punti

Si apre con **Setup** nel menu contestuale della mappa dei grafici (figura).

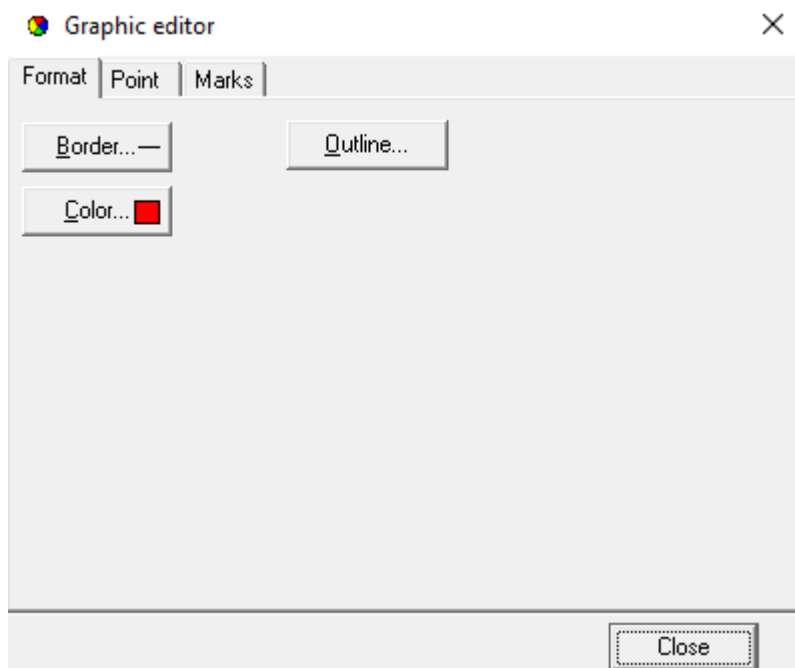


59. Finestra dell'insieme dei grafici

Min color, 1/2 color, Middle color, 2/3 color, Max color – tavolozza di riempimento; **Min value, Max value, Origin** – valori minimo, massimo e medio; **Scale; Transparency; Second graph** – colore delle curve teoriche.

Editor del grafico

Imposta l'aspetto di una curva; si apre con tasto destro e **Shift** tramite **Options** con il cursore sulla curva (figura).

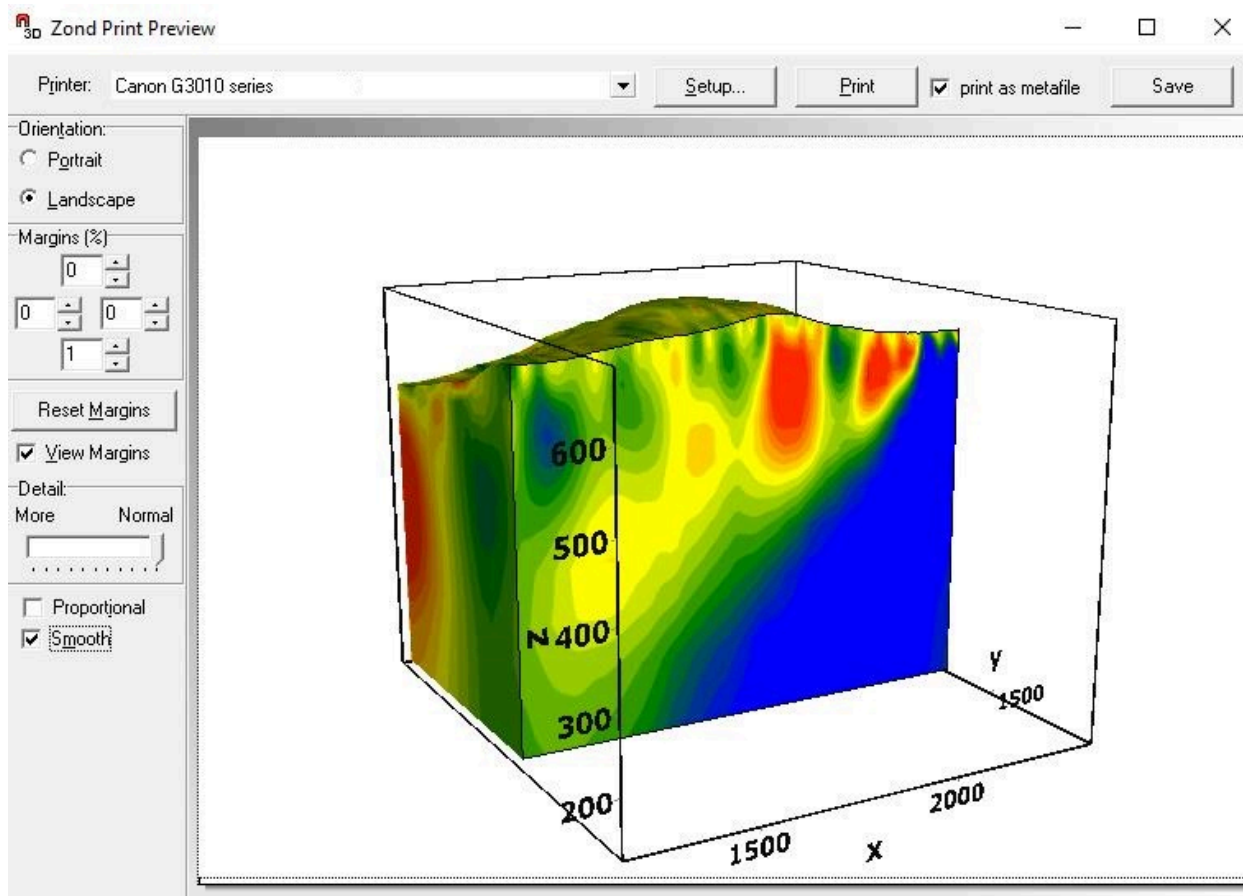


60. Finestra di impostazione del grafico

Format: **Border**, **Color**, **Outline** delle linee. **Point:** **Visible**, **Error gates**, **Style**, **Width**, **Height**, **Pattern**, **Border**. **Marks:** **Visible**, **Draw every**, **Angle**, **Clipped**; **Arrows** (**Border**, **Length**, **Distance**); **Format** (**Color**, **Frame**, **Round Frame**, **Transparent**); **Text** (**Font**, **Outline**).

Anteprima di stampa

Si apre con **File / Print preview** o con doppio clic su un oggetto; dal menu contestuale di un oggetto si stampa solo quell'oggetto (figura).

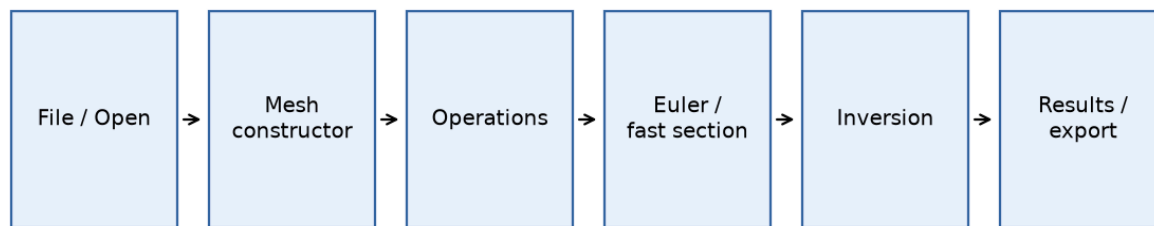


61. Finestra «Print preview»

L'oggetto si sposta sul foglio con il tasto sinistro. Pulsanti: **Printer** – scelta della stampante;

Setup... – impostazione pagina; **Print** – stampa; ☒ **print as metafile** – stampa o salvataggio vettoriale; **Save** – salvataggio bitmap o png.

Algoritmi di elaborazione e prestazioni



Flusso di lavoro tipico: caricamento dei dati, costruzione della maglia, trasformazioni del campo, deconvoluzione di Euler o trasformazione rapida, inversione, salvataggio ed esportazione

Lettura dei dati. I file si leggono riga per riga; i vettori crescono geometricamente (non di una quantità fissa), quindi il tempo di lettura è lineare nel numero di punti.

Punti coincidenti. Nello strato equivalente, nella lisciatura e nelle derivate i punti coincidenti (tolleranza 1 mm, 0,1 mm o 0,1 m secondo l'operazione) sono individuati con una griglia spaziale in tempo lineare e contati una volta.

Multithreading. Adattamento dello strato equivalente, suo campo e derivate, lisciatura, valutazione delle varianti di maglia e interpolazione della topografia usano tutti i core.

Tempi indicativi (2 thread, rilievo irregolare):

- strato equivalente con profondità automatica: 3000 punti — circa 9 s, 20000 punti — circa 23 s;
- campo, derivate e RTP da uno strato calcolato: 0,05 s e 0,6 s;
- deconvoluzione di Euler con finestra automatica in tutti i punti: 0,8 s e 13 s;
- lisciatura e derivate orizzontali per 20000 punti: meno di 0,1 s.

Con più core il tempo si riduce proporzionalmente.

Precisione (test sintetico: 4 sorgenti a 60-120 m, rilievo irregolare con spaziatura media 7-18 m, topografia ± 8 m): errore di adattamento dello strato inferiore all'1%, errore delle derivate 4-10%, errore RTP 2-4%, posizione della sorgente con Euler entro 1 m.

Bibliografia

1. Bijendra, S. and D. Guptasarma. [2001] New method for fast computation of gravity and magnetic anomalies from arbitrary polyhedra. *Geophysics*, 66, 521-526.
2. Marquardt, D.W. [1963] An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters: *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, 11, 431-441.
3. Portniaguine, O.N. and Zhdanov M.S. [1999] Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*. V. 64. P. 874-887.
4. Khmelevskoy, V.K. [1997] *Geophysical methods for studying the earth's crust*. Dubna.

Materiali aggiuntivi

Video su YouTube: https://www.youtube.com/channel/UCGtpRIIZkc9CsLfiuz4VvmQ?view_as=subscriber

Gruppo di supporto su LinkedIn: <https://www.linkedin.com/groups/6667336/>

Progetti dimostrativi Zond: ftp://zond-geo.com/ (Username: download@zond-geo.com, Password: 12345)

Il programma non funziona con la chiave USB:

- Il driver non è installato o lo è in modo errato. Su alcuni sistemi la chiave è riconosciuta come dispositivo HID senza driver, su altri il driver va installato: http://senselock.ru/files/senselock_windows_3.1.0.0.zip. In Gestione dispositivi deve comparire “Senselock Elite”.
- È terminato il periodo di aggiornamenti gratuiti: usare l’ultima versione funzionante o acquistare altri due anni di aggiornamenti.
- Talvolta, dopo il passaggio in modalità HID, il sistema non riconosce la chiave: riportarla in modalità USB con <http://www.zond-geo.com/zfiles/raznoe/SenseSwitch.zip>; “senseswitch.exe” si esegue da cmd: senseswitch.exe usb.