ZondGM2D

Programa de interpretación 2D de datos magnéticos y gravimétricos.
Manual de usuario (edición 2026)

Contenido

FUNCIONALIDAD DEL PROGRAMA
REQUISITOS DEL SISTEMA
INSTALACIÓN Y DESINSTALACIÓN
DENSIDAD DE LAS ROCAS
SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE ROCAS Y MENAS
DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL PROGRAMA
- Barra de herramientas de la ventana principal
- Funciones del menú principal
- Teclas rápidas
- Panel de estado

ESQUEMA GENERAL DE TRABAJO
GUÍA DE TRABAJO
- Preparación y apertura del archivo de datos
- Importación y exportación de datos
- Guardado de los resultados de la interpretación
- Primeros pasos con el programa
- Diálogo de parámetros del programa
- Gráficas de perfil (Profile)
- Editor de modelo
- Elección del modelo del medio en la inversión (malla regular de celdas, modelo poligonal y de capas arbitrarias)

MODELADO
- Modos de modelado poligonal y de capas arbitrarias
- Inversión del modelo poligonal
- Inversión del modelo de capas arbitrarias: algoritmo

PROCESADO Y TRANSFORMACIONES DEL CAMPO
- Operaciones de perfil y de área
- Suavizado de datos (Smooth data)
- Capa equivalente, derivadas y RTP

Deconvolución de Euler
OPCIONES AVANZADAS DEL PROGRAMA
Algoritmos de inversión
Prolongación hacia abajo
Diálogo Cell summarization
Opción «Buffer» del menú principal
Editor de secciones geológicas
Trabajo con datos areales y visualización 3D
Información a priori
CONFIGURACIÓN DE LA INTERFAZ
Configuración de la paleta
Editor de ejes
Editor de gráficas
Diálogo de vista previa de impresión
Formato de los archivos de datos
Formato del archivo de datos
Formato del archivo de registros y litología
REVISIÓN Y ACELERACIÓN DE MÓDULOS (VERSIÓN 2026)

FUNCIONALIDAD DEL PROGRAMA

«ZondGM2D» es un programa para la interpretación 2D de datos de perfil y de área, en varios niveles, obtenidos en prospección magnética y gravimétrica. Su interfaz sencilla y las amplias opciones de presentación de datos permiten resolver los problemas geológicos con la máxima eficacia.

El método tradicional de exploración de formaciones ferríferas es la magnetometría. Estudia los campos magnéticos de objetos que contienen minerales ferromagnéticos. La relación física entre los datos medidos en superficie y las propiedades magnéticas en profundidad permite suponer la presencia de cuerpos magnéticos.

En magnetometría se mide el campo magnético total. Está formado por el campo normal de la Tierra, los campos anómalos producidos por cuerpos magnetizados y las variaciones del campo magnético, relacionadas principalmente con la actividad solar. La componente útil asociada al área de estudio es el campo anómalo, que puede separarse teniendo en cuenta el campo normal y midiendo las variaciones magnéticas en las cercanías del área de levantamiento.

El campo magnético en la superficie terrestre puede representarse como una suma vectorial: $T = T_n + T_a + \delta T_v$, donde T_n y T_a son los campos magnéticos normal y anómalo, y δT_v las variaciones del campo magnético. El campo normal T_n se divide en una componente dipolar (T_d) y otra no dipolar (T_m), es decir $T_n = T_d + T_m$.

El campo dipolar T_d, que en primera aproximación es el campo magnético de la Tierra, es el campo de una esfera magnetizada homogénea. La diferencia entre el campo dipolar (calculado) y el campo normal (medido por satélite) es la parte no dipolar T_m del campo normal. A menudo se denomina campo residual o campo de anomalías continentales (el tamaño de estas anomalías es comparable al de los continentes). Sus máximos no superan el 30 % del valor del campo dipolar.

Los valores de T_n aumentan gradualmente desde 33 000 nT en el ecuador hasta 68 000 nT cerca de los polos; la componente vertical del campo normal en la zona del polo norte alcanza 60 000 nT, cambia de signo al pasar por el ecuador y disminuye gradualmente desde 0 en el ecuador hasta −68 000 nT en el polo sur. La componente horizontal tiene su máximo cerca del ecuador (33 000 nT) y disminuye hasta 0 en los polos. El gradiente del campo magnético normal es de unos 5 nT por kilómetro.

Las fuentes del campo magnético anómalo T_a son objetos magnetizados situados cerca de la superficie de la Tierra. La profundidad máxima de las rocas magnéticas es de unos 50 km. A mayor profundidad las propiedades magnéticas desaparecen por las altas temperaturas.

El valor del campo T_a es aproximadamente el 10 % de T_n, salvo en la Anomalía Magnética de Kursk, donde el campo T_a alcanza decenas de miles de nT. Las anomalías magnéticas producidas por las rocas se dividen en regionales y locales.

La parte variable δT_v del campo magnético terrestre está formada por las variaciones magnéticas, cuya contribución al campo total es inferior al 1 %. Las variaciones más importantes se dividen en periódicas (variaciones solar-diurnas y de período corto) y aperiódicas (bahías y tormentas magnéticas).

Todas las variaciones se deben a fuentes externas a la Tierra: interacción de partículas cargadas con la ionosfera, corrientes eléctricas que circulan en franjas de latitudes altas a 100–150 km de altura, etc. En general, la corrección de las variaciones es importante en magnetometría, porque producen distorsiones significativas en los datos observados.

El programa «ZondGM2D» permite resolver los problemas directo e inverso de la magnetometría y la gravimetría (recuperación de la susceptibilidad magnética anómala, la densidad y la geometría de los objetos).

En el programa la susceptibilidad magnética se da en el sistema SI (n*10^{-5}), la densidad en g/cm^3 y los valores medidos en nanoteslas o miligales.

Para resolver el problema inverso (inversión) se usan varias versiones de métodos de deconvolución y el método de Newton con regularización focalizada.

$$(A^T W^T \mathrm{WA} + \mu C^T \mathrm{RC})\Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T \mathrm{RCm}$$

donde A es la matriz de derivadas parciales de los datos respecto a los parámetros del modelo (jacobiano), C el operador de suavizado, W la matriz de errores relativos de medida, m el vector de parámetros del modelo, μ el parámetro de regularización, Δf el vector de residuos entre valores observados y calculados, y R el operador de focalización.

En el desarrollo del problema inverso se ha prestado especial atención al uso de información a priori (pesos de medidas individuales, rangos de parámetros).

«ZondGM2D» usa un formato de archivo de datos sencillo y claro.

El programa permite importar y visualizar datos de otros métodos, lo que integra mejor el proceso de interpretación.

«ZondGM2D» es una herramienta fácil de usar para la interpretación automática e interactiva de datos magnéticos y gravimétricos en varios niveles, y funciona en PC compatibles con sistema operativo Windows.

REQUISITOS DEL SISTEMA

«ZondGM2D» puede instalarse en un PC con Windows 98 o superior. Parámetros recomendados: procesador P IV de 2 GHz, memoria de 512 MB, resolución de pantalla 1024 × 768, modo de color True color (no se recomienda cambiar la resolución mientras se trabaja con datos).

Como el programa utiliza activamente el registro, en sistemas posteriores a Windows XP se recomienda ejecutarlo como administrador (clic derecho en el acceso directo — ejecutar como administrador).

INSTALACIÓN Y DESINSTALACIÓN

El programa «ZondGM2D» se distribuye por internet. Este manual se incluye en el paquete. Las últimas actualizaciones pueden descargarse en www.zond-geo.com.

Para instalar el programa, cópielo en el directorio deseado (por ejemplo, Zond). Para instalar una actualización, sustituya la versión anterior por la nueva.

Antes de iniciar el programa debe instalarse el controlador de la llave de protección SenseLock. Para ello abra la carpeta SenseLock (el controlador puede descargarse del sitio web) y ejecute InstWiz3.exe. Después de instalar el controlador, inserte la llave. Si todo es correcto, en el panel inferior del sistema aparecerá un mensaje indicando que la llave ha sido detectada.

Para desinstalar el programa, borre su directorio de trabajo.

DENSIDAD DE LAS ROCAS

Para realizar levantamientos gravimétricos y, sobre todo, para interpretar sus resultados es imprescindible conocer la densidad de las rocas σ, el único parámetro físico en el que se basa la gravimetría.

La densidad de una roca (o peso volumétrico) es su masa por unidad de volumen. La unidad de densidad es g/cm^3. Normalmente se mide en muestras tomadas de afloramientos, sondeos o minas. La forma más sencilla es pesar la muestra en aire y en agua y calcular σ. El densímetro, el instrumento más habitual, se basa en este principio y determina la densidad con una precisión de 0,01 g/cm^3

Hmelevskoj, 1997

.

Para obtener datos fiables y representativos hay que medir muchas muestras (hasta 50). A partir de numerosas medidas en muestras de la misma secuencia litológica se construye la curva de variación o el gráfico de σ frente al número de muestras con esa densidad. El máximo de la curva corresponde al valor más probable de densidad de la roca. Existen también métodos gravimétricos y otros métodos geofísicos de estimación de densidad en campo y en sondeos.

La densidad de rocas y menas depende de la composición químico-mineral, es decir, de la densidad de las partículas sólidas, de la porosidad y del fluido de los poros (agua, soluciones, petróleo, gas). La densidad de las rocas volcánicas y metamórficas está determinada principalmente por su composición mineral y aumenta de las rocas ácidas a las básicas y ultrabásicas. La de las rocas sedimentarias depende sobre todo de la porosidad y la saturación de agua, y en menor medida de la composición mineral; depende mucho de la consolidación, la edad y la profundidad de enterramiento (su aumento eleva la densidad). A continuación se dan ejemplos de densidad

Hmelevskoj, 1997

.

- **Roca** — **Densidad (g/cm^3)**
- **Petróleo** — 0,8 -1,0
- **Carbón** — 1,0
- **Agua** — 1,1 – 2
- **Suelo** — 1,13 - 2,0
- **Arena** — 1,4 – 2
- **Arcilla** — 2 - 2,2
- **Arenisca** — 1,8 - 2,8
- **Caliza** — 2,3 - 3,0
- **Sal** — 2,1 - 2,4
- **Granito** — 2,4 - 2,9
- **Gneis** — 2,6 - 2,9
- **Gabro** — 2,8 - 3,1

- **Basalto** — 2,7 - 3,3
- **Peridotita** — 2,8 - 3,4
- **Calcopirita** — 4,1 - 4,3
- **Magnetita, hematites** — 4,9 - 5,2
- **Densidad media de la parte superior de la corteza** — 2,67

SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE ROCAS Y MENAS

La susceptibilidad magnética χ es la principal propiedad magnética de las rocas; caracteriza el grado de magnetización de materiales y rocas.

En el sistema SI es un número adimensional, pero en la práctica se mide en unidades de 10^{-5} SI. Para distintas rocas varía de 0 a 10 unidades. Los minerales y las rocas se dividen por su susceptibilidad en tres grupos: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos. Las rocas diamagnéticas tienen una susceptibilidad muy baja (menos de 10^{-5} SI) y negativa (su magnetización se opone al campo magnetizante). Muchos minerales y rocas, como el cuarzo, la sal gema, el mármol, el petróleo, el hielo, el grafito, el oro, la plata, el plomo o el cobre, son diamagnéticos

Hmelevskoj, 1997

.

Las rocas paramagnéticas tienen susceptibilidad positiva y de valor bajo. La mayoría de los minerales y de las rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas son paramagnéticos.

Los minerales ferromagnéticos (por ejemplo magnetita, titanomagnetita, ilmenita, pirrotina) tienen valores de χ muy altos (hasta varios millones de unidades 10^{-5} SI).

La susceptibilidad de la mayoría de las rocas depende sobre todo de la presencia y el porcentaje de minerales ferromagnéticos.

La tabla siguiente da valores de χ de algunos minerales y rocas. Los minerales ferromagnéticos son fuertemente magnéticos. Entre las rocas volcánicas, las ultrabásicas y básicas tienen la susceptibilidad más alta; las ácidas son magnéticas o débilmente magnéticas. La susceptibilidad de las rocas metamórficas es menor que la de las volcánicas. Las rocas sedimentarias, salvo algunas areniscas y arcillas, son prácticamente no magnéticas.

- **Mineral, roca** — $\chi 10^{-5}$ **(unidades SI)**
- **rango** — **media**
- **Cuarzo** — -

  10
- **Calcita** — 7 – 12

  -
- **Yeso** — -

  12
- **Carbón** — -

  25
- **Esfalerita** — -

  750
- **Hematites** — 500 - 50000

6000

- **Pirrotina** — 10^3-10^7

  150000
- **Ilmenita** — $5*10^5$ -$5*10^6$

  10^6
- **Magnetita** — 10^6-10^7

  $5*10^6$
- **Caliza** — 25 - 3500

  300
- **Arenisca** — 0 - 20000

  400
- **Gneis** — 100 - 20000

  -
- **Granito** — 0 - 40000

  2000
- **Diabasa** — 1000 - 15000

  5000
- **Gabro** — 1000 - 100000

  60000
- **Basalto** — 30 - 150000

  60000
- **Peridotita** — 90000 - 200000

  150000
- **Sedimentarias (media)** — 0 - 5000

  1000
- **Metamórficas (media)** — 0 - 75000

  50000
- **Volcánicas ácidas (media)** — 50 - 80000

  8000
- **Volcánicas básicas (media)** — 60 - 120000

  30000

Para convertir χ al sistema CGS, usado en el programa, la susceptibilidad en unidades SI se divide por 4π.

La susceptibilidad de las rocas para- y ferromagnéticas disminuye al aumentar la temperatura y casi desaparece a la temperatura de Curie, que para distintos minerales va de +400 a +700 °C. La profundidad máxima de investigación magnética es de unos 25–50

km. A mayor profundidad la temperatura supera el punto de Curie y todas las rocas se vuelven prácticamente no magnéticas.

Las estructuras geológicas y las menas buscadas, con susceptibilidad κ, están rodeadas de rocas con susceptibilidad χ. Por eso, igual que en gravimetría, interesa la susceptibilidad excedente o efectiva $\Delta\chi$, que puede ser positiva o negativa. Las anomalías magnéticas aparecen cuando $\Delta\chi$ es distinta de cero

Hmelevskoj, 1997

.

DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DEL PROGRAMA

Barra de herramientas de la ventana principal

La barra de herramientas da acceso rápido a las funciones más usadas. Contiene los botones siguientes (de izquierda a derecha):

-  — Abrir archivo de datos.
-  — Diálogo de guardado de datos.
-  — Modo de modelo.
-  — Modo de modelado por capas arbitrarias.
-  — Modo de modelado poligonal.
-  — Diálogo de parámetros de inversión.
-  — Editor de datos.
-  — Trabajar con medidas magnéticas.
-  — Trabajar con medidas gravimétricas.
-  — Resolver el problema directo.
-  — Iniciar (un clic) o cancelar (segundo clic) la inversión.
-  — Deconvolución de Euler.
-  — Transformación rápida del campo y construcción de una pseudosección en profundidad.
-  — Deshacer el último cambio del modelo.
-  — Selección de perfil.

Funciones del menú principal

A continuación se enumeran los elementos del menú y sus funciones:

- **File/Create synthetic survey** — Diálogo de creación de un levantamiento sintético (véase «Modelado»).
- **File/Open file** — Abrir archivo de datos.
- **File/ Add to project** — Añadir datos al proyecto abierto.
- **File/Save file** — Diálogo de guardado.
- **File/Print Preview** — Diálogo de impresión de la ventana principal.
- **File/Edit file** — Abrir el archivo de datos actual en el Bloc de notas.

- **File/Recent** — Archivos usados recientemente.
- **File/ Русский** — Interfaz en ruso.
- **File/English** — Interfaz en inglés.
- **File/Reg file** — Crear archivo de registro.
- **File/Exit** — Salir del programa.
- **Options/Mesh constructor** — Diálogo de configuración del modelo inicial.
- **Options/Project information** — Información del proyecto (ejecutor, cliente, nombre del área, equipo, etc.).
- **Options/Line's observation settings** — Ventana de parámetros de medida (véase «Primeros pasos con el programa»).
- **Options/Set survey lines** — Ventana de configuración de perfiles (véase «Trabajo con datos de área y visualización 3D»).
- **Options/Program setup** — Diálogo de parámetros de inversión.
- **Options/Data editor** — Editor de datos.
- **Options/ Modules/Downward continuation** — Prolongación del campo hacia abajo:

  Standard – prolongación del campo original;

  Normed – prolongación de la derivada vertical.
- **Options/Modules/3D sections plot** — Visor 3D del modelo. Funciona con datos de área.
- **Options/Modules/Graphics map** — Plano de gráficas.
- **Options/Modules/Geological editor** — Editor de secciones geológicas.
- **Options/Inversion/Set boundaries** — Diálogo de fronteras geológicas.
- **Options/Inversion/Resolution** — Al aumentar la sensibilidad crece la influencia de las celdas profundas del modelo.
- **Options/Inversion/reference model** — Nivel respecto al cual se determina la suavidad del modelo calculado. Valores:

  Median — a partir de la media de los datos;

  "0" — a partir del nivel cero;

  Start model — a partir del modelo inicial (útil cuando hay información a priori);

  Previous — a partir de la iteración anterior.
- **Options/Inversion/Focused filter** — Parámetros del filtro de focalización:

  Own — filtro propio, resultado de la inversión;

  Load — cargar un modelo de otro programa de inversión; las celdas de bajo contraste se suavizan;

  Other — se usa en la inversión conjunta gravimétrica y magnética: filtro calculado a partir de la inversión del otro método.
- **Options/Model/Block section** — Modelo por bloques.
- **Options/Model/Smooth section** — Modelo con paleta de interpolación suavizada.
- **Options/Model/Contour section** — Modelo en isolíneas.

- **Options/Model/Infinite borders** — Si está activado, el programa prolonga automáticamente los objetos fuera del área de vista; si no, su tamaño se limita al área de vista.
- **Options/Model/X=Z scale** — Igualar las escalas vertical y horizontal.
- **Options/Model/Extend bottom** — Con relieve, prolonga las celdas inferiores del modelo hasta la profundidad máxima.
- **Options/Model/Show modeler tools** — Barra de herramientas de modelado (véase «Modelado»).
- **Options/Topography/Topo coefficient 1** — Factor de atenuación del relieve con la profundidad (0–5):

  0 — el relieve de cada capa es igual al de la anterior;

  1 — el relieve se aplana con la profundidad, la última capa es plana.
- **Options/Topography/Import topography** — Importar topografía.
- **Options/Topography/Remove topography** — Eliminar la topografía (todos los datos tendrán altura cero).
- **Options/Topography/Restore topography** — Restaurar la topografía cargada anteriormente.
- **Options/Topography/Edit topography** — Editar los datos de topografía.
- **Options/Topography/Denoise topography** — Eliminar picos aislados de la topografía.
- **Options/Topography/Smooth topography** — Suavizar la topografía.
- **Options/Topography/Import 3D topography** — Importar un archivo de topografía para todas las secciones del proyecto (con coordenadas y altura de los puntos de observación).
- **Options/Topography/Spline intermediate** — Interpolación por spline de los puntos intermedios.
- **Options/Topography/Absolute coordinates** — Modo de alturas absolutas (si está desactivado, la profundidad se cuenta desde el punto más alto del modelo).
- **Options/Topography/Extended nodes** — Añadir celdas a izquierda y derecha.
- **Options/Boreholes/Load borehole data** — Abrir y mostrar un archivo de diagrafías y columnas estratigráficas.
- **Options/Boreholes/ Create/Edit borehole data** — Crear o editar datos de sondeos.
- **Options/Boreholes/ Remove borehole data** — Eliminar datos de sondeos.
- **Options/Boreholes/Set column’s width** — Ancho de las columnas de sondeos.
- **Options/Import/Export/Import data text/excel** — Importar datos en formato de texto o Microsoft Excel.
- **Options/Import/Export /Import model/graph** — Importar datos o un modelo arbitrarios.
- **Options/Import/Export /Remove data** — Eliminar del proyecto la gráfica de datos importados.

- **Options/Import/Export /Save selection** — Guardar las celdas seleccionadas en el editor de modelo.
- **Options/Import/Export /Load selection** — Abrir un archivo de celdas seleccionadas y pegarlo en la posición del cursor.
- **Options/Import/Export /Extract 1d log** — Guardar un perfil vertical de susceptibilidad o densidad en la coordenada horizontal indicada.
- **Options/Import/Export /Load 1d log** — Pegar en el modelo un perfil vertical de susceptibilidad o densidad (o de sus límites) en la coordenada indicada.
- **Options/Import/Export /Save MOD2D file** — Guardar un archivo de modelo 2D para otros programas Zond.
- **Options/Import/Export /Load MOD2D file** — Cargar un archivo de modelo 2D obtenido, por ejemplo, en otros programas Zond.
- **Options/Import/Export /Save MOD1D file** — Guardar un archivo de modelo 1D para otros programas Zond.
- **Options/Import/Export /Load MOD1D file** — Cargar un archivo de modelo 1D.
- **Options/Import/Export/Load background image** — Importar un archivo *.sec o una imagen arbitraria como fondo.
- **Options/Import/Export/Remove background image** — Eliminar la imagen de fondo.
- **Options/Import/Export/Show background image** — Mostrar la imagen de fondo.
- **Options/Import/Export/Resize background image** — Cambiar el tamaño de la imagen de fondo.
- **Options/Import/Export/Export to Excel** — Guardar el modelo en formato Excel.
- **Options/Import/Export/Export model to DXF** — Guardar el modelo en formato AutoCAD (*.DXF).
- **Options/Import/Export/Draw model in Surfer** — Exportar el modelo a Surfer.
- **Buffer** — Guardar el modelo actual en el búfer para compararlo con modelos nuevos.
- **Operations/Line operations** — Operaciones sobre un perfil.
- **Operations/Subtract total field** — Restar el campo total.
- **Operations/Subtract median value** — Restar la mediana.
- **Operations/Subtract user value** — Restar un valor dado por el usuario.
- **Operations/ Subtract med in window** — Restar el valor medio en una ventana móvil (útil en perfiles regionales).
- **Operations/ Subtract field from height** — Reducir el campo medido a distintas alturas a un nivel común.
- **Operations/Reduce to pole** — Reducción al polo. Se usa en magnetometría y sitúa la anomalía sobre el centro del objeto.
- **Operations/Reduce to plane** — Reducción a un único nivel de altura. Útil en datos aéreos; evita falsas anomalías debidas al relieve y a los cambios de altura.
- **Operations/Denoise data** — Eliminar datos ruidosos (picos aislados).

- **Operations/Return to original** — Volver a los datos originales, anulando todas las transformaciones.
- **Operations/Areal operations** — Operaciones sobre datos de área.
- **Help/About** — Acerca del programa.
- **Help/Context** — Abrir el manual.
- **Help/Check for updates** — Buscar actualizaciones.
- **Help/ERROR!!! Set default values** — Restablecer los valores por defecto y reiniciar el programa.

^ El archivo de datos importados debe tener dos columnas: coordenada de medida y valor medido. El eje vertical de los datos importados es el eje derecho del plano de gráficas del perfil. El modelo importado debe estar guardado en un archivo de proyecto Zond 2D. Al cargarlo aparece una ventana nueva con el modelo; al mover el cursor en la ventana de modelado, la posición de la celda activa se muestra en el modelo importado.

Elementos adicionales del menú

Los elementos siguientes no estaban descritos en la edición anterior del manual. Se enumeran en el orden en que aparecen en el programa.

- **File/Reg file**, **File/Register** — trabajo con el archivo de registro y registro de la copia del programa.
- **Options/Line's observation settings** — abre el diálogo **Observation settings** del perfil actual (parámetros del campo normal, alturas del sensor, tipo de datos, desplazamiento DC). Véase «Primeros pasos con el programa».
- **Options/Data editor** — editor tabular de las observaciones del perfil actual. Permite cambiar valores del campo, coordenadas, alturas y pesos de puntos individuales.
- **Options/Modules/Elements toolbox** — panel de elementos gráficos (etiquetas, flechas, marcadores) que se colocan sobre la ventana activa: sección del modelo, sección en isolíneas o modelo poligonal. Los elementos se guardan con el proyecto.
- **Options/Inversion/View iterations** — ventana con los modelos de cada iteración de la inversión. Permite volver a cualquier modelo intermedio.
- **Options/Inversion/Display process** — si está activado, el modelo y las gráficas se redibujan tras cada valor de prueba del parámetro de suavizado. Es ilustrativo pero ralentiza la inversión; en modelos grandes conviene desactivarlo.
- **Options/Inversion/Optimization/Lcurve** — elección del parámetro de suavizado por la curva L (punto de máxima curvatura de la curva «norma del modelo — desajuste de datos»). Si está desactivado, se toma el valor de mínimo desajuste. Véase «Algoritmos de inversión».
- **Options/Inversion/Optimization/Layered term** — diálogo de correlación horizontal: término adicional que atrae los parámetros hacia una distribución en capas horizontales. Se fijan **Use**, la intensidad del acoplamiento, el número de capas vecinas y el tamaño de la ventana de promediado.
- **Options/Inversion/Smoothness/Focused filter** — origen del filtro de focalización: propio (**Own**), de otro método (**Other**) o cargado de archivo (**Load**).
- **Options/Inversion/Smoothness/"0"** — el modelo de referencia es cero (sin fuentes).

- **Options/Inversion/Smoothness/Type/L0, L1, L2** — norma del estabilizador. **L2** — suavizado clásico (cuadrado del gradiente del modelo), **L1** — suavizado del módulo del gradiente (conserva fronteras nítidas), **L0** — soporte mínimo (cuerpos compactos).
- **Options/Inversion/Smoothness/Robust** — norma robusta del desajuste: los puntos con valores atípicos grandes reciben menos peso en la iteración siguiente.
- **Options/Inversion/Smoothness/Stabilizer** — valor del estabilizador (0,01–1); con él se añade un término diagonal al operador de suavizado (véase «Algoritmos de inversión»).
- **Options/Inversion/Smoothness/Adaptive** — suavizado adaptativo: los pesos del operador se recalculan en cada iteración según el modelo actual. Solo actúa en los tipos de inversión con suavizado y se desactiva para IGI.
- **Options/Inversion/Smoothness/IGI forced** — aplicación forzada del modelo interpretativo IGI (agrupamiento sobre varios métodos) en cada iteración.
- **Options/Inversion/Resolution/Native, x1, x2, x4, x8** — resolución de la parametrización. Native — un parámetro por celda; x1…x8 — las celdas se agrupan en bloques, lo que reduce el número de incógnitas y acelera la inversión.
- **Options/Inversion/Joint inversion** — inversión conjunta de datos gravimétricos y magnéticos (y de SEV, TEM, MT, MASW y sísmica si están cargados). **Magnetic data**/**Gravity data** está disponible si el perfil tiene ambos campos.
- **Options/Inversion/Joint inversion/Criteria** — criterio de acoplamiento estructural: **Common correlation** (correlación común), **Global-local correlation** (combinación de correlación global y local), **Variation information** (información mutua de las distribuciones), **Gramian** (minimización del determinante de Gram de los gradientes, análogo al gradiente cruzado).
- **Options/Inversion/Joint inversion/From initial model** — el segundo modelo se toma del modelo inicial y no se recalcula.
- **Options/Inversion/Joint inversion/Start resistivity** — resistividad inicial para los datos eléctricos (30 Ohm·m por defecto).
- **Options/Inversion/Joint inversion/Draw isolines** — mostrar isolíneas del segundo modelo sobre la sección.
- **Options/Inversion/Joint inversion/MASW data**, **IGI settings**, **Clusterization** — datos MASW, ajustes de IGI y modo de agrupamiento (con el agrupamiento activado se desactivan los demás tipos de inversión conjunta).
- **Options/Model/Synchronized zoom** — zoom sincronizado de gráficas y sección.
- **Options/Model/Set 1D model** — modelo en capas horizontales mediante el constructor de capas (límites −10…10 g/cm³ para la densidad y −10000…10000 para la susceptibilidad).
- **Options/Topography/Set by mouse** — dibujar el relieve con el ratón en la sección.
- **Options/Topography/WWW topography** — descargar el relieve de internet según las coordenadas geográficas de los puntos.
- **Options/Topography/Absolute coordinates** — eje vertical en cotas absolutas.
- **Options/Boreholes/Set column’s width** — ancho de las columnas de sondeos en la sección.
- **Options/Import/Export/Save MOD1D/2D file**, **Load MOD1D/2D file** — intercambio de modelos con otros programas Zond.

- **Options/Extra/GravityMagnetic sections** — sección conjunta de densidad y magnetización (si el perfil tiene ambos campos).
- **Options/Extra/Blocky contours** — representación por bloques (sin interpolación) del modelo de celdas.
- **Options/Extra/Gradients multiplier** — multiplicador con el que se dibujan gradientes y derivadas (1–10000).
- **Options/Extra/Model histogram** — histograma de los parámetros del modelo.
- **Options/Extra/Set user isolines** — niveles de isolíneas definidos a mano.
- **Options/TDEM data/TDEM cone**, **VES data/VES cone**, **MT data/MT cone**, **MASW data/MASW cone** — mostrar en la sección el «cono» de sensibilidad de los sondeos eléctricos y sísmicos.
- **Options/MASW data/Load MASW data**, **Show MASW plot**, **Invert MASW data**, **Set weight of MASW**, **PRRho** — cargar, mostrar, incluir en la inversión y ponderar los datos MASW; **PRRho** fija el coeficiente de Poisson (0,01–0,45) y la densidad (0,3–4 g/cm³) para convertir velocidades.
- **Modeling/Set default size**, **Copy polygons**, **Paste polygons**, **Export to CAD**, **Auto recalc** — tamaño por defecto de polígonos nuevos, copiar y pegar polígonos, exportar a DXF y recalcular automáticamente el problema directo tras cada cambio de polígono.
- **Layered/Layers2pols** — convertir el modelo de capas arbitrarias en poligonal (cada capa se convierte en un polígono con su densidad y susceptibilidad medias).
- **Buffer/Model 1…5** — guardar el modelo en una de las cinco celdas del búfer.
- **Operations/…** — operaciones sobre datos de perfil y de área, descritas en «Procesado y transformaciones del campo».
- **Help/Map type (Sat1, Sat2, Sat3, Streets, Topo)** — tipo de mapa de fondo para los mapas y la ventana Graphics map.
- **Help/License info** — información de la licencia.

El menú contextual de las gráficas contiene **Remove point** (eliminar la medida), **Bad point** (peso 0: el punto queda en el archivo pero no participa en la inversión) y **Good point** (restaurar el peso). El menú contextual del modelo poligonal contiene los modos de inversión de polígonos (**Par inversion**, **Z nodes inversion**, **X nodes inversion**, **ZX nodes inversion**, **PZ inversion**, **PZX inversion**), descritos en «Inversión del modelo poligonal». El menú contextual del botón de transformación rápida contiene **Probability inversion**, **Compact probability inversion**, **Downwarding** y **Windowed** (cálculo en ventana móvil).

Teclas rápidas

- **Teclas de cursor / cursor en el editor de modelo** — Cambiar la celda activa del modelo.
- **Delete / cursor en el editor de modelo** — Borrar la celda activa.
- **Insert / cursor en el editor de modelo** — Insertar el valor actual en la celda activa.
- **F / cursor en el editor de modelo** — Fijar el valor de la celda activa.
- **X / cursor en el editor de modelo** — Herramienta «varita mágica» para seleccionar un área.
- **V / cursor en el editor de modelo** — Eliminar la selección.

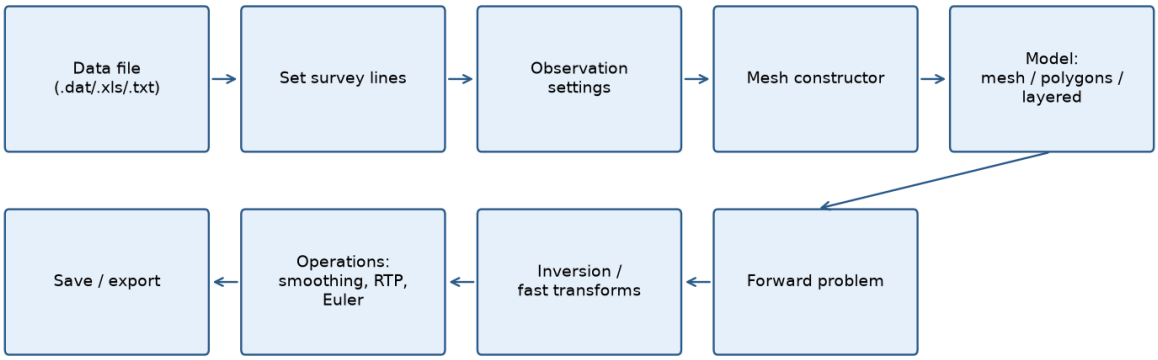
- **Arriba/abajo / cursor en la escala de colores** — Cambiar el valor actual.
- **Espacio** — Calcular el problema directo.
- **Enter** — Pasar al modo Euler u Objetos y volver.

Panel de estado

El panel de estado se divide en varias secciones con distinta información:

- coordenadas del cursor y de la celda activa;
- parámetros de la celda activa;
- información adicional.

ESQUEMA GENERAL DE TRABAJO



Secuencia de trabajo: del archivo de datos al guardado de resultados

Secuencia típica: abrir o importar el archivo de datos, elegir los perfiles (**Set survey lines**), fijar los parámetros del campo normal y las alturas del sensor (**Observation settings**), construir la malla (**Mesh constructor**), elegir el tipo de modelo (de celdas, poligonal, de capas arbitrarias), resolver el problema directo y la inversión. El preprocesado (eliminación del fondo, suavizado, reducción al polo) suele hacerse antes de la inversión; la deconvolución de Euler sirve como estimación independiente de la posición de las fuentes.

GUÍA DE TRABAJO

Preparación y apertura del archivo de datos

Para trabajar con «ZONDGM2D» se necesita un archivo de datos con un formato específico que contenga las posiciones de medida y los valores medidos.

Normalmente un archivo contiene los datos de un perfil. Los archivos de texto en formato «ZONDGM2D» tienen la extensión «*.GM». Véase la sección **Formato del archivo de datos**.

Para que el programa funcione correctamente, el archivo no debe contener:

- separadores no convencionales (use solo TAB y ESPACIO);
- valores no válidos de los datos medidos;
- es deseable no tener más de 5000 valores observados en un solo archivo.

Se pueden importar archivos de texto o de Excel. Para ello, en el menú principal elija **Options/Import/Export** e **Import data text/excel**. Tras elegir el archivo aparece un diálogo (Fig. 1) en el que se indica el tipo de datos y las unidades de cada columna. Así, el archivo importado puede tener las columnas en cualquier orden.

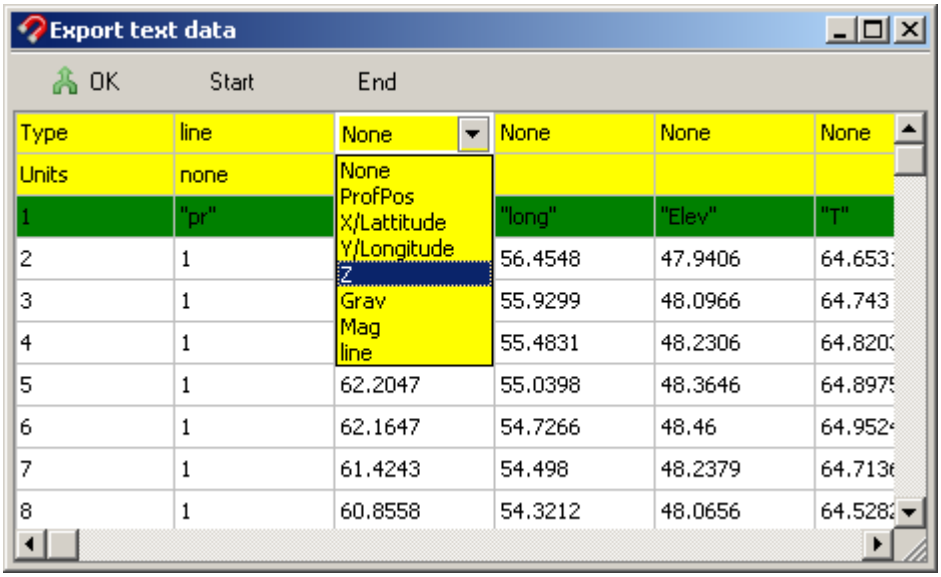


Fig. 1 Diálogo **Import from text/excel**.

Las dos primeras filas, en amarillo, indican el tipo de datos de la columna (**Type**) y las unidades (**Units**). El tipo de datos puede ser:

ProfPos — número del punto de medida

X/Latitude — coordenada horizontal/latitud

Y/Longitude — coordenada vertical/longitud

Z — altura

Grav — valores medidos del campo gravimétrico

Mag — valores medidos del campo magnético

line — número de perfil

La primera fila del archivo abierto se muestra en la tercera fila, en verde.

Los campos **Start** y **End** del diálogo definen la primera y la última fila importadas. Tras fijar todos los parámetros, pulse **OK**.

También se pueden añadir datos al proyecto, lo que es útil con datos de área.

Importación y exportación de datos

La pestaña **Options/Import/Export** del menú principal contiene opciones para importar datos de distintos tipos (datos brutos, datos de otros métodos como imagen de fondo, etc.) y exportarlos a otros programas. Permiten comparar datos de distintos métodos, cargar datos gravimétricos y magnéticos de cualquier formato y representar rápidamente resultados obtenidos en otros programas.

Se pueden importar archivos de texto o de Excel con **Import data from text/excel**. Tras elegir el archivo aparece un diálogo (Fig. 2) en el que se indica el tipo de datos y las unidades de cada columna; el archivo puede tener las columnas en cualquier orden.

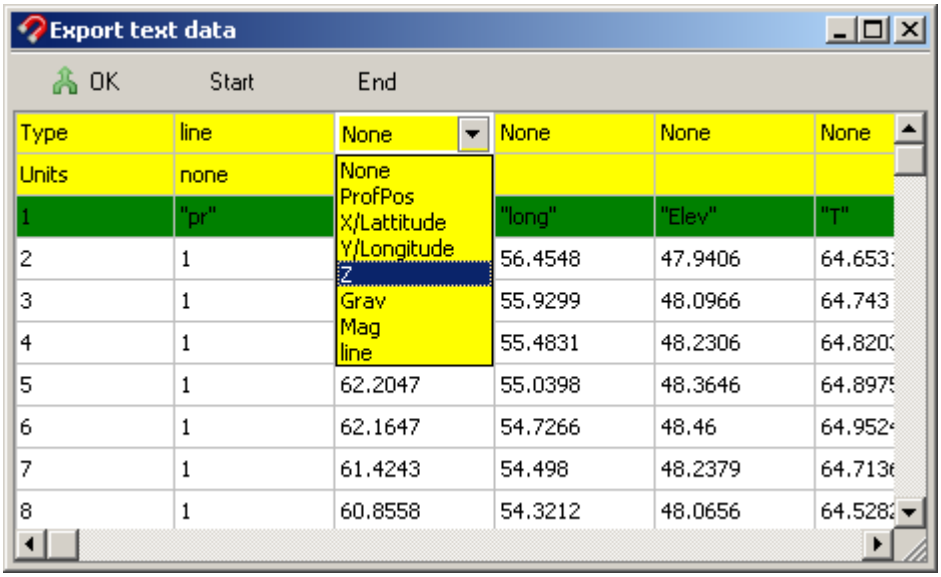


Fig. 2 Diálogo **Import from text/excel**.

Las dos primeras filas, en amarillo, indican el tipo de datos (**Type**) y las unidades (**Units**). El tipo de datos puede ser:

ProfPos — número del punto de medida

X/Latitude — coordenada horizontal/latitud

Y/Longitude — coordenada vertical/longitud

Z — altura

Grav — valores medidos del campo gravimétrico

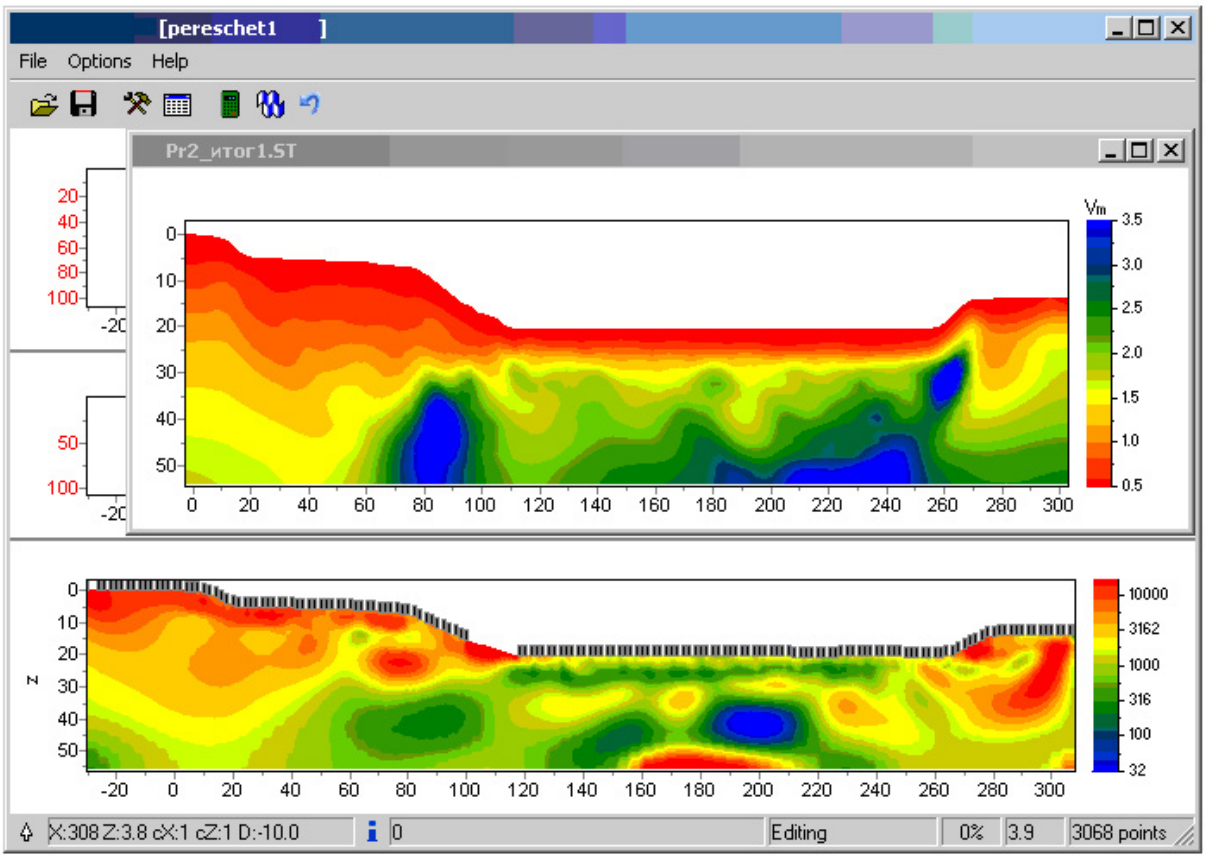
Mag — valores medidos del campo magnético

line — número de perfil

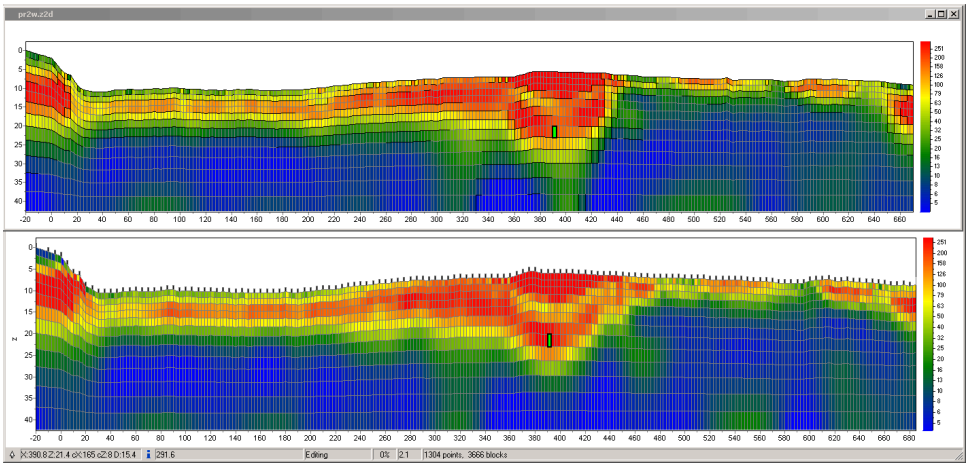
La primera fila del archivo se muestra en la tercera fila, en verde.

Los campos **Start** y **End** definen la primera y la última fila importadas. Tras fijar los parámetros, pulse **OK**.

Import/Export/Import model/graph permite cargar en ventanas aparte un modelo de proyectos de programas ZOND (*.mod). También permite mostrar en el área de datos la gráfica de cualquier parámetro; los datos deben estar en un archivo *.dat cuya primera columna corresponde al eje horizontal y la segunda al vertical. Es útil para comparar resultados en perfiles adyacentes o en la interpretación conjunta de varios métodos.



Al mover el cursor en el editor de modelo, el cursor se muestra en todas las demás secciones según el tamaño de la celda actual.



Con **Save/Load selection** se puede guardar o cargar un fragmento del modelo. Para guardarlo, active la representación por bloques (Blocks section), seleccione el fragmento con la herramienta Selection y pulse Save selection.

Para cargar un fragmento, seleccione un área pequeña del modelo actual: su esquina superior izquierda será el punto de inserción. Llame a **Load selection** y elija el archivo. Si no hay selección, el fragmento se pega desde la esquina superior izquierda del modelo.

Para guardar o cargar un perfil vertical de parámetros en una coordenada horizontal use **Extract 1d log/Load 1d log**. Al guardar se indica la coordenada X; al cargar, el rango del eje X. Sirve, por ejemplo, para incorporar diagrafías o revisar intersecciones de perfiles.

Si hay información a priori, la opción **Import/export/Background image** permite usarla como imagen de fondo del editor de modelo: por ejemplo, una sección geológica, eléctrica o sísmica, o la sección de un perfil adyacente.

La imagen puede cargarse a escala desde un archivo *.sec.

El archivo *.sec tiene la estructura siguiente:

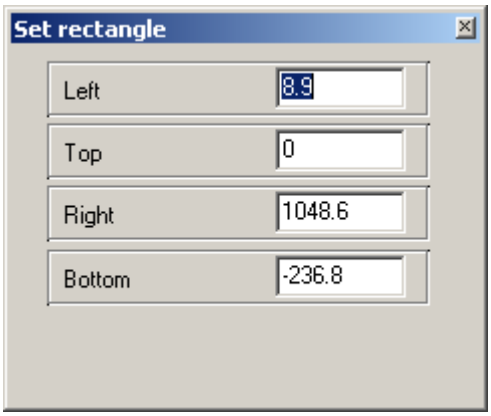
1.ª línea — nombre del archivo de imagen;

2.ª línea — cuatro coordenadas X1 Y1 X2 Y2 de las esquinas superior izquierda e inferior derecha de la imagen, separadas por espacios.

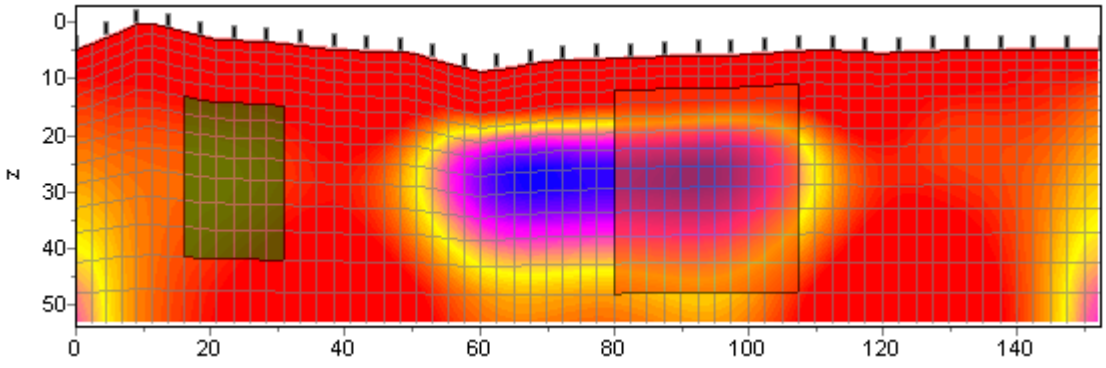
sect.emf

0 0 152.4 53.3

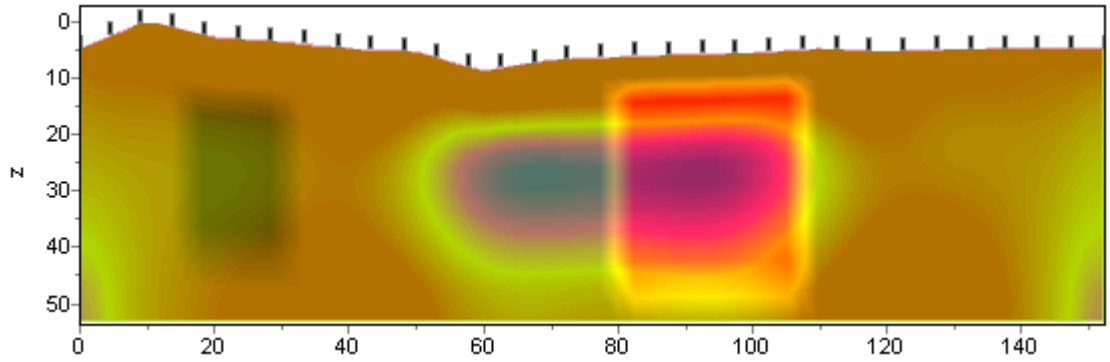
También se puede cargar cualquier archivo de imagen. En ese caso aparece el diálogo **Set rectangle**, en el que se fijan los límites de la imagen importada.



En el modo Blocks section se muestran las celdas con valores distintos del medio de fondo. Así se pueden modelar objetos anómalos sobre una imagen de fondo.

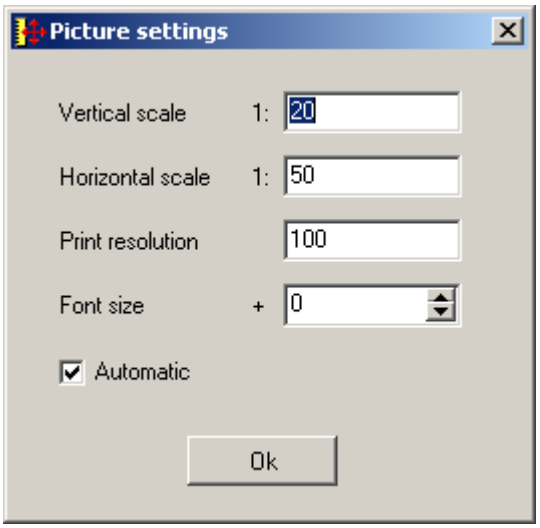


En el modo Smooth section los colores de la imagen de fondo y del modelo se mezclan y se ven a la vez los rasgos de ambas secciones.



Para quitar la imagen de fondo elija **Remove Background**.

El diálogo **Output settings** permite fijar la escala vertical y la horizontal (en metros por centímetro), la resolución de la imagen de salida (en DPI) y el tamaño de letra.



Estos ajustes se aplican al modelo guardado en BMP si la opción Automatic está activada. Si no, se guarda la misma imagen que se ve en pantalla.

Export to Excel guarda los parámetros del modelo actual en un archivo de Microsoft Excel. Los datos se organizan por filas: las dos primeras son distancia y altura en metros, las demás contienen los parámetros de las celdas.

Export model to DXF exporta el modelo a un formato compatible con AutoCAD.

Guardado de los resultados de la interpretación

El resultado de la interpretación de un perfil se guarda en el formato «ZONDGM2D» (extensión *.GMP). El archivo contiene los datos de campo, los pesos relativos de las medidas, el modelo actual y los parámetros del campo magnético normal. Se usa para cargarlo más tarde y crear el modelo del medio.

Para guardar el resultado pulse el botón de la barra de herramientas o el elemento de menú correspondiente. En el diálogo se puede elegir también el formato para guardar los campos calculados del modelo actual y las imágenes (Model, WorkSheet) en *.BMP.

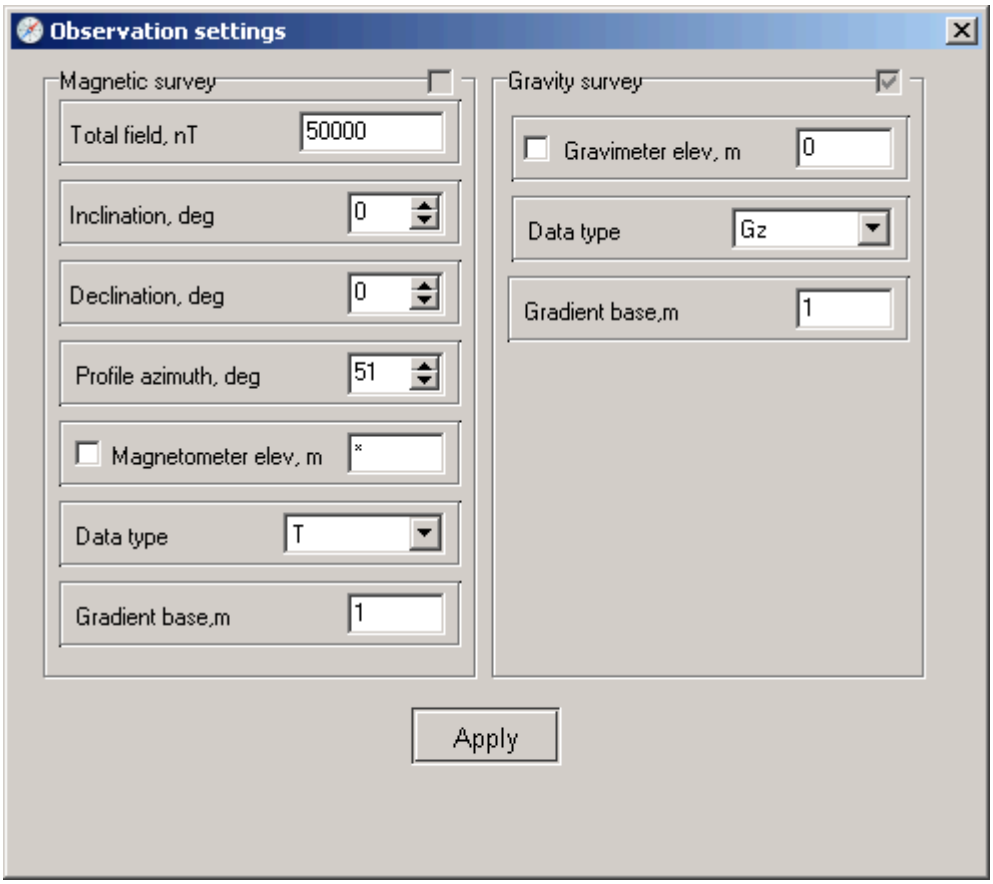
- **Zond project data** — Guardar los valores medidos y el modelo actual.
- **Zond project with calculated data** — Guardar los valores calculados y el modelo actual.

- **Worksheet** — Guardar las tres partes gráficas de la ventana en BMP.
- **Model** — Guardar la parte gráfica inferior de la ventana en BMP.
- **Grid file** — Guardar el modelo actual como archivo grid.
- **Section file** — Guardar el modelo actual en formato *.sec.
- **Save data as text** — Guardar los datos medidos, los calculados y la información adicional en formato de texto.

La casilla **zipped** del diálogo de guardado escribe el proyecto comprimido (archivo *.zgmp); está disponible para los formatos de proyecto.

Primeros pasos con el programa

Una vez creado el archivo de datos «*.GM», cárguelo con el botón  o con el elemento de menú correspondiente. Si la carga es correcta, aparecen la ventana de parámetros de medida y el diálogo de configuración del modelo inicial, en los que se fijan los parámetros del levantamiento. Este diálogo también está en el menú Options. La ventana de parámetros de medida se divide en dos partes, **Magnetic survey** y **Gravity survey**, con los ajustes de los campos magnético y gravimétrico.



Parte **Magnetic survey**:

Total field, nT — módulo del vector del campo magnético normal (T0), en nT.

Inclination, deg — inclinación del campo normal, en grados (I0). Se cuenta hacia abajo desde la horizontal.

Declination, deg — declinación del campo normal, en grados (D0). Se cuenta en sentido horario desde el norte.

Profile azimuth, deg — azimut del perfil, en grados, contado en sentido horario desde el norte. **Magnetometer elev, m** — altura del sensor magnético sobre el relieve, en metros.

Data type — tipo de dato medido: T — campo magnético, GrZ — gradiente del campo magnético.

Gradient base, m — altura del sensor sobre la superficie terrestre.

Parte **Gravity survey**:

Gravimeter elev, m — altura de las observaciones gravimétricas sobre el relieve, en metros.

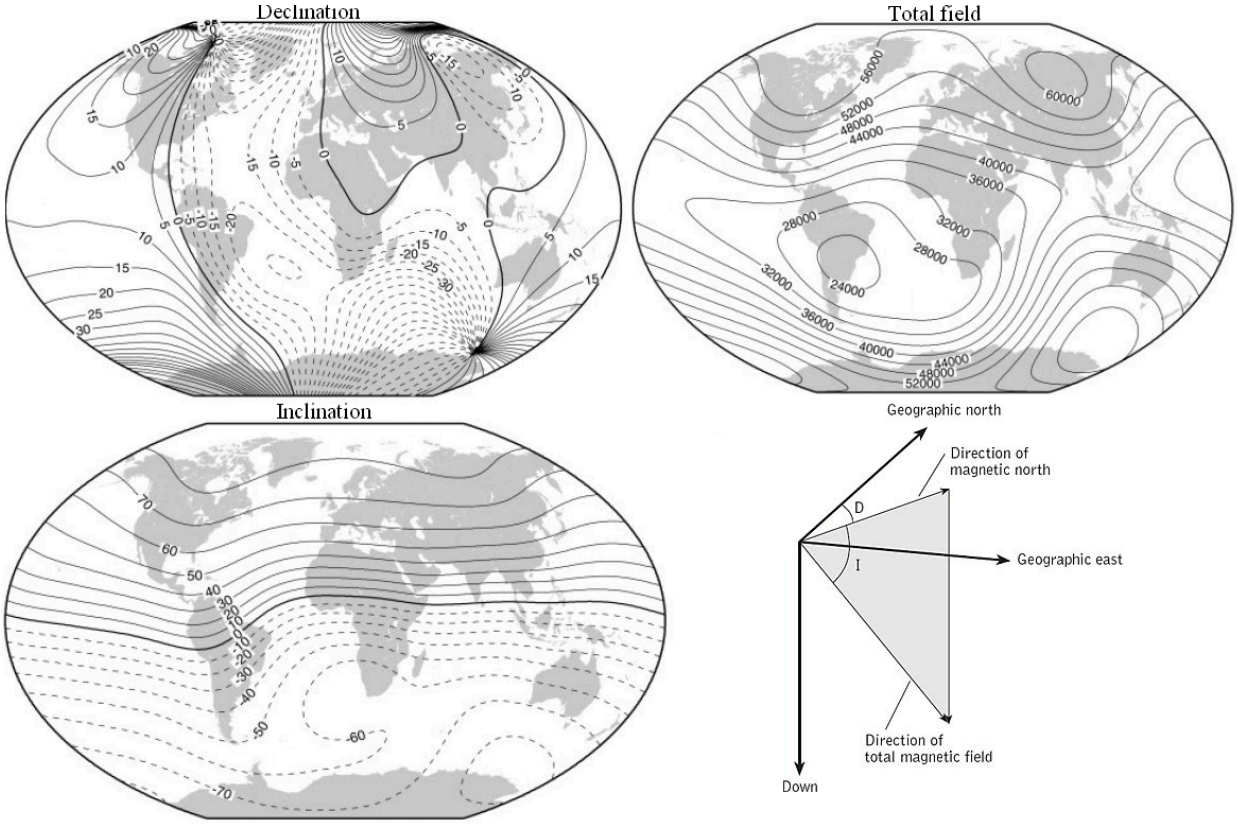
Data type — tipo de dato medido: Gz — componente vertical de la gravedad, Grz — gradiente de Gz.

Gradient base, m — altura del sensor sobre la superficie terrestre.

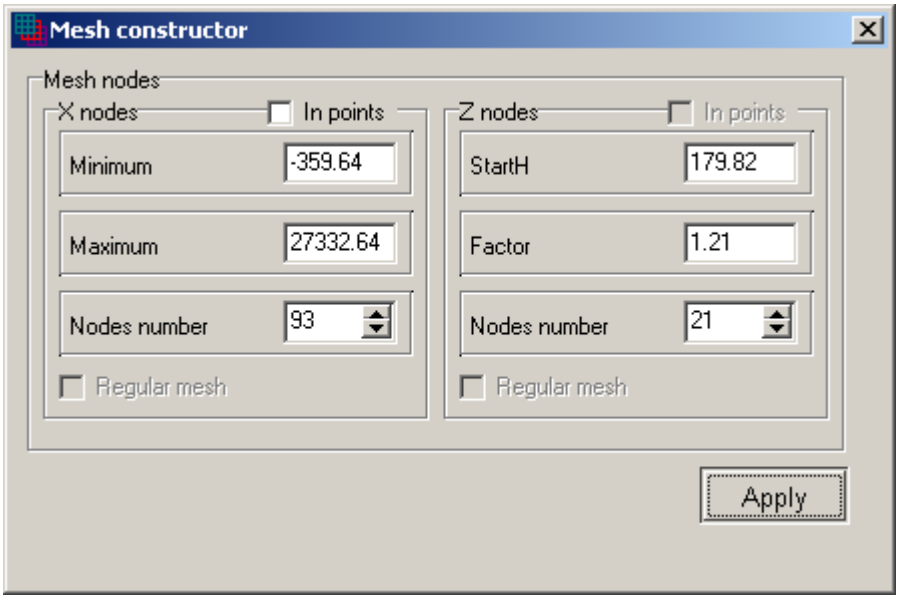
El campo magnético anómalo y los cosenos directores del campo normal (Cx, Cz) se calculan con las fórmulas:

$$\Delta T \approx H_x C_x + H_z C_z,$$
$$C_x = \cos I_0 \cos(A - D_0) \quad \text{and} \quad C_z = \sin I_0$$

A continuación se muestran mapas de isolíneas de declinación, inclinación y campo total para el año 2005. Los valores actuales para una latitud y longitud dadas pueden obtenerse en sitios especializados o con programas SIG.



El diálogo de configuración del modelo inicial **Mesh constructor** contiene las opciones siguientes.



El área **X nodes** contiene los parámetros de la malla horizontal del modelo.

Minimum — coordenada mínima del área de modelado.

Maximum — coordenada máxima del área de modelado.

Nodes number — si la opción **In points** está desactivada, fija el número de nodos equidistantes de la malla horizontal; si no, los nodos se sitúan en los puntos de medida.

Regular mesh — división uniforme de la malla entre puntos de medida (con **In points** activada).

El área **Z nodes** contiene los parámetros de la malla vertical (activa para medidas en sondeos).

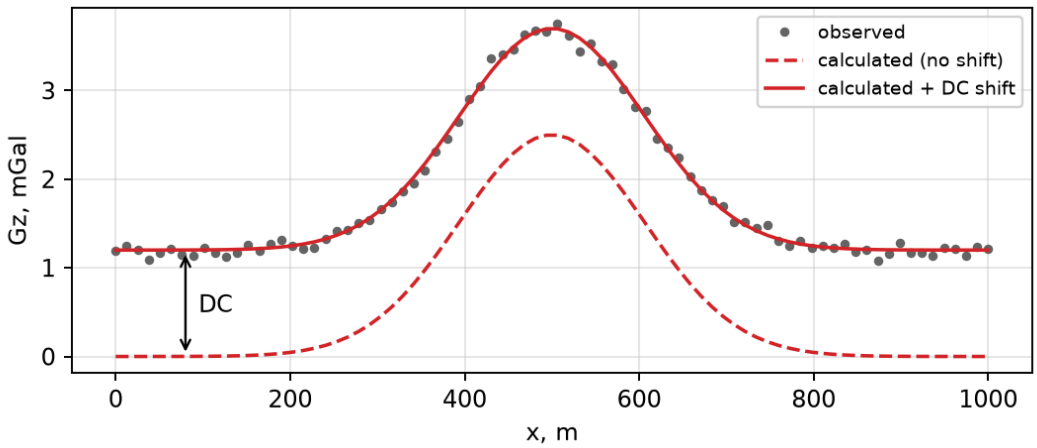
StartH — espesor de la primera capa. Debe corresponder a la resolución requerida.

Factor — razón entre los espesores de capas adyacentes. Suele elegirse entre 1 y 2.

Nodes number — número de capas.

Desplazamiento DC automático

El campo **DC shift, mG** fija una constante que se suma al campo gravimétrico calculado. La anomalía de gravedad está definida salvo una constante, por lo que sin ajustarla el desajuste puede ser grande incluso para un modelo correcto.



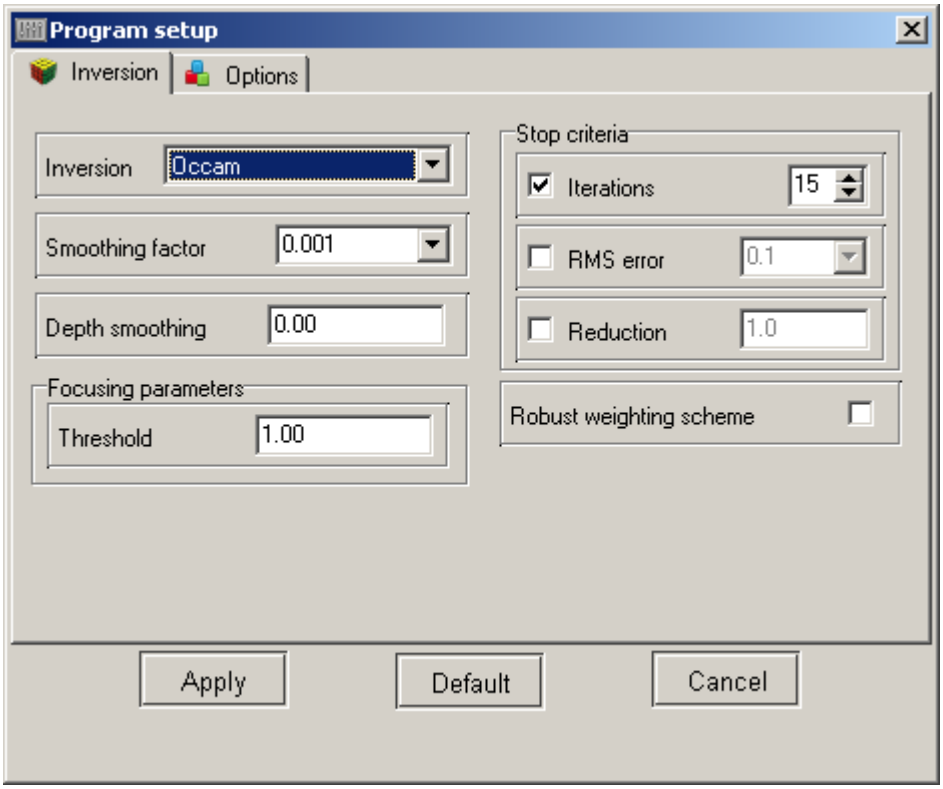
Desplazamiento DC: el campo calculado más una constante se ajusta al observado

Un clic derecho en el campo inicia el ajuste automático. El programa calcula el campo de rocas con la densidad media (según **Min density** y **Max density** de **Program setup**) y toma la mediana de la diferencia «observado − calculado» en las estaciones donde está definida la gravedad (tipo Gz). Desde esta versión la mediana se calcula exactamente en las mismas estaciones que la matriz de cálculo; antes, con tipos de datos mixtos (Gz y gradientes), se usaban estaciones de otro tipo.

En la inversión el desplazamiento DC puede ajustarse junto con el modelo (el parámetro DC se añade a las incógnitas). El ajuste solo se hace si está permitido para el perfil; antes, uno de los modos del segundo bloque de datos usaba un índice no inicializado; esto está corregido.

Diálogo de parámetros del programa

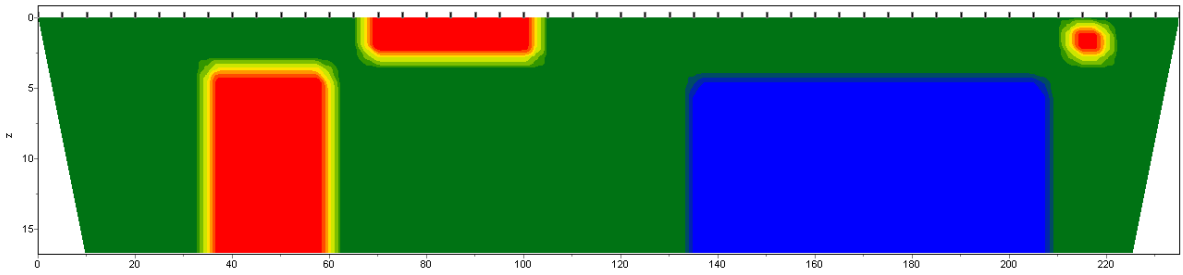
El diálogo está en el menú Options/Program setup o en el botón del panel principal, y sirve para fijar los parámetros de los problemas directo e inverso.



La primera pestaña, «**Inversion**», configura los parámetros de inversión.

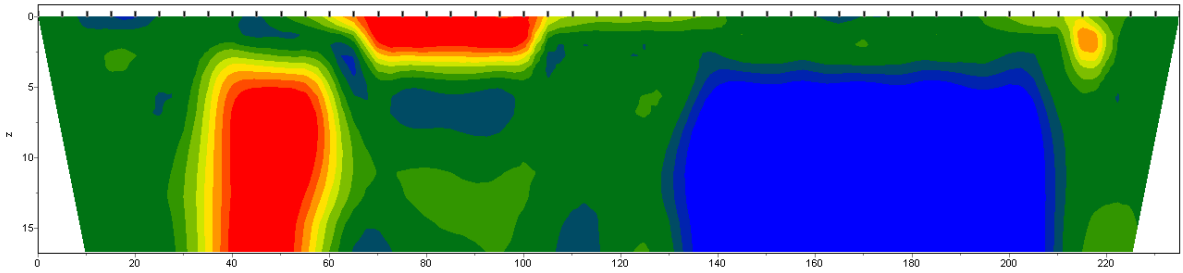
La opción **Inversion** define el algoritmo con el que se resuelve el problema inverso.

Veamos los algoritmos con el ejemplo de un modelo formado por varios bloques.



Para probar los algoritmos se calcula la respuesta teórica del modelo y se añade un 5 % de ruido gaussiano.

Smoothness constrained — inversión por mínimos cuadrados con operador de suavizado. Da una distribución de parámetros suave (sin fronteras nítidas) y estable.



La ecuación matricial de este algoritmo es:

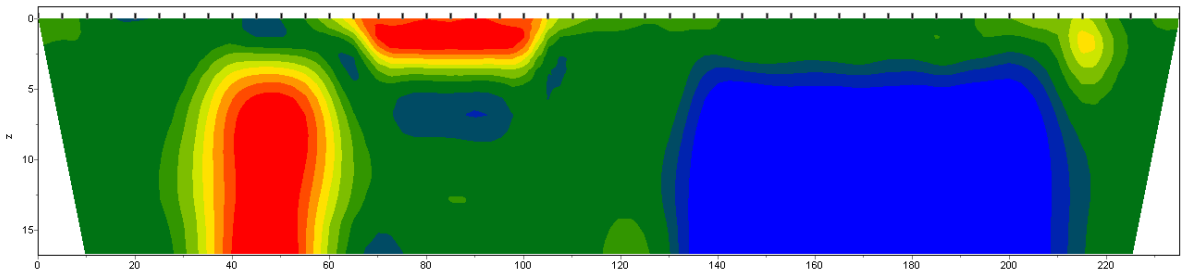
$$(A^T W^T \mathrm{WA} + \mu C^T C)\Delta m = A^T W^T \Delta f$$

Como se ve, el contraste del modelo no se minimiza. El algoritmo permite alcanzar desajustes mínimos. Se recomienda en la mayoría de los casos para la interpretación inicial.

Occam — inversión por mínimos cuadrados con operador de suavizado y minimización adicional del contraste

Constable, 1987

. Da una distribución de parámetros más suave.



La ecuación matricial es:

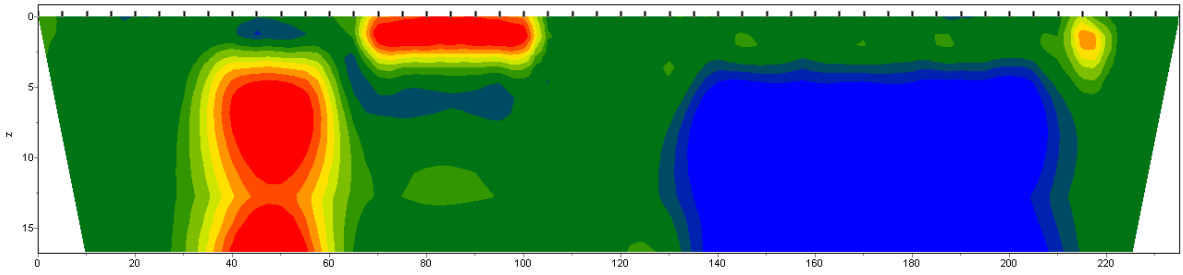
$$(A^T W^T \mathrm{WA} + \mu C^T C)\Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T \mathrm{Cm}$$

El grado de suavidad del modelo es directamente proporcional al ***Smoothness factor***. Un valor demasiado grande puede aumentar el desajuste.

Marquardt — algoritmo clásico de mínimos cuadrados con regularización por amortiguamiento (**Ridge regression**)

Marquardt, 1963

. Con pocos parámetros desconocidos permite obtener un modelo focalizado.



La ecuación matricial es:

$$(A^T W^T \mathrm{WA} + \mu I)\Delta m = A^T W^T \Delta f$$

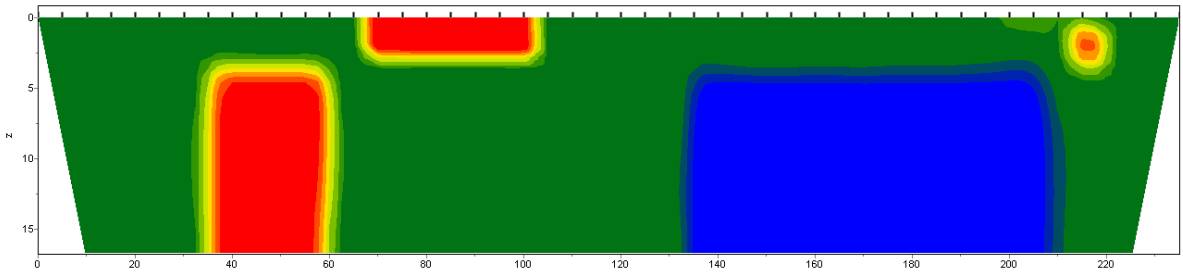
Un uso descuidado de esta variante puede dar resultados inestables o aumentar el error cuadrático medio, es decir, divergencia del algoritmo.

Es mejor usar ***Marquardt*** como refinamiento (para reducir el desajuste) después de una inversión con ***Smoothness constrained*** u ***Occam***.

Focused — inversión por mínimos cuadrados con operador de suavizado y focalización adicional del contraste

Portniaguine, 2000

. Da una distribución suave por tramos, es decir, un modelo de bloques con parámetro constante.



La ecuación matricial es:

$$(A^T W^T \mathrm{WA} + \mu C^T \mathrm{RC})\Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T \mathrm{RCm}$$

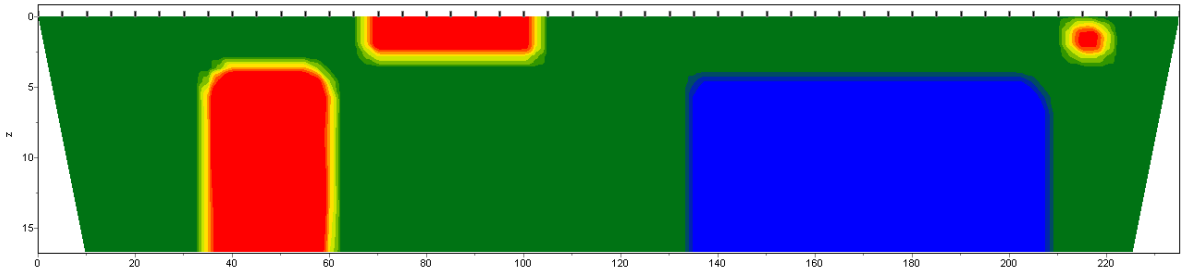
Esta variante exige elegir con cuidado el parámetro ***Threshhold***, que define el contraste umbral entre celdas adyacentes. Al alcanzarlo, los parámetros de las celdas no se promedian entre sí (se considera que hay una frontera). El grado (peso) de promediado Ri de dos celdas vecinas depende del umbral e y del contraste r_i entre ellas así:

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

Blocks — ajuste de los parámetros de áreas separadas que difieren en el valor del parámetro. Las áreas con el mismo valor se tratan como bloques unidos.

La ecuación matricial es idéntica a la de ***Marquardt***:

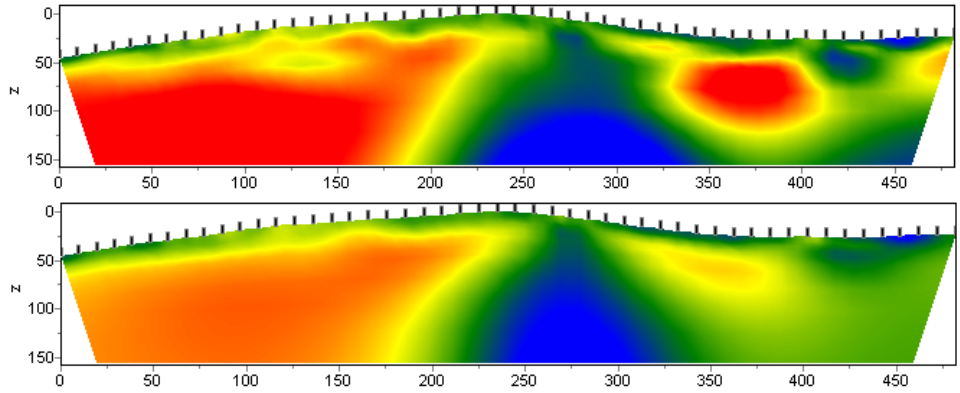
$$(A^T W^T \mathrm{WA} + \mu l)\Delta m = A^T W^T \Delta f$$



Conviene usar este algoritmo tras obtener resultados con los métodos anteriores (se recomienda ***Focused***). Para ello las celdas deben agruparse previamente con la opción Cell summarization. Para elegir bloques a mano, use el editor de modelo y seleccione áreas con parámetros diferentes. Algunos bloques se marcarán con borde durante el trabajo con este diálogo.

Smoothing factor — fija la relación entre la minimización del desajuste de datos y la del modelo (por ejemplo, la suavidad). Para datos con mucho ruido o para obtener distribuciones más suaves y estables se eligen valores relativamente grandes (0,5–2); para datos de buena calidad, 0,005–0,01. Por regla general, valores grandes del parámetro dan desajustes grandes. Se usa en los algoritmos **Occam** y **Focused**.

Las figuras siguientes muestran resultados con **smoothing factor** 0,01 y 1. El desajuste es del 4,5 % para el primer modelo y del 6 % para el segundo.



El área **Stop criteria** contiene los criterios de parada de la inversión.

Iterations — si está activado, la inversión se detiene al alcanzar el número de iteraciones indicado.

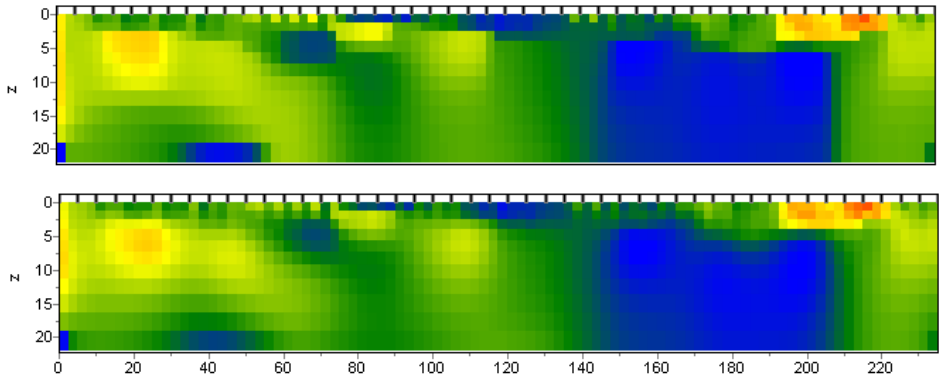
RMS error — si está activado, la inversión se detiene al alcanzar el valor RMS indicado.

Reduction — si está activado, la inversión se detiene cuando el residuo aumenta (en el porcentaje indicado) durante dos iteraciones seguidas.

Área **Focusing parameters**:

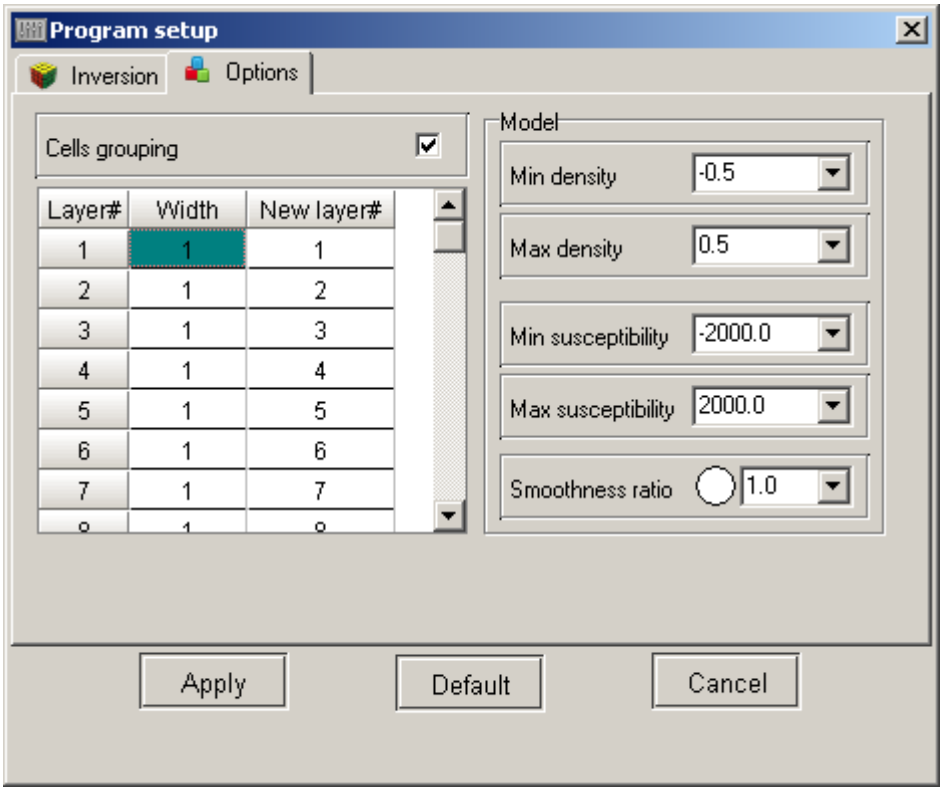
Threshold — contraste umbral entre celdas adyacentes. Al alcanzarlo, los parámetros de estas celdas no se promedian (se considera que hay una frontera). Se elige empíricamente (0,1–10). Un valor muy pequeño puede hacer divergir el algoritmo (entonces hay que aumentarlo); valores muy grandes dan distribuciones suaves.

Las figuras siguientes muestran resultados de la inversión focalizada con **Threshold** 0,1 y 10.



Robust weighting scheme — actívela si los datos contienen picos debidos a errores sistemáticos de medida. Si la cantidad de datos erróneos es comparable a la de datos válidos, el algoritmo puede no dar resultados aceptables.

La segunda pestaña, **Options**, ajusta parámetros adicionales de la inversión.



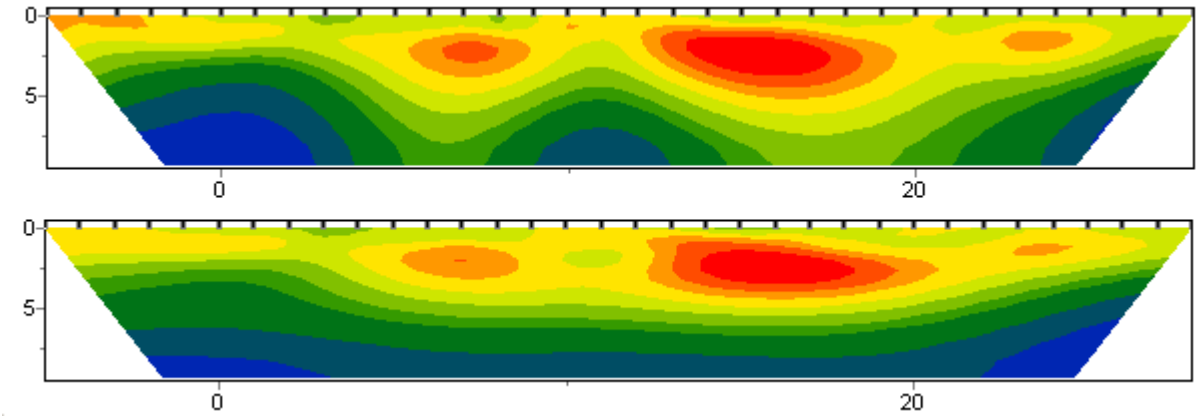
Área **Model**:

Min susceptibility, Max susceptibility — límites de variación de los parámetros en la inversión. La susceptibilidad se da en el sistema CGS ($n*10^{-5}$).

Min density, Max density — límites de variación de la densidad en la inversión, en g/cm3.

Smoothness ratio — relación entre el suavizado horizontal y el vertical. Para estructuras en capas horizontales use valores <1, para estructuras verticales >1. Normalmente entre 0,2 y 1.

Las figuras muestran resultados con **Smoothness ratio** 1 y 0,3.

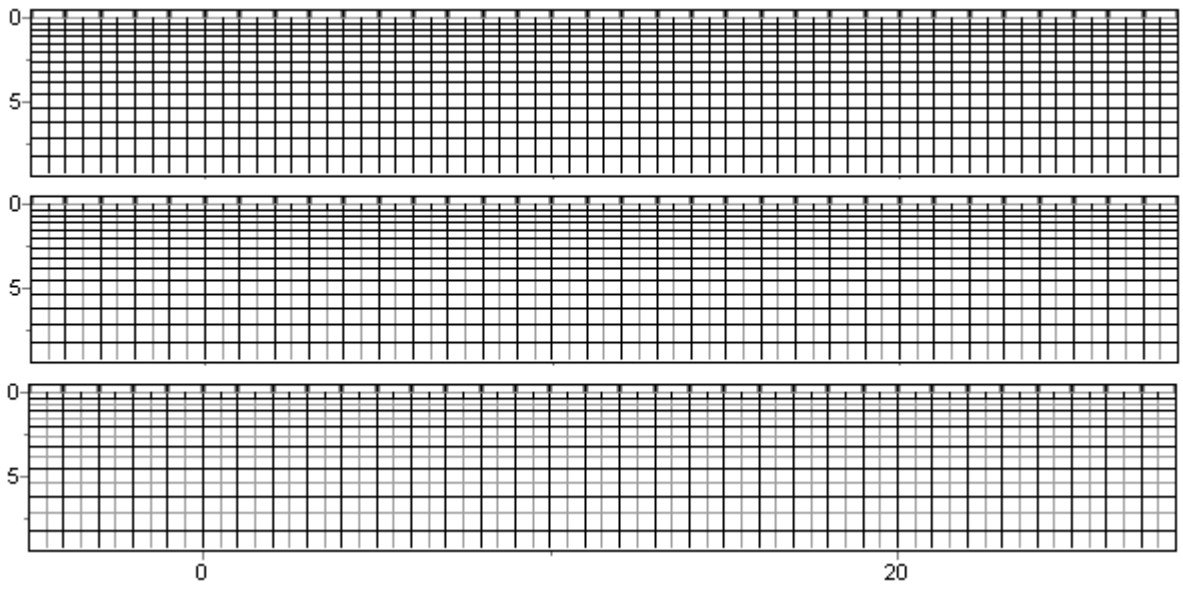


Cell grouping — para modelos grandes. Abre una tabla que permite unir celdas adyacentes y reducir el número de parámetros desconocidos. El número de celdas del problema directo no cambia, pero sí el de la inversión. Idealmente, el número de incógnitas debe ser próximo al número de medidas.

La tabla tiene tres columnas: en la primera (Layer) el número de capa del modelo inicial; en la tercera (ID) el número de capa de la malla de inversión; en la segunda (Width) el número de celdas horizontales incluidas en cada celda de la malla de inversión para esa capa. La malla de inversión se muestra en el editor de modelo durante la configuración. Un doble clic izquierdo en una celda de la columna Width une celdas en horizontal para la capa actual; el botón derecho hace lo mismo para la capa actual y todas las más profundas.

Un doble clic izquierdo en la columna ID une celdas en vertical; el botón derecho, para la capa actual y todas las más profundas.

Abajo se ven tres mallas de inversión: en la primera la malla coincide con el modelo; en la segunda, desde la segunda capa, las celdas se agrupan de dos en dos; en la tercera, desde la segunda capa, de cuatro en cuatro.



Gráficas de perfil (Profile)

Este objeto representa los parámetros teóricos y experimentales.

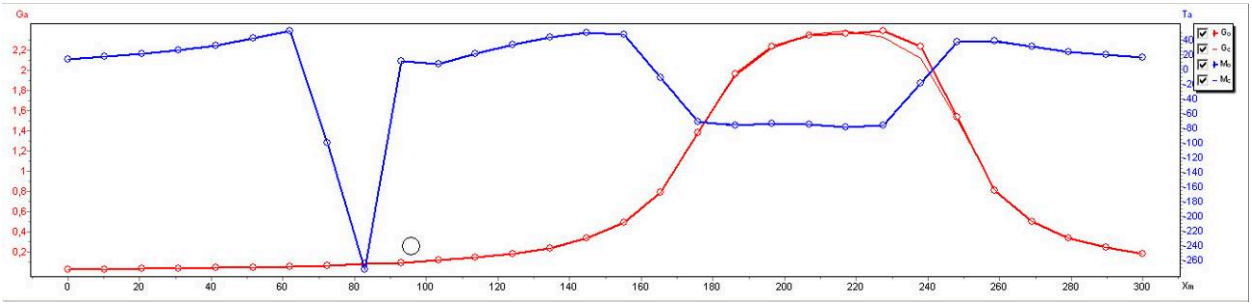


Fig. 3 Ventana de gráficas de perfil

Por defecto, las curvas teóricas se dibujan con línea continua y las experimentales con línea continua y círculos en los puntos de medida. El azul se usa para las gráficas magnéticas y el rojo para las gravimétricas. El color puede cambiarse en el diálogo de configuración del objeto.

Los parámetros de las gráficas observadas y calculadas se fijan en el diálogo de configuración de gráficas (véase «Editor de gráficas»). Los parámetros de los ejes se fijan en el editor de ejes (clic derecho + SHIFT sobre el eje).

Para eliminar puntos use la rueda del ratón manteniendo ALT. El tamaño de la zona eliminada se controla con la rueda.

ZondGM2D también permite trabajar con datos de sondeos. En ese caso la ventana tiene este aspecto:

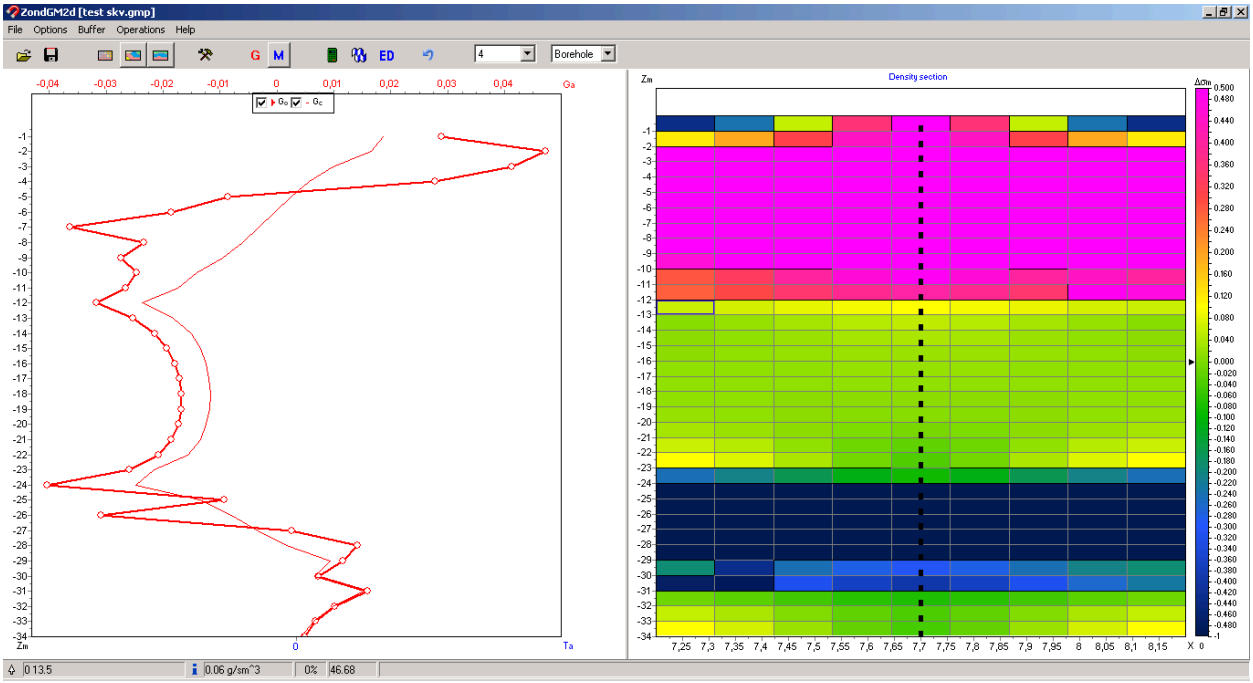


Fig. 4 Ventana principal en el modo de datos de sondeo.

En este modo están disponibles todas las opciones de edición.

Editor de modelo

El editor de modelo permite cambiar con el ratón los parámetros de las celdas. A la derecha del área de edición hay una escala de colores que relaciona el color con el valor del parámetro. Para elegir el valor actual haga clic derecho en la escala; su valor se muestra debajo de la escala.

El tamaño y la posición de la escala se cambian arrastrando el deslizador con el botón izquierdo o derecho pulsado.

Trabajar con las celdas es parecido a editar píxeles en un editor de imágenes. Al mover el cursor por el modelo, en el panel de estado inferior se muestran las coordenadas y los parámetros de la celda activa, resaltada con un rectángulo.

Las celdas seleccionadas o fijadas se marcan con un punto en el centro.

El modelo puede mostrarse por celdas, Options/Model/Block-section (Fig. 5A), con paleta interpolada suave, Options/Model/Smooth-section (Fig. 5B), y en isolíneas, Options/Model/Contour-section (Fig. 5C).

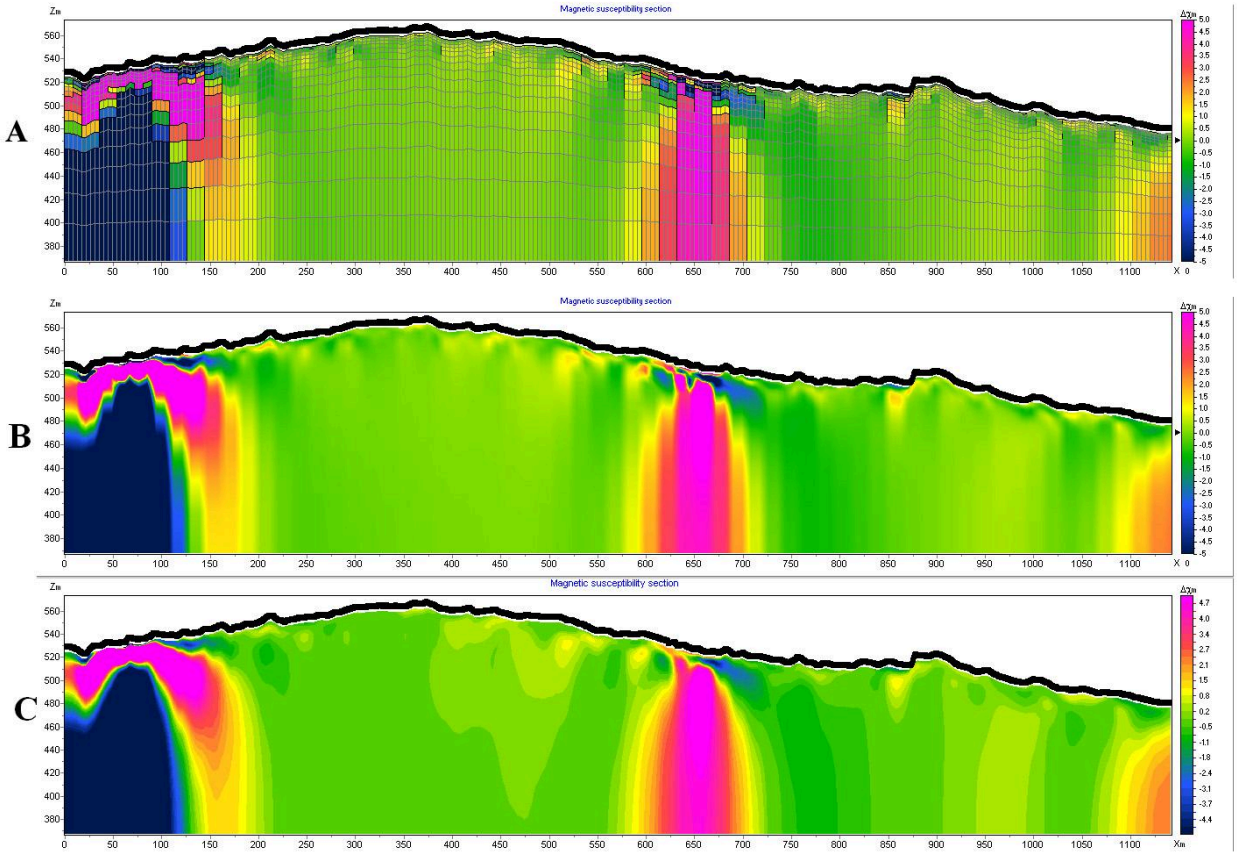


Fig. 5 Variantes de representación del modelo:

Block-section (A), **Smooth-section** (B), **Contour-section** (C).

Un doble clic en el editor de modelo abre un menú contextual con las opciones:

- **The top area** — Display model mesh: mostrar o no la malla del modelo.
- **Display objects border** — Mostrar o no los bordes de los objetos.
- **Display color bar** — Mostrar o no la escala de colores.
- **Setup** — Diálogo de configuración del modelo (véase «Diálogo de configuración del modelo»).
- **Zoom&Scroll** — Modo de zoom y desplazamiento.
- **Print preview** — Imprimir el modelo.
- **Color bar** — Setup: diálogo de configuración de la escala de colores.
- **Set minimum** — Valor mínimo de la escala.
- **Set maximum** — Valor máximo de la escala.
- **Set incremental factor** — Mínimo y máximo de la escala relativos al valor del medio de fondo.
- **Automatic** — Mínimo y máximo de la escala automáticos.
- **Log scale** — Escala logarítmica.
- **Set cursor value** — Fijar el valor actual del parámetro.
- **Colors as histogram** — Escala de colores como histograma.
- **Vertical axis** — Set maximum: profundidad de la capa inferior.

- **Redivide** — Mismo espesor para todas las capas del modelo (en la escala actual).
- **Thick mesh** — Quitar uno de cada dos nodos de la malla vertical.
- **Thin mesh** — Añadir nodos intermedios en la malla vertical.
- **Horizontal axis** — Redivide: mismo ancho para las celdas situadas entre posiciones únicas de medida.
- **Thick mesh** — Quitar uno de cada dos nodos de la malla horizontal (si no coincide con una posición de medida).
- **Thin mesh** — Añadir nodos intermedios en la malla horizontal.

Un clic derecho en el área de edición abre un menú contextual con las opciones:

- **Display cell setup** — Diálogo de parámetros de la celda.
- **Cell to cursor value** — Usar el parámetro de la celda activa como valor actual.
- **Edit mode** — Modo de edición.
- **Selection\Free form selection** — Seleccionar con el ratón un conjunto de celdas dentro de un contorno libre.
- **Selection\Rectangular selection** — Selección rectangular.
- **Selection\Elliptical selection** — Selección elíptica.
- **Selection\Magic wand** — Seleccionar la celda activa y las adyacentes con parámetros próximos. La proximidad se fija en el diálogo de configuración del modelo.
- **Selection\Remove selection** — Eliminar la selección.
- **Mesh options\add column /row** — Añadir una frontera vertical u horizontal; haga clic donde deba crearse.
- **Mesh options\remove column /row** — Eliminar la frontera vertical u horizontal seleccionada.
- **Mesh options\resize column /row** — Cambiar con el ratón el espesor de una fila o columna.
- **Clear model** — Borrar el modelo actual.

Además puede usarse **Show modeler tools** del menú **Options/Model**. Aparece la barra de edición:

-  — Modo de edición del modelo.
-  — Modo de escala del modelo.
-  — Selección rectangular de celdas.
-  — Añadir una frontera vertical u horizontal en el punto del clic.
-  — Selección elíptica de celdas.
-  — Cambiar con el ratón el espesor de una fila o columna.

-  — Selección de celdas con contorno libre.
-  — Eliminar la frontera vertical u horizontal seleccionada.
-  — Varita mágica: celda activa y adyacentes con parámetros próximos.
-  — Eliminar la selección.

Trabajo con el modelo

El modelo se edita con el ratón:

un clic izquierdo en una celda cambia su parámetro al valor actual.

El zoom o el desplazamiento de un área se hacen en el modo **Zoom&Scroll** con el botón pulsado. Para ampliar un fragmento mueva el cursor hacia abajo y a la derecha con el botón izquierdo pulsado; para volver a la escala inicial, hacia arriba y a la izquierda.

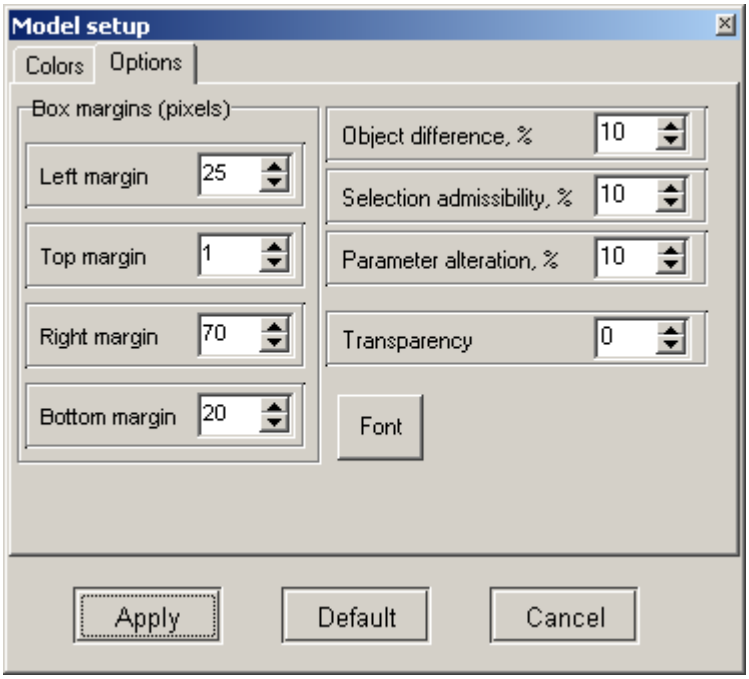
Un clic izquierdo con SHIFT aumenta el parámetro de la celda y un clic derecho con SHIFT lo disminuye. El porcentaje de cambio se fija en el diálogo de configuración del modelo. Si la celda activa está en la selección, los cambios se aplican a toda la selección.

Un clic con CTRL permite arrastrar con el ratón la selección. Con el botón izquierdo el contenido de las celdas se copia al nuevo lugar; con el derecho se mueve.

Diálogo de configuración del modelo

Se abre con clic derecho en el modelo, opción **Setup** del menú.

Pestaña **Options**



Área **Box margins (pixels)**:

Left margin — margen izquierdo de la figura, en píxeles.

Right margin — margen derecho, en píxeles.

Top margin — margen superior, en píxeles.

Bottom margin — margen inferior, en píxeles.

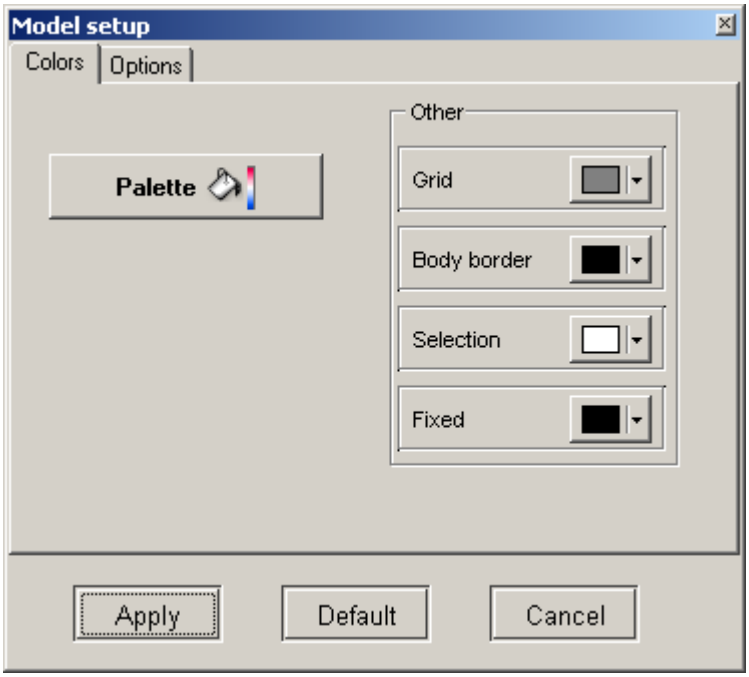
Object difference — razón máxima de los parámetros de celdas adyacentes por encima de la cual se dibuja un borde entre ellas.

Selection admissibility — diferencia admisible de parámetros entre celdas adyacentes para considerarlas un mismo objeto y seleccionarlas juntas (modo Magic Wand).

Parameter alteration — incremento de los parámetros de las celdas seleccionadas (en % del valor) al trabajar en modo Edit con SHIFT pulsado.

El botón **Font** abre el diálogo de fuente.

Pestaña **Colors**



Área **Color bar**: el botón Palette abre el diálogo de relleno.

Área **Others**:

Body border — color del borde entre celdas adyacentes cuando su diferencia supera el valor fijado.

Grid — color de la malla.

Selection — color de la marca de celda seleccionada.

Fixed — color de la marca de celda fijada.

Diálogo de parámetros de la celda

Se abre con clic derecho en una celda, opción **Display cell Setup** del menú.

Sirve para fijar los parámetros de la celda.

Value — valor del parámetro de la celda.

Fixed — fija o libera el parámetro.

Min value, **Max value** — límites de variación del parámetro.

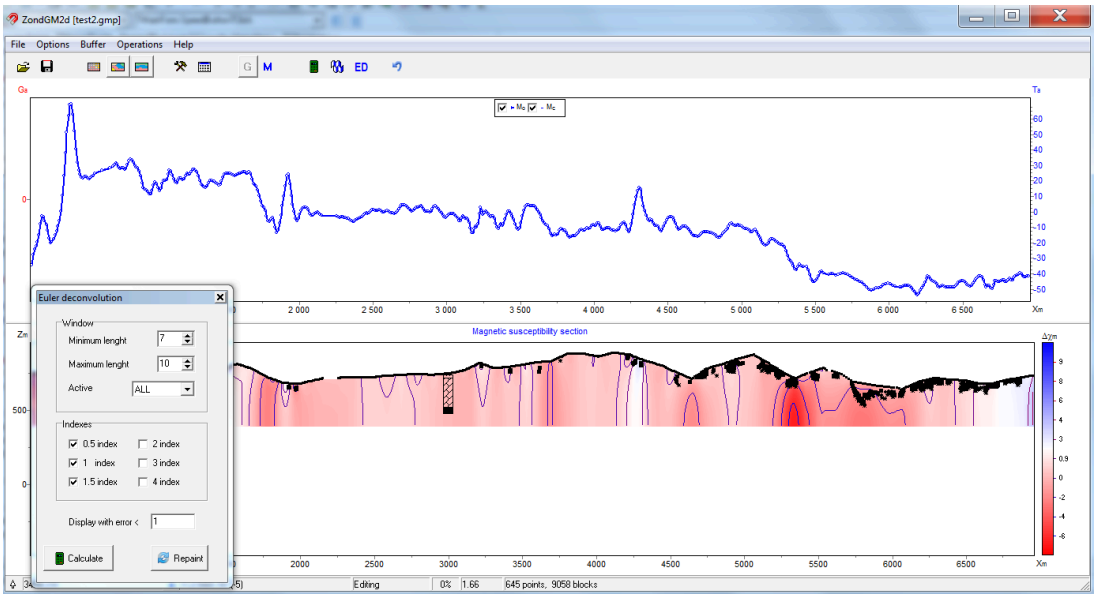
Apply to selected — si está activada, aplica los ajustes a todas las celdas seleccionadas.

Elección del modelo del medio en la inversión (malla regular de celdas, modelo poligonal y de capas arbitrarias)

A diferencia de sus predecesores, **ZondGM2D** tiene tres tipos de descripción del medio:

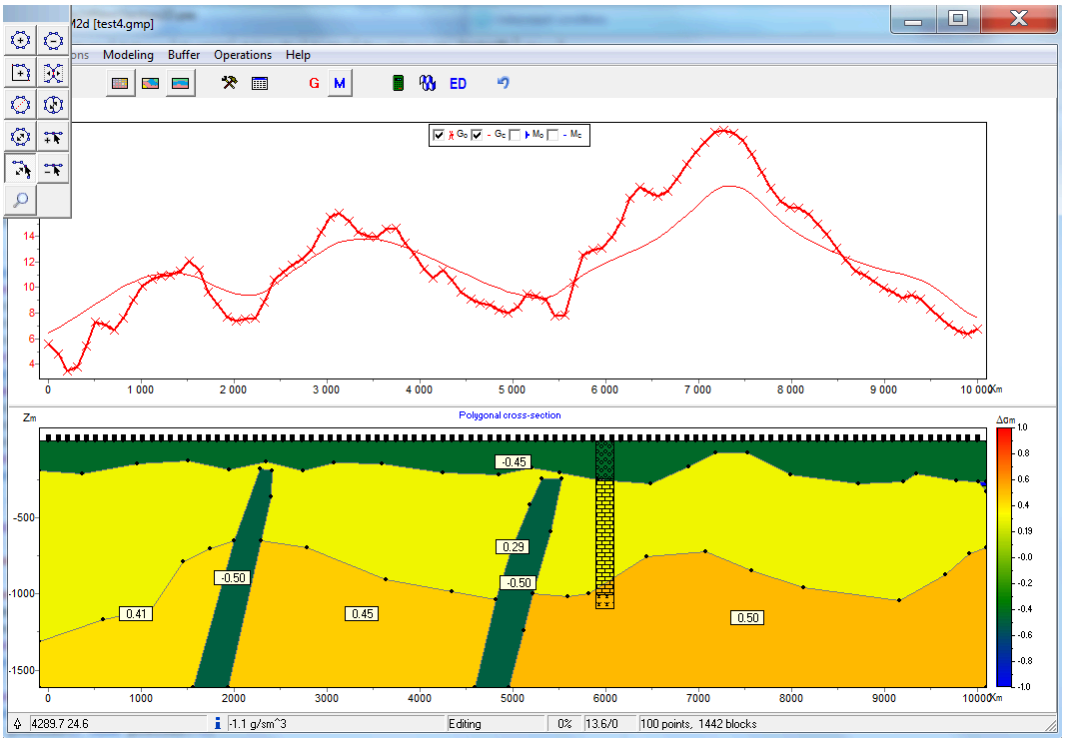
El medio se divide en una malla regular de celdas

El modo está disponible con el botón  de la barra de herramientas pulsado. Es la opción más útil para resolver el problema inverso (reconstrucción automática de secciones de densidad o susceptibilidad). El resultado de la inversión es un buen punto de partida para la interpretación geológico-geofísica posterior. Las opciones de este modo se describen en las secciones anteriores.



El medio se representa con un conjunto de cuerpos de sección poligonal

El modo está disponible con el botón  de la barra de herramientas pulsado.



La descripción poligonal del medio favorece un enfoque más estructural de la interpretación. La sección bidimensional de cada cuerpo se describe como un polígono cerrado. El modelo se construye como un conjunto de polígonos de geometría arbitraria con parámetros magnéticos y de densidad dados. Es la opción más cómoda para la etapa final de la interpretación. **ZondGM2D** dispone de muchas herramientas para crear rápidamente modelos de cualquier complejidad; se describen en el capítulo «Modelado».

En el modelo poligonal, resolver el problema inverso significa corregir automáticamente la posición de los nodos de los polígonos y sus parámetros petrofísicos. Al pulsar el botón de inversión aparece un menú con las opciones:

Par inversion — ajuste de los parámetros (susceptibilidad y densidad) de los polígonos sin mover los nodos

Z nodes inversion — ajuste de la posición vertical de los nodos

X nodes inversion — ajuste de la posición horizontal de los nodos

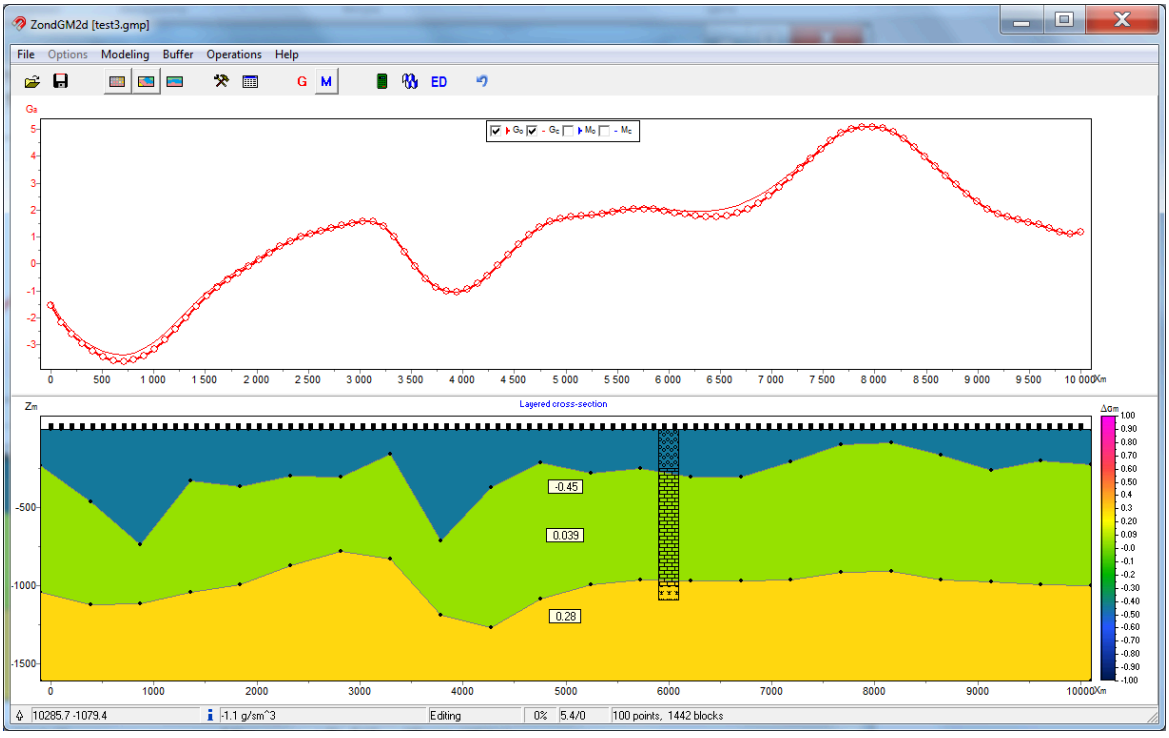
ZX nodes inversion — ajuste de la geometría de los polígonos

PZX inversion — ajuste de los parámetros y de la geometría

Para este tipo de modelo está disponible el ajuste conjunto de datos gravimétricos y magnéticos.

Medio de capas arbitrarias

El modo está disponible con el botón de la barra de herramientas pulsado.



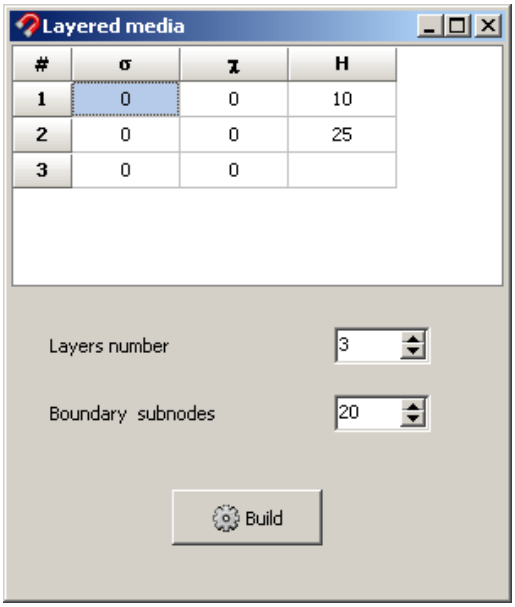
Este tipo de modelo es útil en regiones con estratificación casi en capas. Las opciones se describen en el capítulo «Modelado». Antes de empezar hay que fijar los parámetros del modelo inicial en **Modeling/Layered media setup**, que ofrece:

Layered numbers — número de capas

Boundary subnodes — número de nodos en cada frontera

Build — crear el modelo indicado.

Los parámetros (densidad, susceptibilidad y espesor) de cada capa se fijan en la tabla.



El programa resuelve los problemas directo e inverso para el medio de capas arbitrarias y permite obtener densidades y susceptibilidades y la geometría de las fronteras. Al pulsar aparece un menú similar al del modo poligonal.

Para este tipo de modelo está disponible el ajuste conjunto de datos gravimétricos y magnéticos.

MODELADO

El modelado es una herramienta importante antes del trabajo de campo. Permite elegir los parámetros óptimos del sistema de medida para resolver el problema geológico. Con la información inicial sobre el objetivo, el intérprete puede modelar distintas situaciones geológicas al planificar los trabajos geofísicos.

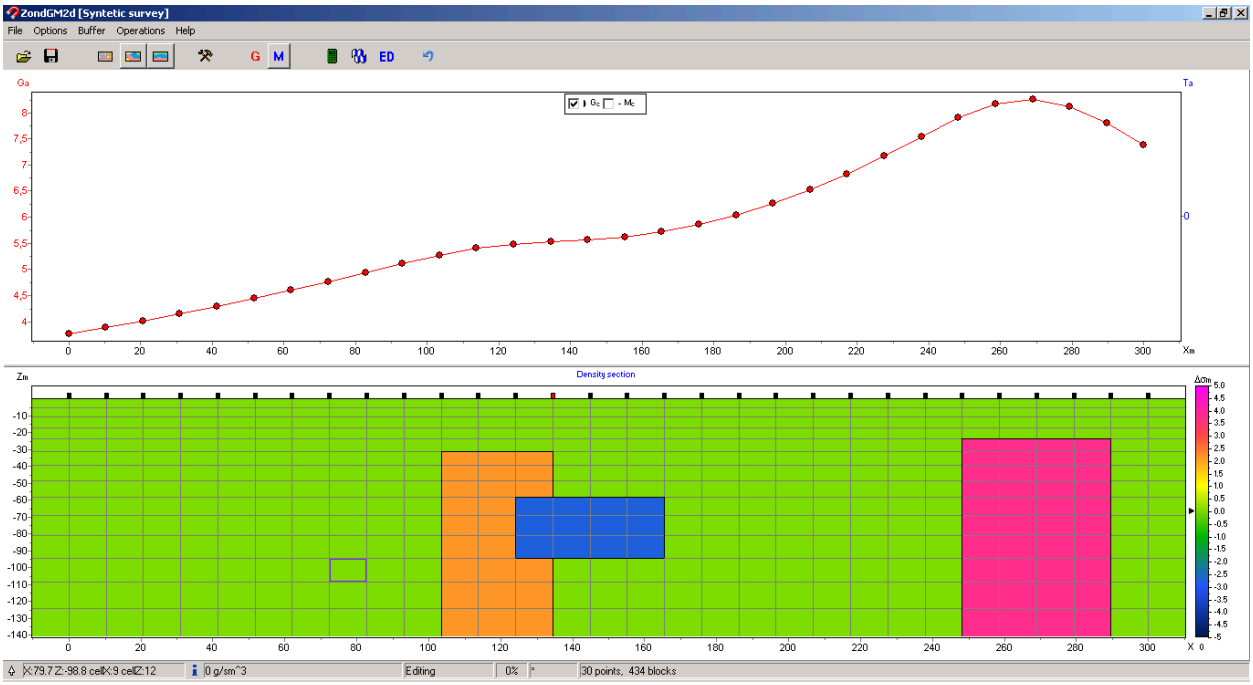
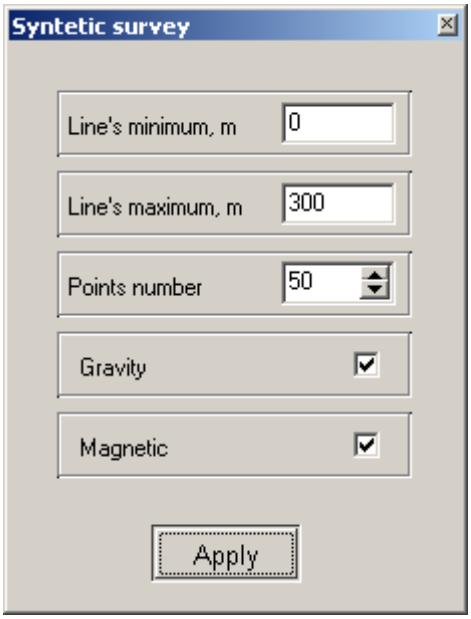


Fig. 6 Ventana del programa en modo de modelado

En la primera etapa se eligen los parámetros del sistema de medida según las características y la profundidad del objetivo, las condiciones de trabajo (relieve, etc.) y las posibilidades del equipo. Use **File/Create synthetic survey** para abrir el diálogo de parámetros del sistema de medida:



Line's minimum, m — posición del primer punto de medida del perfil

Line's maximum, m — posición del último punto de medida

Points number — número de puntos del perfil

Las opciones **Gravity** y **Magnetic** activan o desactivan el cálculo de los campos gravimétrico o magnético.

El modelo del medio se crea en el editor de modelo (parte gráfica inferior de la ventana) en el modo block-section. Véase «Editor de modelo».

Los objetivos principales del modelado matemático son estimar el nivel de señal y la resolución del sistema de medida elegido. Para calcular la respuesta del modelo (problema directo) pulse el botón  de la barra de herramientas.

Para recuperar el modelo, es decir, resolver el problema inverso con los datos calculados, guarde las señales teóricas con el filtro **Zond project with calculated data** y ábralas como observadas. Para comparar el modelo recuperado con el inicial use **Import model/data** (véase «Importación y exportación de datos»), tras guardar el modelo inicial como **Zond model with calculated**.

Modos de modelado poligonal y de capas arbitrarias

El modo poligonal se activa con el botón  de la barra de herramientas. Los objetos anómalos se sustituyen por un conjunto de poliedros de extensión infinita en la dirección perpendicular al perfil. Cada poliedro tiene su geometría, susceptibilidad y densidad, para las que se resuelve el problema directo. El modo poligonal se usa en la segunda etapa de la interpretación: tras obtener un modelo con uno de los algoritmos de inversión, se recomienda pasar al modo poligonal, definir los polígonos según el modelo obtenido y la geología conocida, y volver a invertir.

El modo de medio poligonal en capas se activa con el botón . Se recomienda en regiones con estratificación concordante. Antes de empezar hay que fijar los parámetros del modelo inicial en Modeling / Layered medium setup.

Para invertir en el modo poligonal o en el de capas use el botón . Se ofrecen las opciones:

Parameters inversion — ajuste de los parámetros (susceptibilidad y/o densidad) de los polígonos

Z nodes inversion — ajuste de la posición vertical de los nodos

X nodes inversion — ajuste de la posición horizontal de los nodos

ZX nodes inversion — ajuste de la posición de los nodos

PZX inversion — ajuste de los parámetros y de la posición de los nodos.

Al elegir el modo poligonal o el de capas aparece en el menú principal la pestaña **Modeling** (Fig. 7) con las opciones:

- **Layered media setup** — Configurar el medio en capas para el modo de capas arbitrarias.
- **Set model size** — Fijar los límites del modelo.
- **Show background** — Mostrar el modelo actual del proyecto como imagen de fondo.
- **Remove background** — Ocultar el modelo actual.

- **Get value from background** — Asignar al polígono el valor medio del modelo actual.
- **Remove polygons** — Eliminar todos los polígonos.
- **Save polygons** — Guardar los polígonos.
- **Load polygons** — Cargar un archivo de polígonos.
- **Export to CAD** — Exportar los polígonos a AutoCAD.
- **Display ColorScale** — Mostrar la escala de colores.
- **Colors from ColorScale** — Colorear los polígonos según la escala de colores.

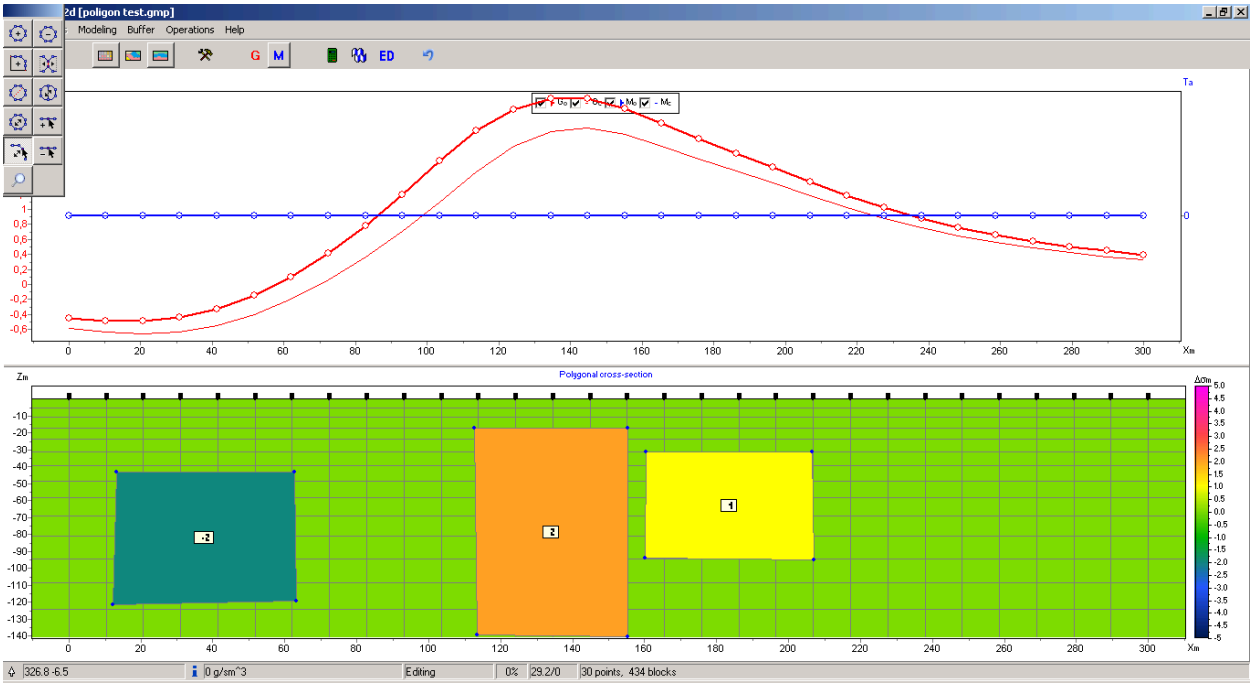


Fig. 7 Ventana principal en modo de modelado poligonal

Los polígonos se crean y editan con el panel de control que aparece al pulsar .

El modo **Add polygon** se activa con el botón . Sirve para crear un polígono aislado. Clic izquierdo para añadir un punto; clic derecho para cerrar el polígono (unir el último punto con el primero). Si no se puede crear el polígono (las caras se cruzan o hay otro objeto dentro), el programa no permite cerrarlo. Evite colocar puntos demasiado próximos.

El modo **Delete polygon** se activa con el botón . Sirve para eliminar un polígono: clic derecho sobre él. El contorno se vuelve rojo cuando el cursor está dentro.

El modo **Create a joined polygon** se activa con el botón . Sirve para crear un polígono (o una parte adicional) unido a polígonos existentes, a los bordes del modelo o al relieve, es decir, a un área acoplada (conjunto de polígonos y bordes del modelo con caras comunes). Clic izquierdo para añadir un punto; clic derecho para cerrar el polígono a través del borde del área acoplada. El primer y el último punto deben estar en el borde exterior del área acoplada (que se vuelve rojo al acercar el cursor). Si no se puede crear el polígono, el programa no permite cerrarlo y elimina los puntos creados. Los polígonos unidos a los bordes izquierdo, derecho e inferior del modelo se extienden al infinito en esas direcciones.

El modo **Disconnect polygon** se activa con el botón . Sirve para separar un polígono de los polígonos adyacentes o de los bordes del modelo. Separado de los bordes, el polígono pierde su extensión infinita (queda limitado por el modelo). Clic derecho sobre el polígono para separarlo; el contorno se vuelve rojo cuando el cursor está dentro. Después, con Move polygon, puede moverse la parte separada.

El modo **Split polygon** se activa con el botón . Divide el polígono en dos polígonos conectados. La frontera se define con dos puntos en los bordes o nodos del polígono: clic izquierdo para el primero, clic derecho para el segundo y la división. Si la operación no es posible (las caras se cruzan o la frontera sale del polígono), el programa no la realiza y elimina la frontera. Bordes y puntos se vuelven rojos al acercar el cursor.

El modo **Move polygon** se activa con el botón . Mueve los puntos no conectados de un polígono; si el polígono no tiene puntos comunes con otros polígonos o con los bordes, se mueve entero. Clic izquierdo para elegir el polígono, que sigue al cursor; clic derecho para fijar la nueva posición. Si la operación no es posible, el polígono vuelve a su posición. El contorno se vuelve rojo cuando el cursor está dentro.

El modo **Move connected polygons** se activa con el botón . Mueve un polígono y todos los conectados con él. Clic izquierdo para elegir, clic derecho para fijar. Si la operación no es posible, los polígonos vuelven a su posición.

El modo **Add point** se activa con el botón . Añade un punto en el borde de un polígono: clic derecho sobre el borde. Los bordes se vuelven rojos al acercar el cursor.

El modo **Remove point** se activa con el botón . Elimina un punto del polígono: clic derecho sobre él. No es posible si las caras se cruzan, si un polígono queda dentro de otro o si quedarían menos de tres puntos. Los puntos se vuelven rojos al acercar el cursor.

El modo **Merge points** se activa con el botón . Une dos puntos en uno, uniendo puntos al borde de otro polígono o a los bordes del modelo. Primero se elige el punto que se une.

Diálogo de parámetros del polígono

Sirve para ajustar los parámetros del polígono. Se abre con doble clic sobre el polígono.

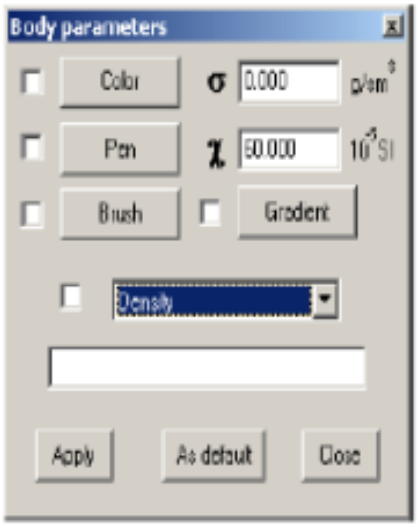


Fig. 8 Diálogo de parámetros del polígono

Color — color de relleno del polígono. Si la casilla está activada, el color se aplica a todos los polígonos del modelo.

Pen — parámetros del borde. Si está activada, se aplican a todos los polígonos.

Brush — parámetros del relleno. Si está activada, se aplican a todos los polígonos.

Gradient — relleno en degradado. Si está activada, se aplica a todos los polígonos.

σ — densidad del polígono.

χ — susceptibilidad magnética del polígono.

La opción siguiente define el tipo de etiqueta del polígono. Si está activada, se aplica a todos los polígonos del modelo.

None — sin etiqueta.

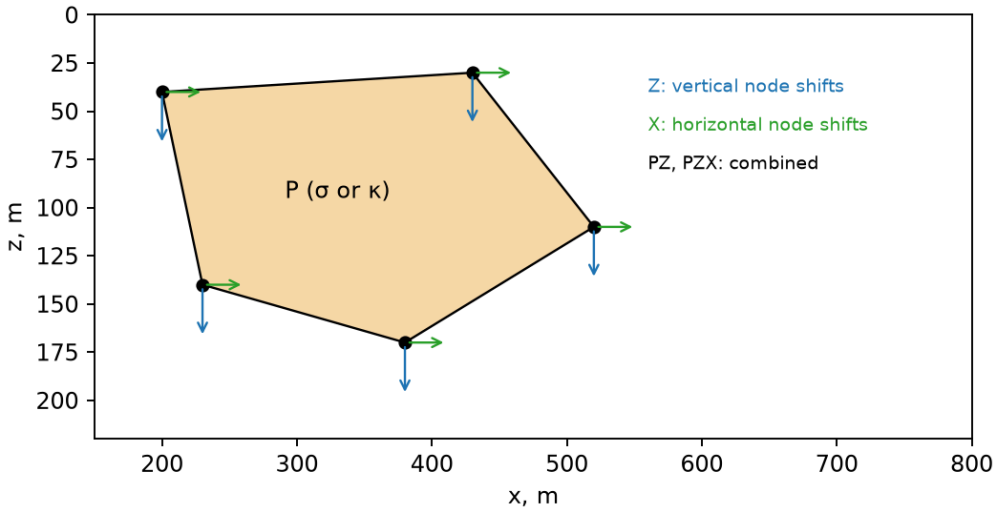
Density — se muestra la densidad.

Susceptibility — se muestra la susceptibilidad.

Density & Susceptibility — se muestran la densidad y la susceptibilidad.

User text — se muestra el texto del campo siguiente.

Inversión del modelo poligonal



Parámetros de la inversión poligonal: propiedad del polígono P y desplazamientos de nodos en Z y X

El modo de inversión se elige en el menú contextual del modelo poligonal:

- **Par inversion** — solo se ajustan las propiedades de los polígonos (densidad o susceptibilidad); la geometría queda fija;
- **Z nodes inversion** — se ajustan las coordenadas verticales de los nodos;
- **X nodes inversion** — se ajustan las coordenadas horizontales de los nodos;
- **ZX nodes inversion** — ambas coordenadas de los nodos;
- **PZ inversion**, **PZX inversion** — propiedades y coordenadas de los nodos a la vez.

Los nodos compartidos por polígonos vecinos se mueven juntos, de modo que el modelo queda sin huecos ni solapes. El campo del polígono se calcula analíticamente mediante integrales sobre las aristas. Las derivadas respecto a las coordenadas de los nodos usan las mismas fórmulas que el campo.

Correcciones en los módulos Polygons y PolygonChart:

- la prueba de intersección de polígonos usaba un índice de nodo incorrecto;
- la prueba «punto en polígono» ya no crea un arreglo temporal;
- la división de un polígono no conexo en partes se hace por búsqueda en anchura en lugar de una enumeración de orden n^4 (el resultado coincide en el conjunto de prueba);
- la lectura de un polígono desde una cadena comprueba el número de campos.

En el campo magnético del polígono se han corregido la elección del nodo y las funciones del tipo de campo. Las funciones trigonométricas inversas se han sustituido por arctan2, estable con ángulos pequeños.

Inversión del modelo de capas arbitrarias: algoritmo

El modelo de capas arbitrarias se describe por las fronteras de las capas y la distribución de propiedades a lo largo de cada capa. Las incógnitas son las profundidades de los nodos de

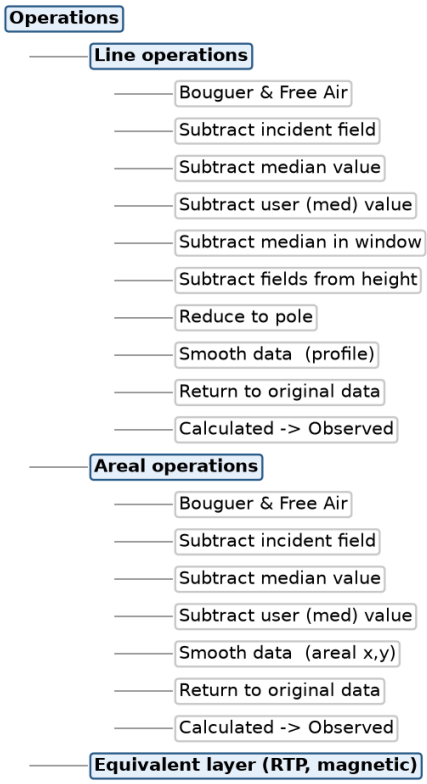
las fronteras y las propiedades de la capa en los nodos. El campo de la capa se calcula integrando sobre el polígono de la capa. Para elementos cercanos se usa la cuadratura de Gauss–Legendre de 8 nodos; para los lejanos (cuadrado de la distancia mayor que 16 veces el cuadrado del tamaño del elemento), una fórmula de campo lejano. Así el cálculo del campo del modelo en capas es 24 veces más rápido (314 → 13 ms) con la misma precisión.

Correcciones en el módulo kmpvsetun:

- en la matriz de suavizado el estabilizador se añade como $L^T L + c_p I$;
- el sistema de inversión se escribe de forma simétrica en el espacio de parámetros normalizados; antes el término de suavizado se multiplicaba por el peso solo por un lado y la matriz perdía la simetría;
- en el jacobiano se han corregido los índices de los parámetros de las fronteras y se ha eliminado la asignación repetida de la derivada para datos de SEV y MT;
- para datos MASW las derivadas tienen en cuenta los límites de los parámetros con **Lim based inv** activado;
- la normalización de los pesos de los datos MT usa el parámetro correcto.

PROCESADO Y TRANSFORMACIONES DEL CAMPO

El menú **Operations** contiene operaciones sobre los datos observados. Las de **Line operations** se aplican al perfil actual y las de **Areal operations** a todos los perfiles del área a la vez. Todas cambian el campo que se usa en la inversión; los datos originales se recuperan con **Return to original data**.



Estructura del menú Operations

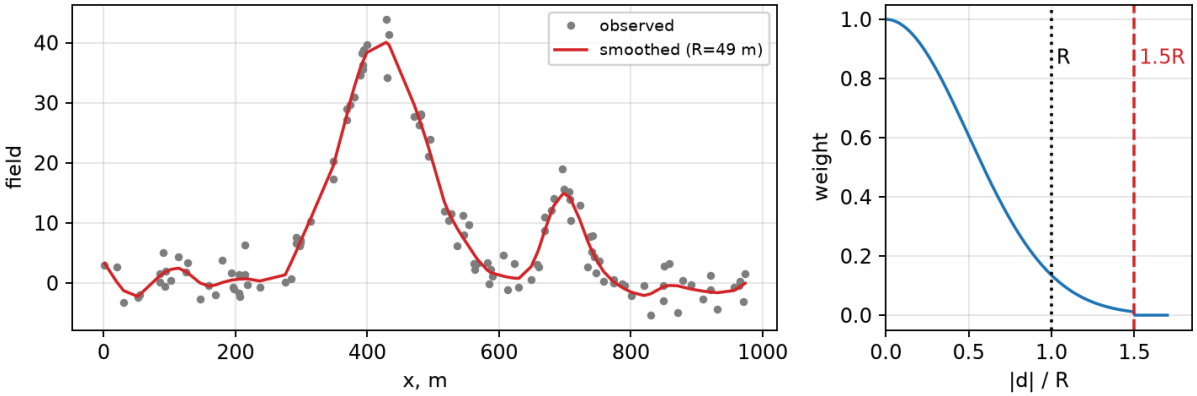
Operaciones de perfil y de área

- **Bouguer & Free Air** — correcciones de aire libre y de Bouguer: $G_a = G_m + 0.3086\,h - 0.04193\,\rho\,h$ (mGal; h es la altura absoluta del punto del gravímetro en metros, ρ en g/cm³). La densidad de la capa intermedia se introduce en el diálogo; un valor mayor que 50 se considera en kg/m³ (2500 por defecto) y se convierte a g/cm³. La corrección se aplica solo a los puntos de tipo Gz. Antes el coeficiente de Bouguer era 0,049·ρ con ρ en kg/m³, es decir, la corrección era unas mil veces mayor; esto está corregido.
- **Subtract incident field** — restar el módulo del campo normal T_0 (de **Observation settings**) de los datos magnéticos.
- **Subtract median value** — restar la mediana de la componente activa (Gz o T). La mediana es robusta frente a valores atípicos y anomalías intensas.
- **Subtract user (med) value** — restar un valor dado; por defecto se propone la mediana.

- **Subtract median in window** — restar el fondo en una ventana móvil (separación de la componente local). Se pide la semianchura de la ventana en puntos (de 3 a un tercio del número de puntos, 10 por defecto). El fondo en la ventana es la media entre la mediana y la media aritmética.
- **Subtract fields from height** — reducir el campo medido a distintas alturas a un nivel común mediante fuentes equivalentes a lo largo del perfil. El perfil se prolonga por cada lado con siete puntos de paso creciente al doble para reducir el efecto de borde.
- **Reduce to pole** — reducción al polo mediante la capa equivalente (véase más abajo). Tras la operación la inclinación pasa a 90° y la declinación y el azimut a 0.
- **Smooth data** — suavizado de las observaciones por aproximación cuadrática local (véase más abajo). En **Line operations** se suaviza a lo largo del perfil; en **Areal operations**, sobre el área en coordenadas x, y.
- **Return to original data** — volver a los datos originales.
- **Calculated -> Observed** — sustituir el campo observado por el calculado (por ejemplo, para usar el campo del modelo como datos sintéticos).
- **Equivalent layer** — construir la capa equivalente y calcular la RTP del campo magnético.

Suavizado de datos (Smooth data)

El suavizado se hace igual que en ZondGM3D. En cada punto se construye una aproximación cuadrática local del campo sobre los puntos vecinos con pesos gaussianos. El valor de la aproximación en el propio punto es el valor suavizado.



Izquierda — datos observados y suavizados del perfil; derecha — función de peso del suavizado

Parámetros del algoritmo:

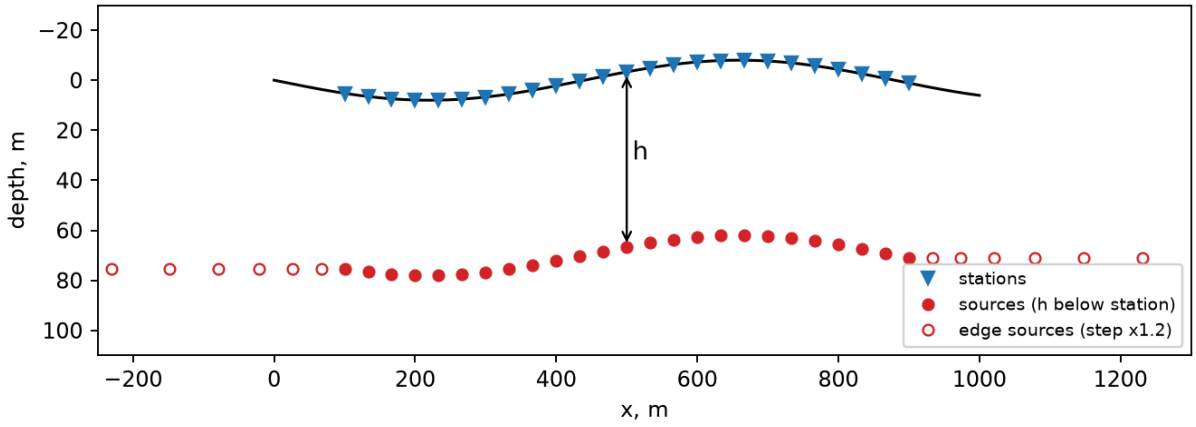
- el radio de suavizado R se da en metros; por defecto se propone el doble del paso medio entre puntos;
- el peso de un vecino a distancia d es $w = \exp(-d^2/(2\sigma^2))$, $\sigma = R/2$;
- se usan los vecinos a distancia no mayor que 1,5R;
- en modo perfil se ajusta el polinomio $a + bd + cd^2$ en la coordenada a lo largo del perfil (linecoord); en modo área, un polinomio cuadrático completo en x e y;
- si hay pocos vecinos para el ajuste cuadrático, se usa un ajuste lineal o la media ponderada.

Procedimiento. Tras elegir la opción aparece una ventana para introducir el radio. El resultado se muestra como curva calculada y los datos observados no cambian. Después aparece una pregunta: **Yes** — aceptar (el campo observado se sustituye por el suavizado), **No** — introducir otro radio (cada nuevo radio se aplica a los datos originales, no a los ya suavizados), **Cancel** — descartar. Solo se suavizan los puntos de la componente activa (Gz o T según el modo). La curva calculada se restaura tras aceptar o cancelar.

El suavizado de área usa un índice espacial de los puntos y se ejecuta en paralelo (módulo gmfast), por lo que el tiempo crece linealmente con el número de puntos. En una red irregular el radio no debe ser menor que la distancia entre perfiles vecinos; si no, el suavizado de área se convierte de hecho en suavizado de perfil.

Capa equivalente, derivadas y RTP

La capa equivalente es un conjunto de fuentes puntuales cuyo campo coincide con el observado. A partir de ellas se calculan transformaciones del campo: la derivada horizontal y la reducción al polo (RTP).



Capa equivalente en un perfil: fuentes a profundidad h bajo cada estación y fuentes de borde

Algoritmo:

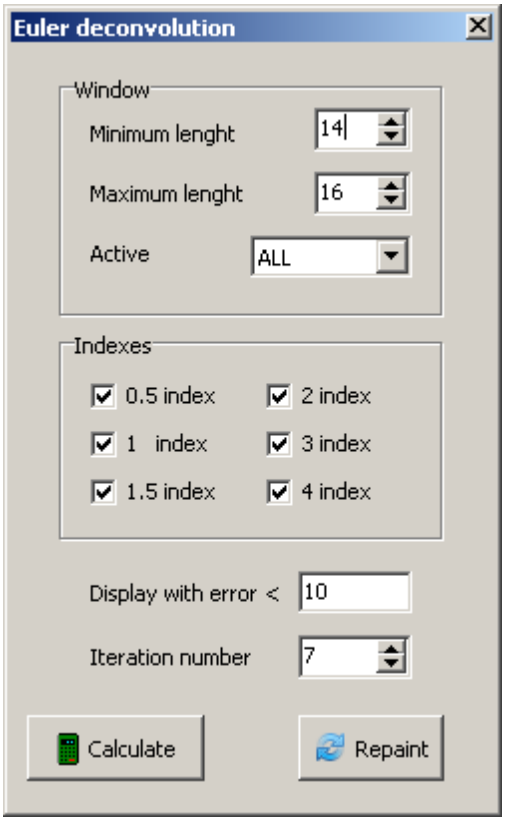
1. La derivada horizontal del campo se calcula a lo largo del perfil por un método integral (calcderiv11): el campo se prolonga más allá de los extremos del perfil con 20 niveles y el sistema se resuelve por gradientes conjugados. La derivada se usa también en la deconvolución de Euler.
2. Se pide la profundidad de la capa h (por defecto, tres pasos entre puntos). Las fuentes se colocan a profundidad h bajo cada estación teniendo en cuenta el relieve y la altura del sensor.
3. Se resuelve el sistema «fuentes → observaciones». El programa informa del desajuste aproximado de la derivada calculada con la capa respecto a la del paso 1 y pregunta si se desea probar otra profundidad. Cuanto menor es el desajuste, mejor es la profundidad elegida.
4. Elegida la profundidad, se construye la capa final: a las fuentes de las estaciones se añaden 20 fuentes por cada lado del perfil con un paso que crece 1,2 veces. El sistema incluye el campo y su derivada horizontal.
5. La RTP se calcula como el campo de la misma capa con magnetización vertical (I = 90°, D = 0).

La operación solo funciona en modo magnético. En modo gravimétrico la opción no cambia nada: antes en este modo se aplicaba el núcleo gravimétrico a valores magnéticos; esto está corregido. La operación no está disponible para perfiles de sondeo.

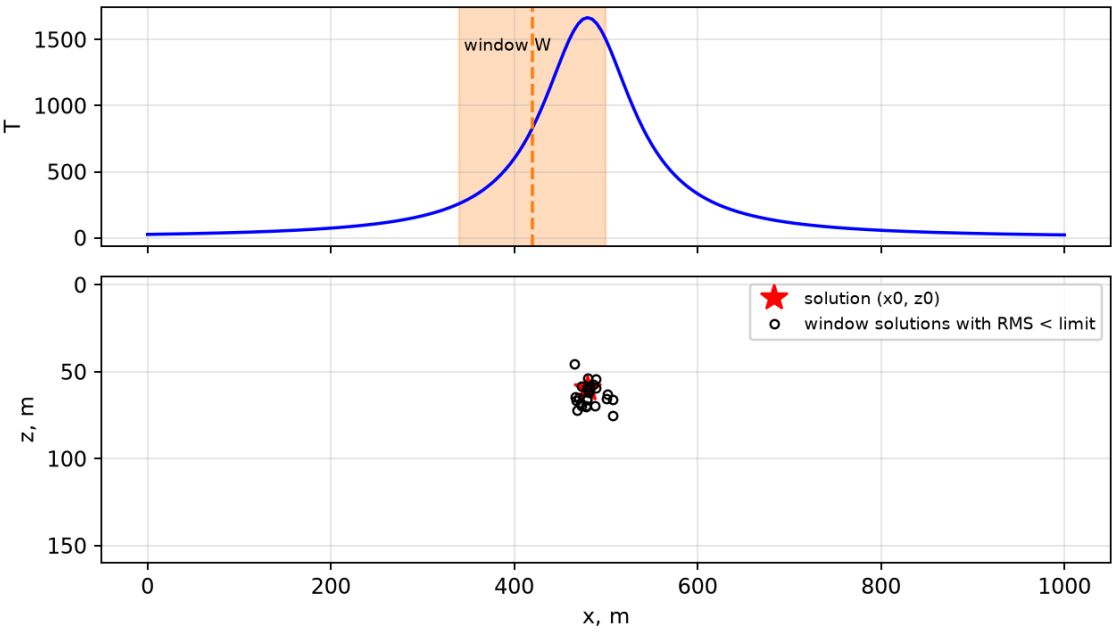
Recomendaciones: elija una profundidad de capa de 1–3 pasos entre puntos; con un paso muy irregular, aclare o suavice antes los datos; con inclinaciones bajas (cerca del ecuador) la RTP es inestable.

Deconvolución de Euler

La deconvolución de Euler estima la posición de los puntos singulares de las fuentes (bordes, contactos, centros de cuerpos) a partir del campo y sus derivadas, sin necesidad de un modelo. La ventana se abre con el botón **ED** de la barra de herramientas. Al abrirla se calculan y se dibujan las derivadas horizontal y vertical del campo.



Ventana Euler deconvolution



Ventana de Euler en un perfil: campo, ventana móvil de ancho W y soluciones

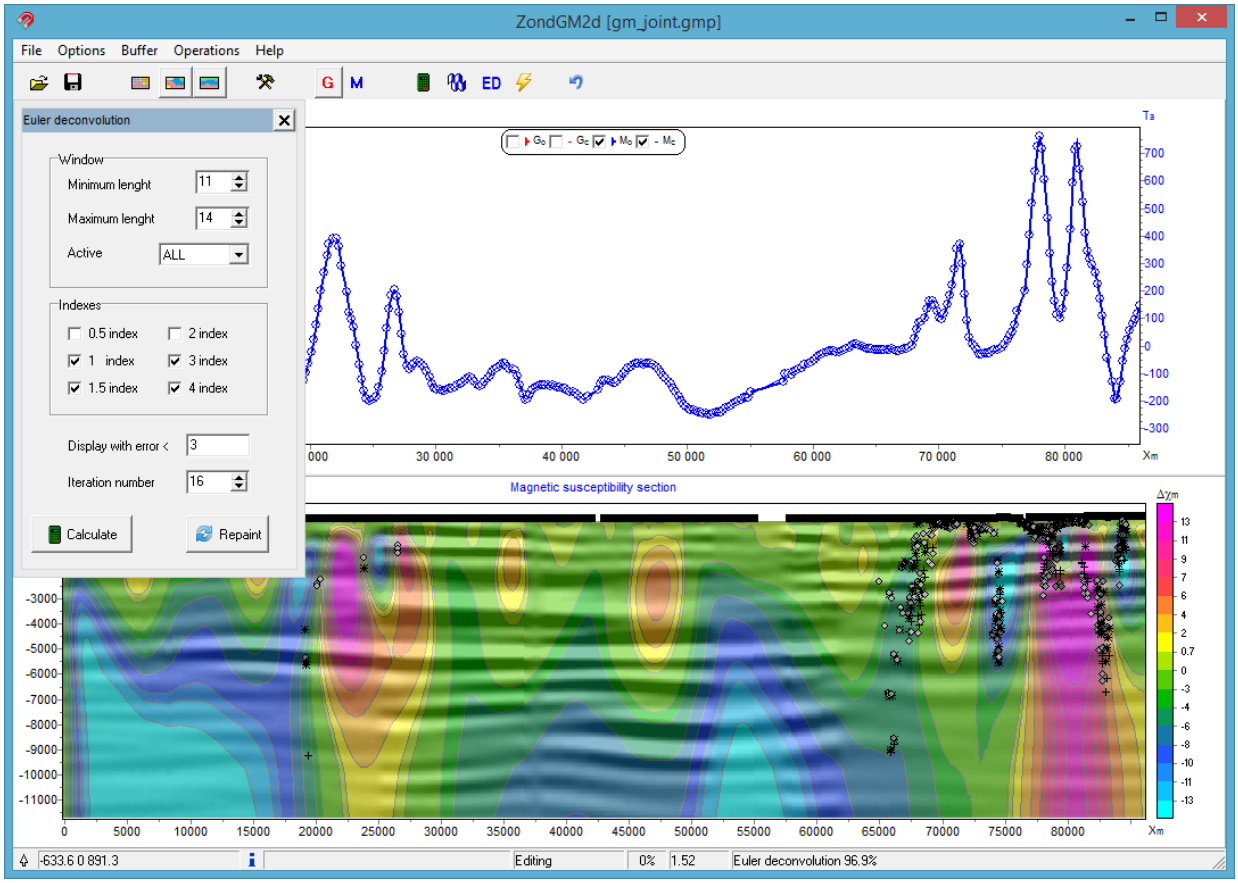
Para cada punto del perfil se toma una ventana de ancho W y se resuelve la ecuación de Euler

$$(x - x_0)\frac{\partial T}{\partial x} + (z - z_0)\frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T),$$

donde (x_0, z_0) es la posición de la fuente, N el índice estructural y B el fondo regional. Las incógnitas x_0, z_0, B (y N en modo automático) se hallan por mínimos cuadrados con varias iteraciones de refinamiento.

Controles de la ventana:

- **Window / Size, m** — ancho de la ventana W. Por defecto, 10 pasos entre puntos.
- **Window / Auto** — ancho de ventana automático. A partir del tamaño dado, la ventana se amplía en pasos del 10 %. Se busca una solución para cada tamaño hasta que el número de puntos supera cuatro veces el inicial (o se prueban 20 tamaños). Se elige la solución de error mínimo.
- **Structure index / Value** — índice estructural: 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4 o **Auto**. En modo **Auto** el índice se ajusta en cada ventana junto con la posición de la fuente mediante búsqueda global (200 pasos de temperatura con 20 pruebas) en el intervalo 0,49–3,1. Para el campo magnético: N = 0 — contacto, N ≈ 0,5 — escalón, N = 1 — dique o sill, N = 2 — cilindro horizontal, N = 3 — dipolo (esfera). Para la gravedad los valores son una unidad menores.
- **Iteration number** — número de iteraciones del problema local en la ventana.
- **Display with error <** — mostrar las soluciones cuyo error relativo en la ventana es menor que el valor dado, %.
- **Calculate** — ejecutar la deconvolución; **Repaint** — redibujar las soluciones con un nuevo umbral de error sin recalcular.



Ejemplo de deconvolución de Euler para datos de perfil

Correcciones de esta versión: en el refinamiento local con índice ajustado, la limitación del índice daba siempre 5 (min y max estaban intercambiados); ahora el índice se limita al intervalo 0–5. El ancho de ventana se lee una vez antes del bucle por puntos, no en cada punto. Si en el perfil no hay puntos con ambas derivadas, el cálculo no empieza. El contorno del modelo se construye una sola vez y los arreglos de la ventana se reservan de inmediato con el tamaño necesario. Esto acelera los perfiles largos sin cambiar el resultado.

OPCIONES AVANZADAS DEL PROGRAMA

Algoritmos de inversión

Funcional y suavizado

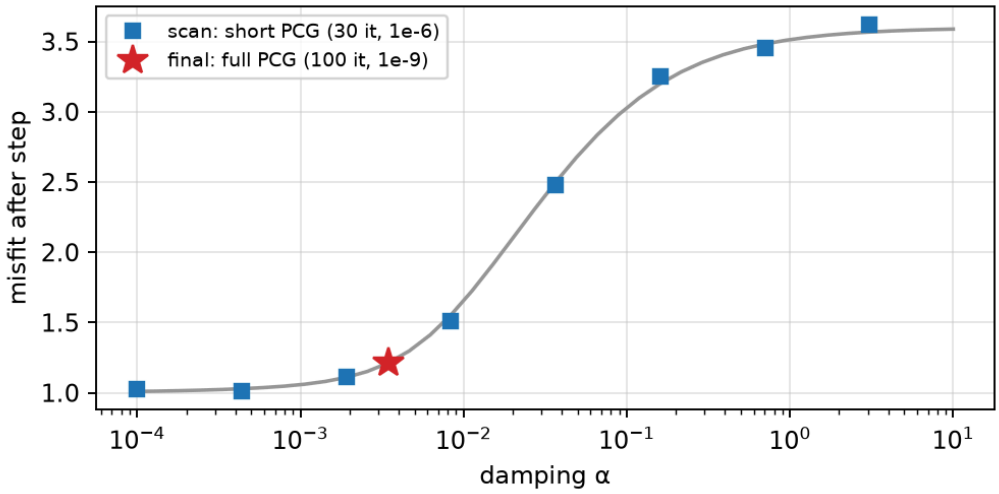
En cada iteración se resuelve el problema linealizado

$$(J^T W J + \alpha (C^T C + c_p I))\,\Delta m = J^T W\,\Delta d - \alpha (C^T C + c_p I)(m - m_0),$$

donde J es la matriz de sensibilidad (jacobiano), W los pesos de los datos, C el operador de suavizado (diferencias de parámetros de celdas vecinas ponderadas por **Smoothness ratio** y **Depth smoothing**), c_p el valor del estabilizador (**Options/Inversion/Smoothness/Stabilizer**) y m_0 el modelo de referencia (Median, «0», Start model, Previous).

En esta versión el estabilizador se añade a $C^T C$ como término diagonal $C^T C + c_p I$. Antes estaba dentro del operador, $(C + c_p)^T (C + c_p)$, lo que producía términos cruzados adicionales dependientes del número de vecinos. En las normas L1 y L0 el estabilizador se añade al operador ponderado de la misma forma.

Elección del parámetro de suavizado (amortiguamiento)



Elección del amortiguamiento: barrido rápido y solución exacta para el valor elegido

El parámetro α se elige en cada iteración barriendo valores en escala logarítmica. Para cada valor de prueba se resuelve el sistema y se estima el desajuste. Con **Lcurve** activado se elige el punto de máxima curvatura de la curva L; si no, el valor de mínimo desajuste.

Durante el barrido el sistema se resuelve de forma aproximada: como máximo 30 iteraciones de gradientes conjugados con tolerancia 10^{-6}. Para el valor elegido se hace una solución exacta: hasta 100 iteraciones con tolerancia 10^{-9}. Esto reduce varias veces el tiempo del barrido, mientras que el resultado de la iteración lo determina la solución exacta.

El producto matriz-vector de los gradientes conjugados se hace en una sola pasada por la matriz sin arreglos temporales: 196 → 118 ms en el modelo de prueba. En la inversión conjunta la misma fusión redujo el tiempo de 405 a 234 ms.

Normas del estabilizador y robustez

- **L2** — minimización del cuadrado del gradiente del modelo, distribuciones suaves.
- **L1** — los pesos del operador se recalculan según las diferencias actuales de parámetros (mínimos cuadrados reponderados iterativamente); las fronteras quedan nítidas.
- **L0** — soporte mínimo: el modelo se concentra en cuerpos compactos.
- **Robust** — se reducen los pesos de los datos con desajustes grandes.
- **Lim based inv** — los parámetros se transforman para quedar dentro de los límites; las derivadas se recalculan con la misma transformación.

Inversión conjunta

En la inversión conjunta de datos gravimétricos y magnéticos ambos modelos son incógnitas (el número de parámetros se duplica). El acoplamiento se define con el criterio (**Common correlation**, **Global-local correlation**, **Variation information**, **Gramian**). Cada criterio usa sus propios límites del segundo modelo. Si el usuario no fija los límites del segundo campo, se usan valores por defecto.

Correcciones: en la inversión conjunta gravimétrica-magnética sin **Lim based inv** el índice del segundo campo no estaba definido y los límites del segundo modelo se tomaban de una celda aleatoria; en la inversión conjunta con datos eléctricos, los límites de resistividad no definidos se sustituían por el código de error. Ahora en ambos casos se usan los índices correctos y valores por defecto.

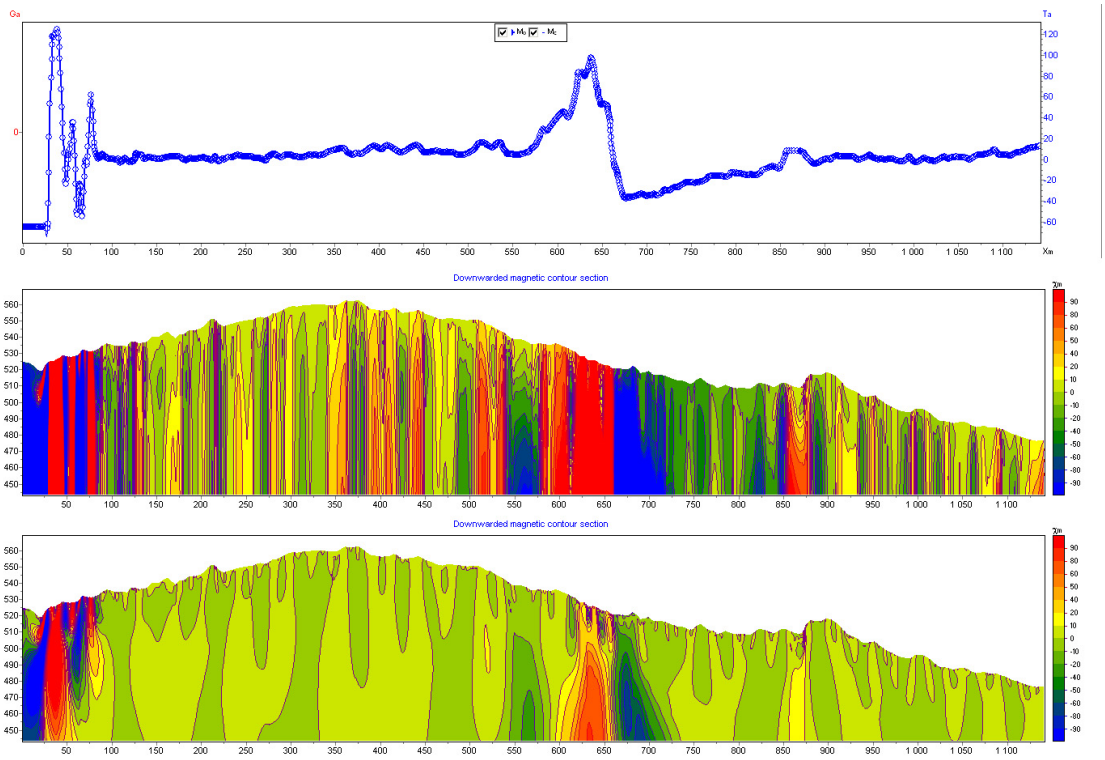
Inversión probabilística

Probability inversion y **Compact probability inversion** (botón de transformación rápida) son una optimización global por recocido simulado muy rápido (VFSA). En cada paso el modelo se perturba aleatoriamente con una «temperatura» que decrece como $T_0 \exp(-k^{1/n})$ y después se suaviza sobre las celdas vecinas. Se calcula $p = \exp(-\Delta E/T)$; el modelo se acepta si p > 0,1 (siempre si el desajuste disminuye y, si aumenta, cuando el aumento es menor que $T\ln 10$). Es un umbral determinista en lugar del número aleatorio del recocido clásico; se mantiene sin cambios.

En esta versión las celdas sin vecinos ya no producen una división 0/0. Tras el promediado el parámetro se limita a los límites de la celda. El desajuste medio no se divide por cero si no hay puntos activos. La copia de arreglos en el bucle se ha sustituido por copia en arreglos reservados de antemano. El problema directo en el bucle usa la matriz de sensibilidad en caché: el bucle exterior recorre las celdas y la fila de la estación se lee de forma contigua.

Prolongación hacia abajo

La prolongación del campo hacia abajo es una transformación para separar las componentes de alta y baja frecuencia. El programa ofrece la prolongación del campo medido, Downward continuation/Standard, y de la derivada vertical, Downward continuation/Normed. Al prolongar el campo medido domina la componente de baja frecuencia; al prolongar la derivada, la de alta frecuencia (Fig. 9).



A)

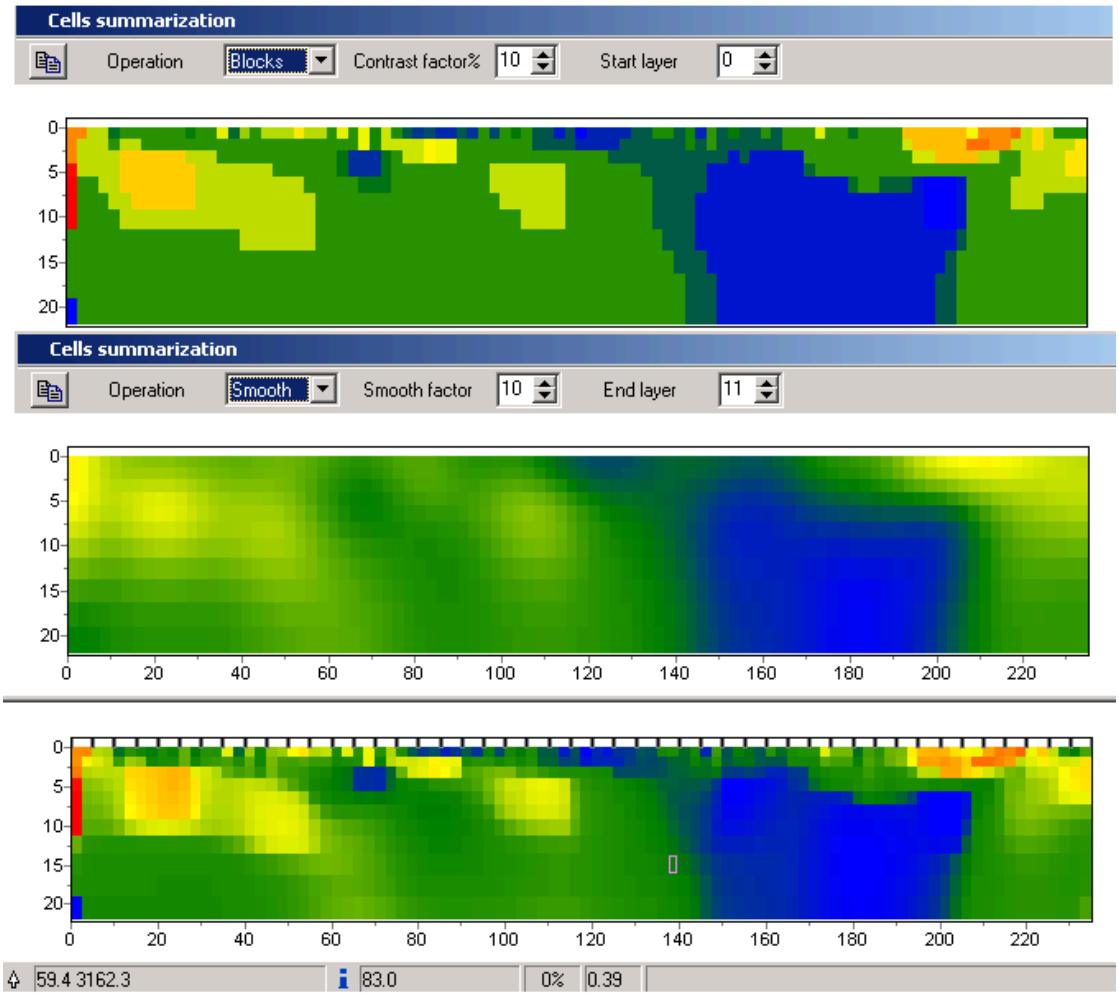
B)

C)

Fig. 9 a) Gráfica de Δg; b) prolongación hacia abajo del campo medido; c) prolongación hacia abajo de la derivada vertical.

Diálogo Cell summarization

La opción Cell summarization permite suavizar o hacer más grueso (dividir en bloques) el modelo actual. El modelo de bloques puede usarse en la inversión de tipo Blocks, en la que se ajustan los parámetros de cada bloque. Antes de dividir en bloques conviene hacer una inversión focalizada.



En el modo Blocks, según el parámetro de contraste (Contrast factor), las celdas de parámetros similares se agrupan en áreas de valor constante. La opción Start layers indica la capa a partir de la cual se aplica la operación.

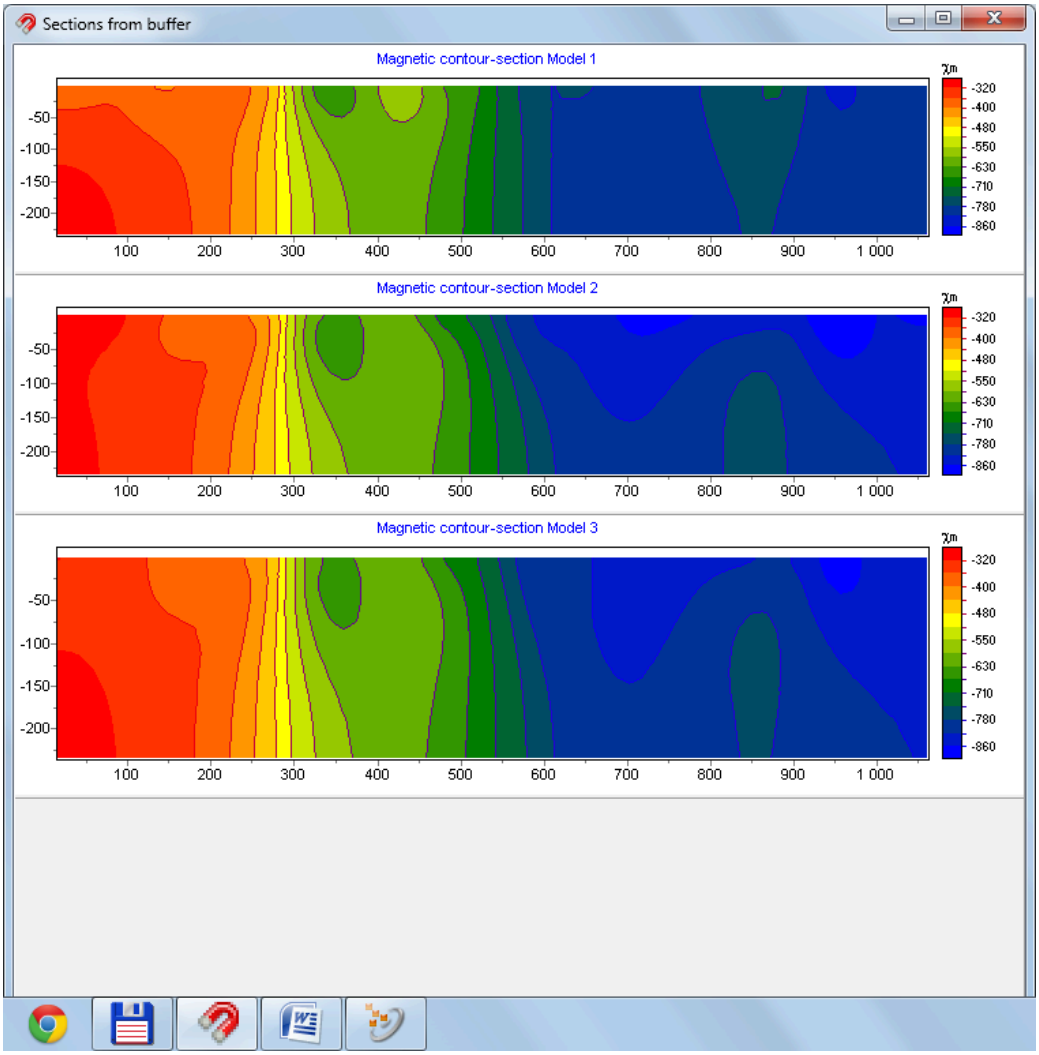
En el modo Smooth, según el factor de suavizado (Smooth factor), se promedian los parámetros de las celdas. La opción End layers indica la capa hasta la cual se aplica la operación.

El botón  copia el modelo obtenido al editor de modelo.

Opción «Buffer» del menú principal

La opción Buffer permite comparar modelos obtenidos con distintos parámetros de inversión y ajustes (con datos geológicos adicionales, filtros, etc.). Todos los modelos se muestran con la misma paleta y las mismas escalas.

Tras obtener un modelo, abra la pestaña Buffer del menú principal y elija Model 1. El programa pide un nombre para el modelo actual, que puede incluir los parámetros usados. El modelo se guarda y puede hacerse una nueva inversión con otros ajustes y guardarla como Model 2. Se pueden guardar hasta cinco modelos. Para abrir la ventana de modelos guardados elija Buffer/Open.



Editor de secciones geológicas

El módulo **Geological editor** permite construir rápidamente una sección geológica a partir de los resultados de la interpretación del perfil.

Los resultados de la interpretación geofísica sirven como imagen de fondo sobre la que se construye el modelo geológico. Al crear el modelo se definen objetos locales y capas, sobre los que se dibuja la textura geológica elegida por el intérprete. El módulo también muestra datos de sondeos, lo que facilita la construcción del modelo.

El objetivo principal del módulo es construir rápidamente secciones geológicas con los resultados geofísicos y exportarlas a sistemas CAD.

Antes de empezar hay que elegir con cuidado el tipo de sección y sus ajustes gráficos. La mejor variante es mostrar la sección en isolíneas.

Después se abre **Geological editor** y empieza el trabajo con la sección. Los cuerpos y capas se definen como polígonos cerrados y abiertos, con color y textura.

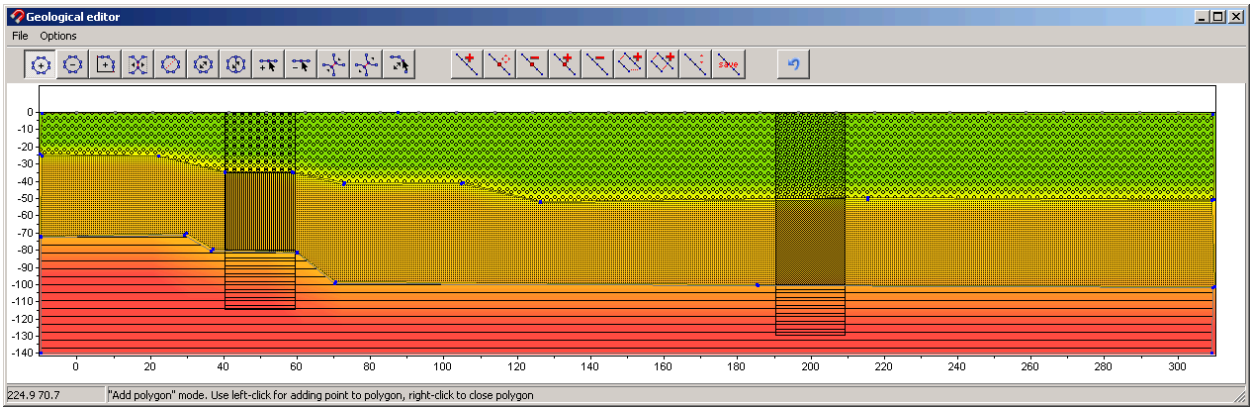


Fig. 10 Ventana **Geological Editor**

Los botones de edición de polígonos y líneas están en la barra de herramientas de **Geological editor**.

El modo **Add polygon** se activa con el botón . Crea un polígono aislado: clic izquierdo para añadir puntos, clic derecho para cerrarlo. Si el polígono no es válido (caras que se cruzan u otro objeto dentro), no se puede cerrar. Evite puntos demasiado próximos.

El modo **Delete polygon** se activa con el botón . Elimina un polígono con clic derecho sobre él; el contorno se vuelve rojo cuando el cursor está dentro.

El modo **Create a joined polygon** se activa con el botón . Crea un polígono unido a polígonos existentes, a los bordes del modelo o al relieve. Clic izquierdo para añadir puntos, clic derecho para cerrar a través del borde del área acoplada. El primer y el último punto deben estar en el borde exterior del área acoplada (que se vuelve rojo al acercar el cursor). Si no es posible, el programa no cierra el polígono y elimina los puntos. Los polígonos unidos a los bordes izquierdo, derecho e inferior se extienden al infinito en esas direcciones.

El modo **Disconnect polygon** se activa con el botón . Separa un polígono de los adyacentes o de los bordes del modelo (pierde la extensión infinita). Clic derecho sobre el polígono; después puede moverse con **Move polygon**.

El modo **Split polygon** se activa con el botón . Divide un polígono en dos polígonos conectados mediante dos puntos en sus bordes o nodos: clic izquierdo para el primero, clic derecho para el segundo. Si no es posible, la frontera se elimina.

El modo **Move polygon** se activa con el botón . Mueve los puntos no conectados de un polígono (o el polígono entero si no tiene puntos comunes). Clic izquierdo para elegir, clic derecho para fijar. Si no es posible, el polígono vuelve a su posición.

El modo **Move connected polygons** se activa con el botón . Mueve un polígono y todos los conectados con él. Clic izquierdo para elegir, clic derecho para fijar.

El modo **Add point** se activa con el botón . Añade un punto en el borde de un polígono con clic derecho.

El modo **Remove point** se activa con el botón . Elimina un punto con clic derecho. No es posible si las caras se cruzan, si un polígono queda dentro de otro o si quedarían menos de tres puntos.

El modo **Merge points** se activa con el botón . Une dos puntos en uno, uniéndolos al borde de otro polígono o a los bordes del modelo.

El modo **Disconnect points** se activa con el botón . Separa puntos unidos anteriormente: clic derecho sobre el punto. En lugar de un punto común aparece un conjunto de puntos separados, cada uno de su polígono.

El modo **Move point** se activa con el botón . Mueve un punto del polígono: clic izquierdo para elegirlo, clic derecho para fijar la nueva posición. Si las caras se cruzan, el punto vuelve a su posición. Los puntos situados en los bordes del modelo solo se mueven a lo largo de esos bordes.

Diálogo de parámetros del polígono

Se abre con doble clic sobre el polígono.

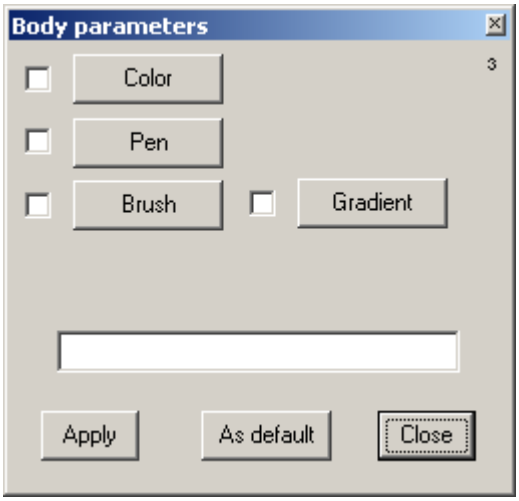


Fig. 11 Diálogo de parámetros del polígono

Color — color de relleno; si la casilla está activada, se aplica a todos los polígonos.

Pen — parámetros del borde; si está activada, se aplican a todos los polígonos.

Brush — parámetros del relleno; si está activada, se aplican a todos los polígonos.

Gradient — relleno en degradado.

El texto del campo inferior se muestra sobre el polígono.

Botones de creación y edición de líneas:

-  — Añadir línea
-  — Mover nodo
-  — Eliminar nodo

-  — Añadir nodo
-  — Eliminar línea
-  — Crear un polígono a partir de dos líneas
-  — Crear un polígono a partir de dos líneas
-  — Mover línea
-  — Guardar línea

El menú **Options** de **Geological editor** contiene:

Automatic scaling — escala automática

Model setup — diálogo de configuración del área del modelo

Load borehole data — cargar datos litológicos

Remove borehole data — eliminar datos litológicos

Output settings — parámetros de la imagen exportada

Export to DXF — exportar el modelo a DXF.

Trabajo con datos areales y visualización 3D

Para definir líneas de perfil elija en el menú principal **Options/Set lines survey**. Aparece el diálogo **Line settings** (Fig. 12) con las posiciones de medición del área.

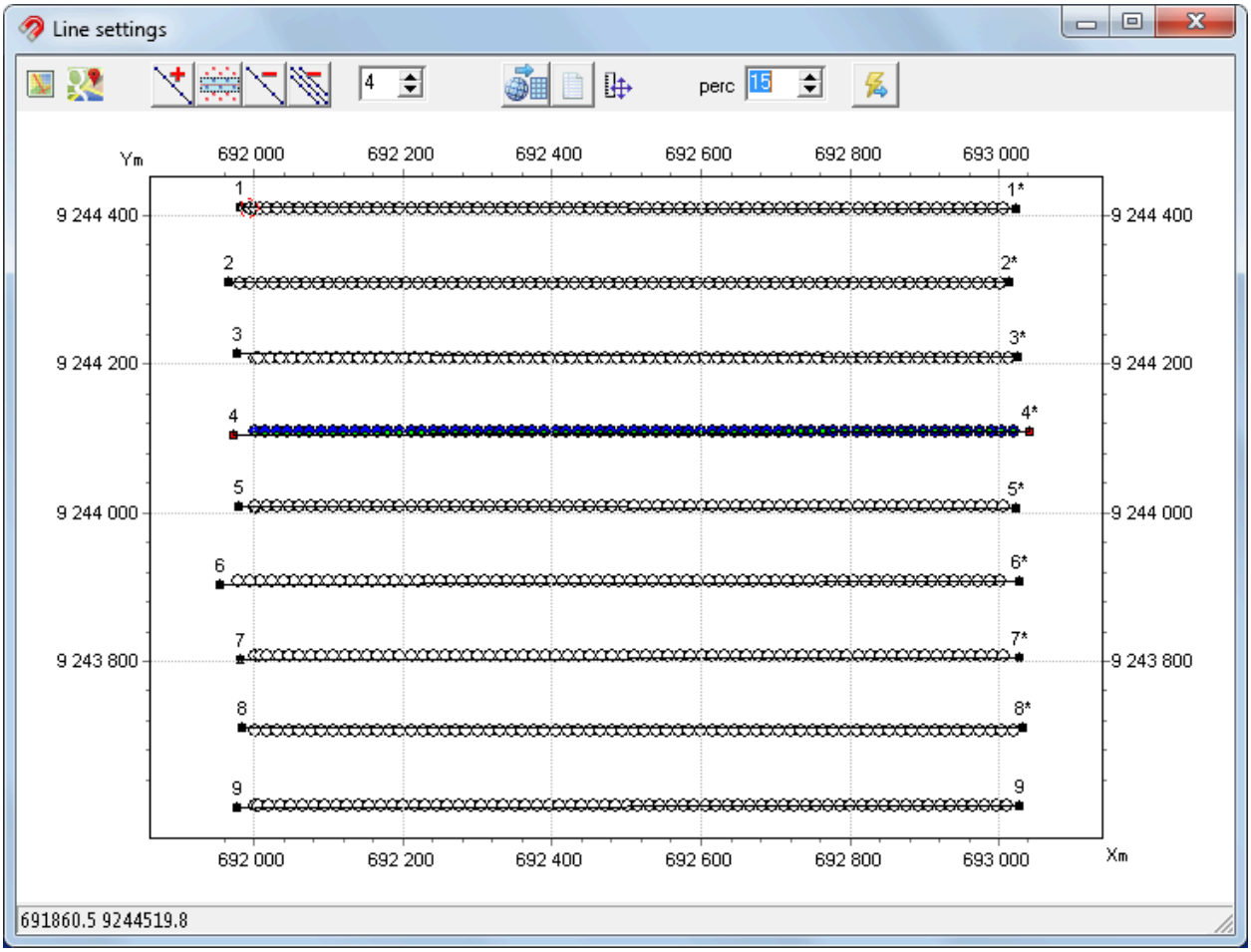


Fig. 12 Diálogo Line settings para trabajar con datos areales

El panel principal del diálogo contiene las siguientes funciones:

- — **Map -** cargar y mostrar un mapa ráster

  Topography - mostrar isolíneas del relieve

  Gravity - mostrar isolíneas del campo gravimétrico medido

  Magnetic - mostrar isolíneas del campo magnético medido
- — Cargar mapa de Google
- — Añadir línea de perfil. Clic izquierdo para los puntos de la línea, clic derecho para el último punto
- — Eliminar todos los perfiles.
- — Incluir automáticamente los puntos de medición en el perfil: los puntos dentro de un área rectangular alrededor de la línea.
- — Eliminar el perfil actual
- — Convertir coordenadas geográficas en rectangulares. Si el archivo contiene coordenadas geográficas (latitud y longitud), deben convertirse con este botón.
- — Definir coordenadas en una tabla

-  — Escala igual en los ejes o máximo llenado de la ventana.
- **perc** — Tamaño del área de selección automática de puntos del perfil
-  — Pasar al modo de inversión para el sistema de perfiles seleccionado

El programa permite definir varios perfiles a la vez. Tras definir un perfil y seleccionar sus puntos, los puntos incluidos se muestran en azul. Un punto puede excluirse o incluirse con clic izquierdo. Si la línea no pasa por los puntos, la proyección del punto sobre el perfil se muestra en verde.

Para ver y editar las coordenadas de un punto, haga clic derecho sobre él; aparece una ventana con las coordenadas editables.

Tras definir los perfiles pulse el botón del modo de interpretación; aparece la ventana principal. Para cambiar de perfil use la ventana **Active line index**  de la barra de herramientas principal.

La opción **Graphics map** (Fig. 13) muestra en planta las gráficas del parámetro elegido (campo magnético o gravimétrico) para todos los perfiles. Para cambiar la escala haga clic izquierdo en el área de gráficas y use la rueda del ratón. En la leyenda de la derecha se activa o desactiva cada perfil. Shift + clic izquierdo en la leyenda deja visible una sola gráfica; la rueda pasa a las demás. Para configurar los ejes haga clic derecho con Shift pulsado (véase Editor de ejes).

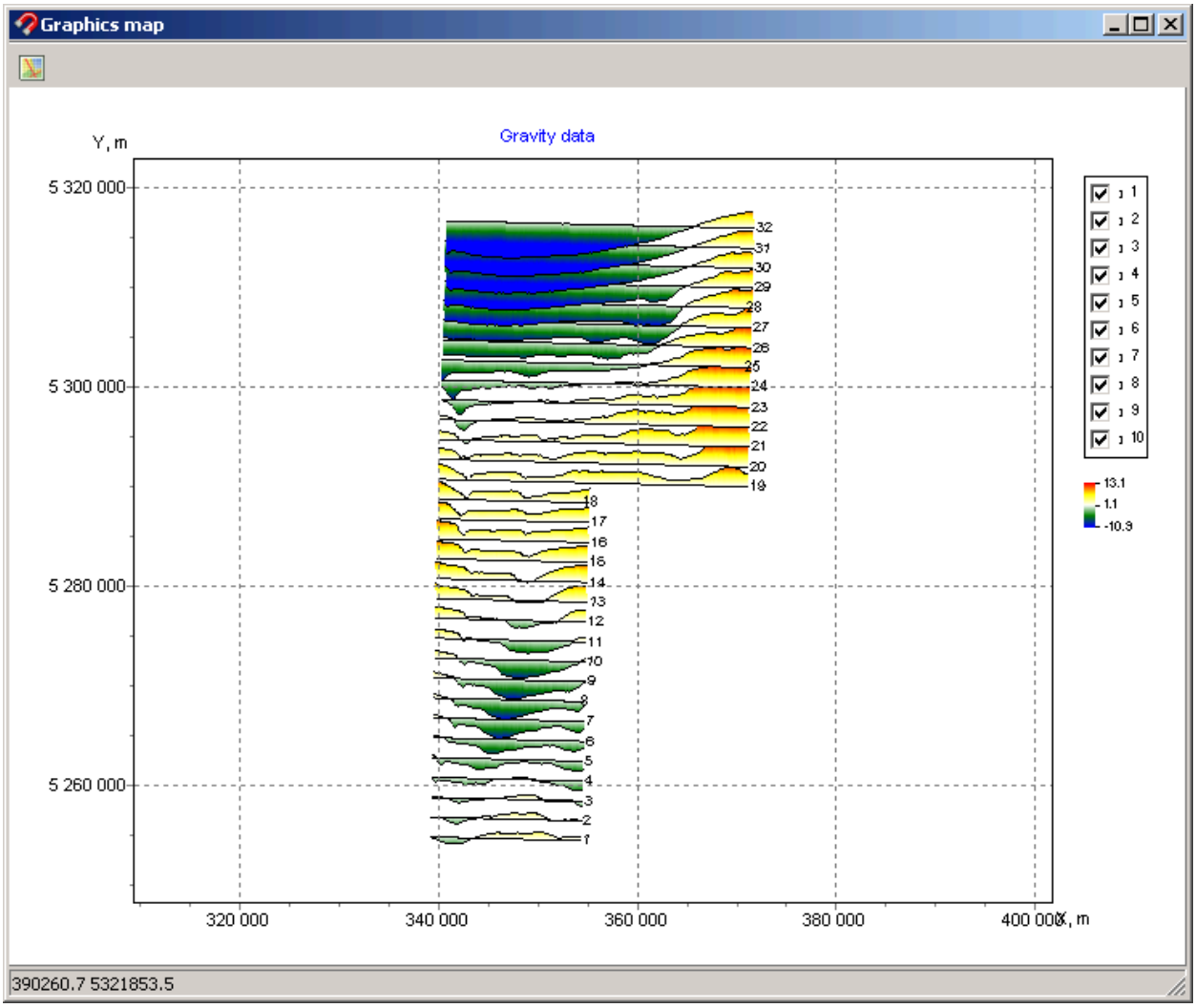


Fig. 13 Ventana **Graphics map**

Opción **3D sections plot (Options/Modules/3D sections plot)**

Se usa para la visualización 3D de los resultados de la interpretación de perfiles. Aparece la ventana **3D sections viewer**, cuya barra de herramientas contiene:

-  — Mostrar como modelo de bloques
-  — Mostrar como modelo de capas horizontales
-  — Mostrar en el modo de modelado poligonal
-  — Vista previa de impresión
-  — Diálogo de parámetros del modelo 3D
-  — Configurar ejes (véase Editor de ejes)
-  — Girar el modelo 3D
-  — Mostrar un plano horizontal. La profundidad del plano bajo la superficie se indica en kilómetros en la ventana de la derecha .
-  — Misma escala en todos los ejes. La ventana que aparece permite fijar la relación de escalas de cada eje.
- 

— Tipo de datos mostrados.

La ventana **3D section viewer** tiene tres pestañas:

La pestaña **Lines** (Fig. 14) permite editar las coordenadas de inicio y fin de los perfiles y elegir los perfiles que se muestran en el modelo 3D. A la izquierda hay una tabla con nombres y coordenadas de los extremos; para mostrar un perfil marque la última columna (V - visible). A la derecha se muestra la planta de perfiles; el perfil activo aparece en rojo. Las propiedades de los ejes se editan con clic derecho y Shift o con el botón  (véase Editor de ejes).

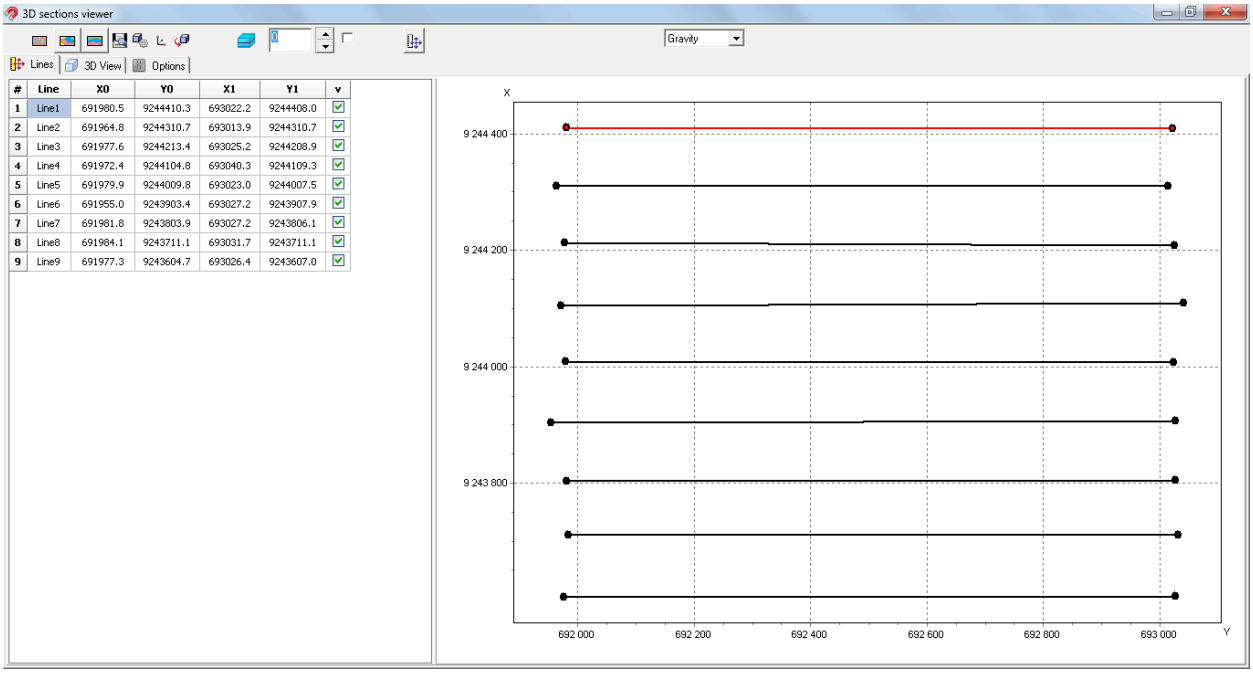


Fig. 14 Ventana **3D section viewer**, pestaña **Lines**.

La pestaña **3D view** (Fig. 15) sirve para ver los modelos 3D.

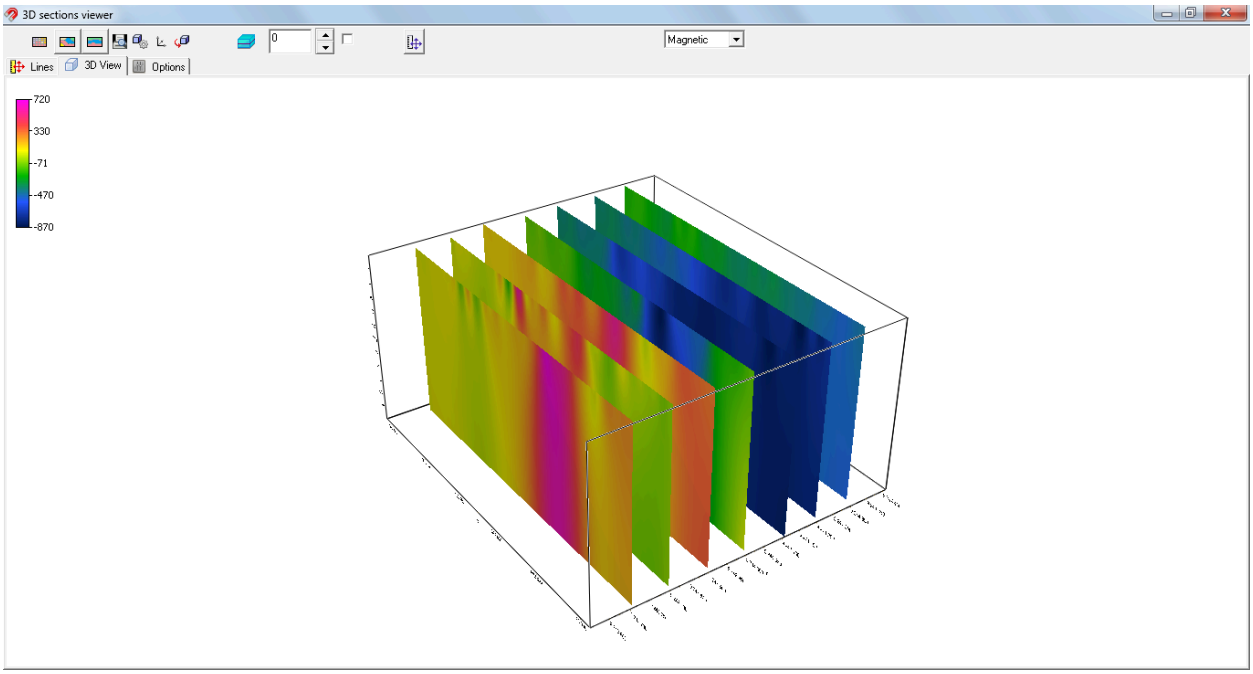


Fig. 15 Ventana **3D section viewer**, pestaña **3D view**

La pestaña **Options** (Fig. 16) ajusta la imagen.

El área *Color scale* define el relleno; el botón **Palette** abre el diálogo de relleno. El área *Color scale limits* permite fijar manualmente el mínimo y el máximo de la escala de colores o elegir el modo automático con la casilla correspondiente.

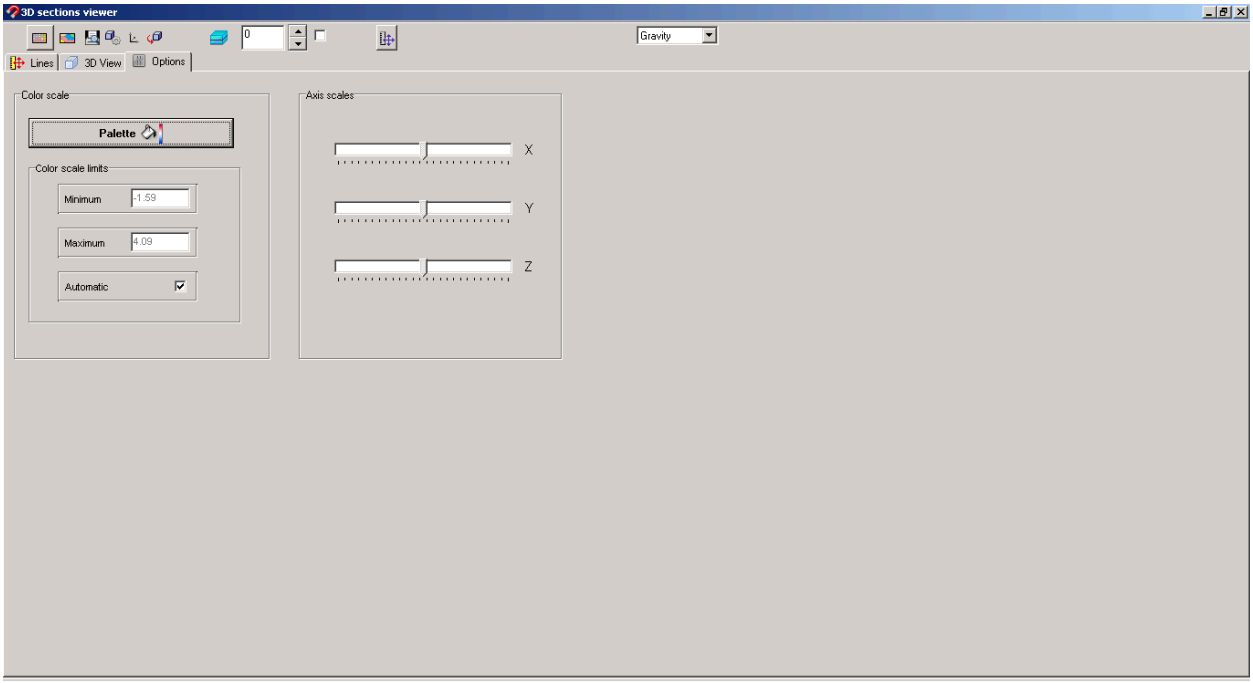


Fig. 16 Ventana **3D section viewer**, pestaña **Options**

El área *Axis scales* define la escala de los ejes; solo se aplica mientras está pulsado el botón .

Información a priori

La información a priori (datos de sondeos) permite obtener resultados de inversión más fiables. ZONDGM2D tiene un módulo integrado que muestra datos a priori de forma gráfica sobre las secciones.

Creación y carga del archivo litológico

Para crear un archivo estratigráfico elija **Options/Boreholes/Edit borehole data**. Aparece el diálogo **Add borehole data** (Fig. 17).

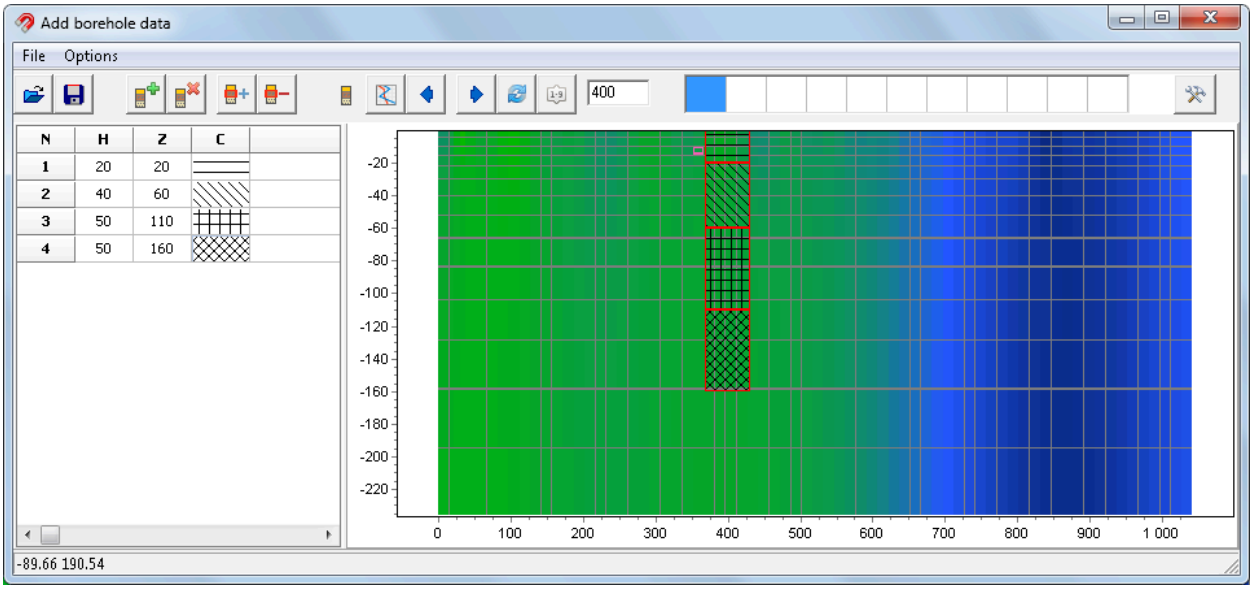


Fig. 17 Diálogo de creación del archivo litológico **Add borehole data**.

La barra de herramientas contiene:

-  — Abrir archivo litológico
-  — Guardar archivo litológico
-  — Crear un sondeo nuevo
-  — Eliminar sondeo
-  — Añadir capa al sondeo
-  — Eliminar capa del sondeo
-  — Modo columna litológica
-  — Modo datos de registros (logging)
-  — Sondeo anterior
-  — Sondeo siguiente
-  — Actualizar la ventana de datos
-  — Ordenar sondeos por coordenada
-  — Color de fondo de la ventana de sondeos (rojo en el ejemplo).
-  — Opciones adicionales

En el panel principal están las ventanas de coordenada horizontal (distancia desde el inicio del perfil), **horizontal position**, y de cota, **Position from surface**, en metros. Los cuadrados vacíos sirven para crear un conjunto de rellenos.

El módulo tiene dos ventanas principales. A la izquierda, **Data window**, con una tabla de columnas: N - número de capa, H - espesor en metros, Z - profundidad del muro en metros, C - tipo de relleno. A la derecha se muestran gráficamente los datos del sondeo.

Para empezar pulse ; aparece una tabla nueva en **Data Window**. Para añadir capas pulse . Después edite la tabla: espesor o profundidad del muro de cada capa y tipo de relleno según la litología. El editor de rellenos Pattern Color Editor se abre con doble clic en la columna C (Fig. 18). El programa ofrece una gran variedad de rellenos litológicos; la opción Color elige el color.

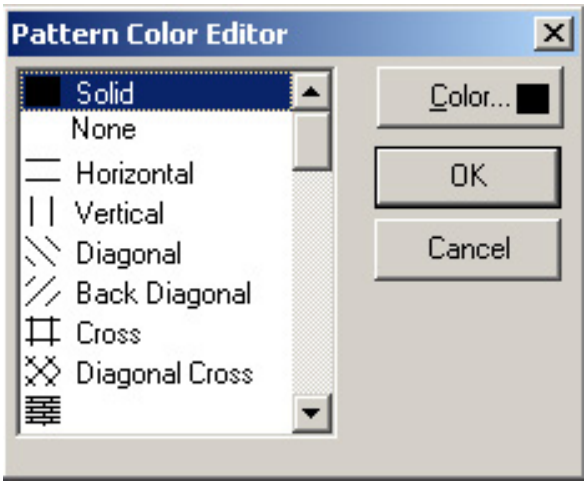


Fig. 18 Ventana del editor de rellenos

Al terminar pulse  y el sondeo aparece en la ventana gráfica. Después indique sus coordenadas horizontal y vertical en la barra de herramientas; el sondeo se dibuja según ellas. El sondeo activo se muestra en rojo.

Para trabajar con muchos sondeos puede crearse una paleta: elija un relleno en la columna de rellenos de **Data window** y haga clic derecho en el área de rellenos del panel principal. El conjunto se guarda con  - **Save default palette** y se usa en archivos nuevos de litología y registros ( - **Load default palette**).

La opción **Set percent** (botón ) cambia la escala de los datos de sondeo en la gráfica.

Al guardar se crean varios archivos auxiliares: ***.crt** - proyecto del módulo que puede cargarse en ZONDGM2D, y un ***.txt** por sondeo, con nombre según sus coordenadas horizontal y vertical. El formato se describe en la sección del archivo litológico.

Para cargar datos de sondeos use **Options/Borehole/Load borehole data**. Los datos se muestran en la sección del modelo y en el editor de modelo (Fig. 19).

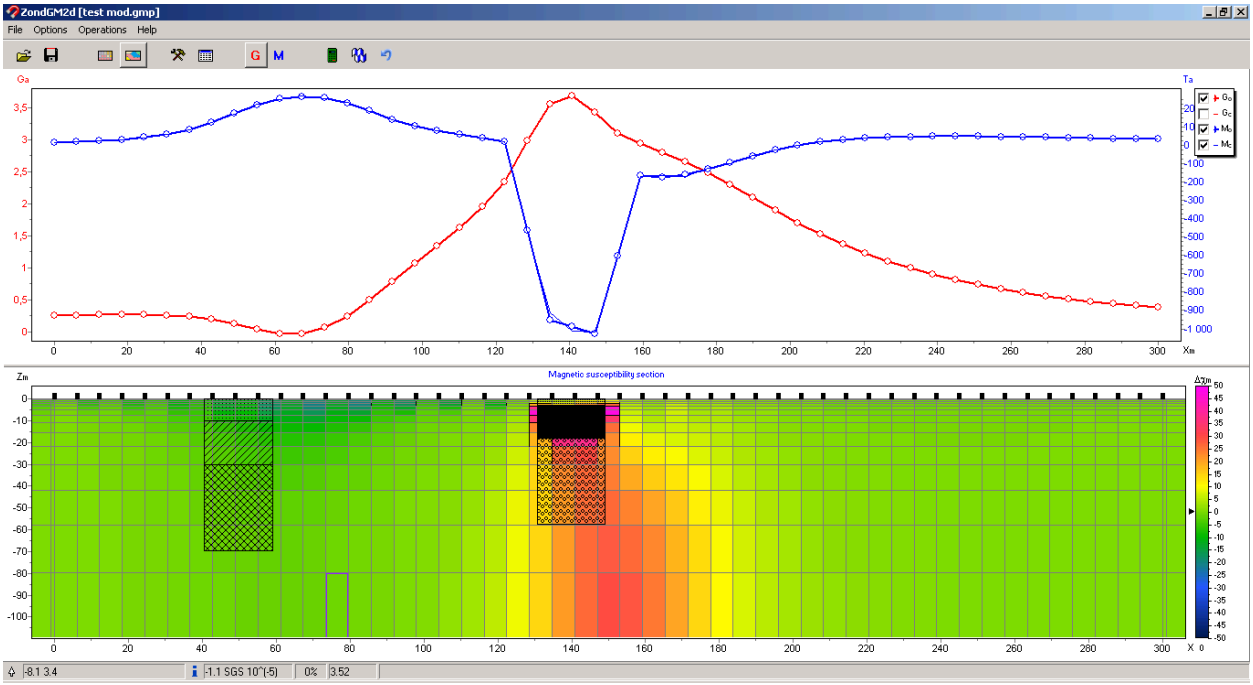


Fig. 19 Datos litológicos en la sección del editor.

Para cargar registros de sondeos prepare un archivo con el formato descrito en «Formato del archivo de registros y litología» y cárguelo con el botón .

Fronteras geológicas (diálogo Set boundaries)

El diálogo **Set boundaries** está en el menú **Options/Advancied** y permite tener en cuenta información geológica a priori en la inversión. Contiene los botones:

-  — Activar/desactivar el modo de edición de fronteras
-  — Añadir frontera nueva
-  — Eliminar todas las fronteras
-  — Guardar fronteras en archivo
-  — Cargar fronteras desde archivo

Incluir fronteras geológicas a priori en la inversión es uno de los métodos más importantes para mejorar la interpretación: aumenta la estabilidad, reduce la ambigüedad y da estructuras más verosímiles. En zonas del modelo con sensibilidad muy baja es prácticamente la única forma de obtener un resultado aceptable.

Con fronteras es preferible el algoritmo Occam. Normalmente se usan 1-2 fronteras; las fronteras geológicas no siempre coinciden con las petrofísicas.

Las fronteras sobre la sección de densidad o de susceptibilidad magnética deben trazarse según los datos de sondeos o la información a priori sobre la estructura. Con el modo de edición activado, clic izquierdo añade nodos y clic derecho cierra la frontera. Use pocos nodos; conviene que las fronteras sean suaves y pasen cerca de los nodos de la malla de inversión.

Tras crear las fronteras repita la inversión, que se calculará con ellas (Fig. 20 B).

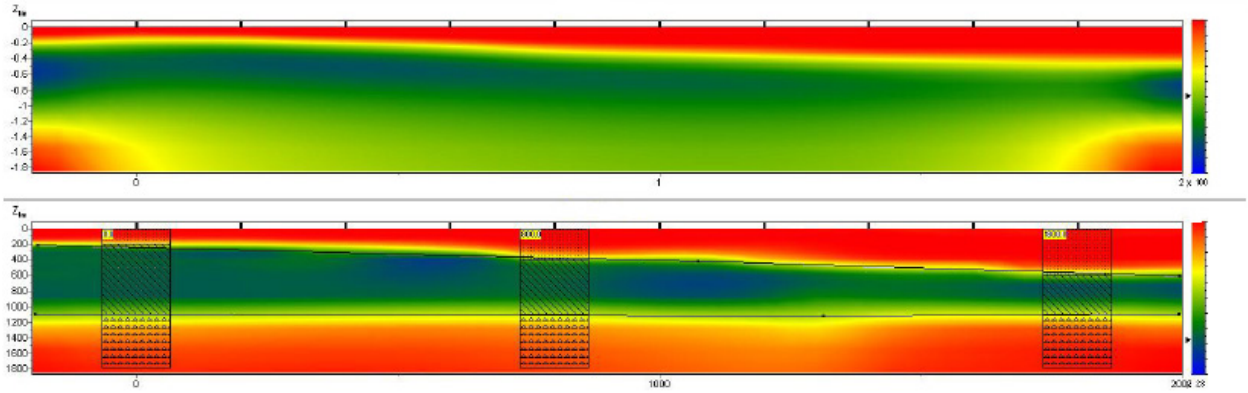


Fig. 20 Ejemplo de sección de inversión sin (A) y con (B) fronteras geológicas.

CONFIGURACIÓN DE LA INTERFAZ

Configuración de la paleta

El diálogo define la paleta de los objetos del programa y se abre con el botón **Palette** (Fig. 21). Permite elegir una de las paletas predefinidas (arco iris directo e inverso, escala de grises, etc.) o crear una escala propia. Para añadir un deslizador en la escala haga clic derecho con Ctrl pulsado; para eliminarlo pulse Delete. La paleta propia se guarda con el botón  y se carga con .

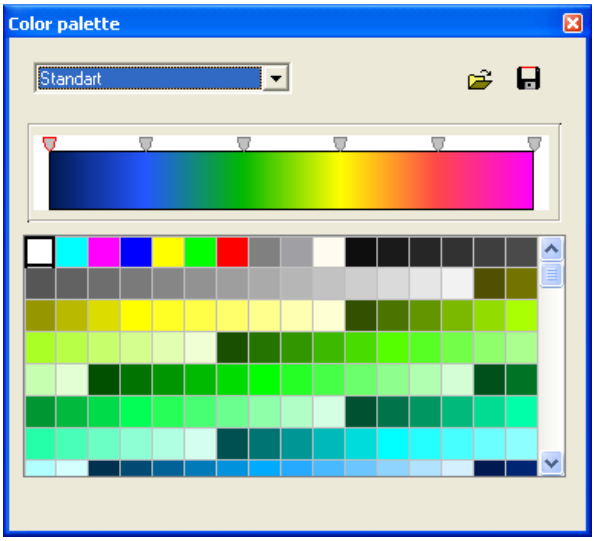


Fig. 21 Diálogo de configuración de la paleta.

Editor de ejes

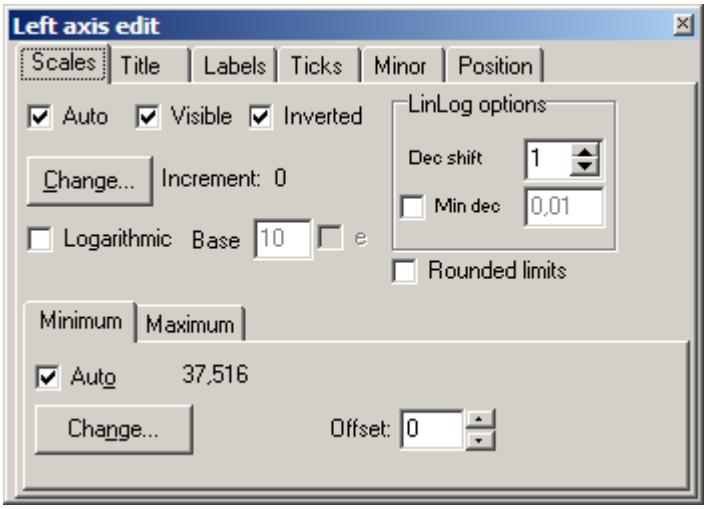


Fig. 22 Ventana del editor de ejes

El editor ajusta los parámetros gráficos y de escala de los ejes. Se abre con clic derecho sobre el eje con SHIFT pulsado. Aparece un menú con dos elementos (**Options** y **Default**): el primero abre el diálogo, el segundo restablece los valores por defecto.

La primera pestaña del diálogo, **Scales**, contiene los parámetros de escala del eje.

La opción **Auto** define cómo se eligen el mínimo y el máximo del eje. Si está activada, los límites se fijan automáticamente; si no, se usan los valores Minimum y Maximum del usuario.

La opción **Visible** muestra u oculta el eje.

La opción **Inverted** define la orientación del eje.

El botón **Increment change** abre el diálogo del paso de las etiquetas.

La opción **Logarithmic** elige escala logarítmica o lineal. Para datos que cambian de signo use además las opciones del campo **LinLog options**.

La opción **Base** fija la base del logaritmo del eje logarítmico.

El campo **LinLog options** contiene los ajustes del eje lineal-logarítmico, que permite representar en escala logarítmica datos que cambian de signo o contienen ceros.

La opción **Dec Shift** fija el desplazamiento (en décadas logarítmicas) respecto al límite máximo del eje en valor absoluto hacia cero. La década mínima (previa al cero) tiene escala lineal; las demás, logarítmica.

La opción **Min dec** fija el valor de la década mínima (previa al cero) si está activada.

La opción **Rounded limits** define si se redondean el mínimo y el máximo del eje.

Los campos **Minimum** y **Maximum** ajustan los límites del eje.

La opción **Auto** define si el límite se elige automáticamente o con el botón **Change**.

La opción **Offset** fija el desplazamiento del límite en porcentaje de su valor actual.

La pestaña **Title** ajusta el título del eje.

Pestaña **Style**:

La opción **Title** fija el texto del título.

La opción **Angle** fija el ángulo de rotación del título.

La opción **Size** fija la separación del título; con 0 se elige automáticamente.

La opción **Visible** muestra u oculta el título.

Pestaña **Text**:

El botón **Font** abre el diálogo de fuente del título.

El botón **Outline** abre el diálogo del contorno de las letras.

La opción **Inter-char spacing** fija el espaciado entre letras.

El botón **Gradient** abre el diálogo de relleno degradado del texto.

La opción **Outline gradient** indica si el degradado se aplica al contorno o al interior de las letras.

El botón **Shadow** abre el diálogo de sombra del título.

La pestaña **Labels** ajusta las etiquetas del eje.

Pestaña **Style**:

La opción **Visible** muestra u oculta las etiquetas.

La opción **Multiline** permite etiquetas de varias líneas.

La opción **Round first** redondea la primera etiqueta.

La opción **Label on axis** oculta las etiquetas que salen del eje.

La opción **Alternate** dispone las etiquetas en dos filas.

La opción **Size** fija la separación de las etiquetas; con 0 se elige automáticamente.

La opción **Angle** fija el ángulo de rotación de las etiquetas.

La opción **Min separation %** fija la separación mínima entre etiquetas en porcentaje.

Pestaña **Text**:

El botón **Font** abre el diálogo de fuente de las etiquetas.

El botón **Outline** abre el diálogo del contorno de las letras.

La opción **Inter-char spacing** fija el espaciado entre letras.

El botón **Gradient** abre el diálogo de relleno degradado de las etiquetas.

La opción **Outline gradient** indica si el degradado se aplica al contorno o al interior de las letras.

El botón **Shadow** abre el diálogo de sombra de las etiquetas.

La pestaña **Ticks** ajusta las marcas principales del eje.

El botón **Axis** abre el diálogo de la línea del eje.

El botón **Grid** abre el diálogo de la rejilla de las marcas principales.

El botón **Ticks** abre el diálogo de las marcas principales exteriores; la opción **Len** fija su longitud.

El botón **Inner** abre el diálogo de las marcas principales interiores; la opción **Len** fija su longitud.

La opción **Centered** centra la rejilla de marcas.

La opción **At labels only** muestra las marcas principales solo donde hay etiquetas.

La pestaña **Minor** ajusta las marcas intermedias.

El botón **Grid** abre el diálogo de la rejilla de marcas intermedias.

El botón **Ticks** abre el diálogo de las marcas intermedias exteriores; la opción **Length** fija su longitud.

El botón **Minor** abre el diálogo de las marcas intermedias interiores; la opción **Len** fija su longitud.

La opción **Count** fija el número de marcas intermedias entre las principales.

La pestaña **Position** define el tamaño y la posición del eje.

La opción **Position %** fija el desplazamiento del eje respecto a su posición estándar (en porcentaje del tamaño de la gráfica o en unidades de pantalla según la opción Units).

La opción **Start %** fija el desplazamiento del inicio del eje (en porcentaje del tamaño de la gráfica).

La opción **End %** fija el desplazamiento del final del eje (en porcentaje del tamaño de la gráfica).

Editor de gráficas

El editor de gráficas ajusta su aspecto. Se abre con clic derecho sobre la gráfica con SHIFT pulsado. Aparece un menú con dos elementos (**Options** y **Default**): el primero abre el

diálogo, el segundo restablece los valores por defecto.

La pestaña **Format** contiene los ajustes de la línea de unión.

El botón **Border** abre el diálogo de parámetros de la línea.

El botón **Color** abre el diálogo de color.

El botón **Pattern** abre el diálogo de trama.

El botón **Outline** abre el diálogo de la línea de unión de la gráfica.

El botón **Shadow** abre el diálogo de sombras.

La pestaña **Point** contiene los ajustes de los puntos.

La opción **Visible** muestra u oculta los puntos.

La opción **Style** fija la forma del punto.

La opción **Width** fija la anchura del punto en unidades de pantalla.

La opción **Height** fija la altura del punto en unidades de pantalla.

La opción **Inflate margins** define si el tamaño de la imagen se amplía según el tamaño de los puntos.

El botón **Pattern** abre el diálogo de relleno del punto.

El botón **Border** abre el diálogo del contorno del punto.

El botón **Gradient** abre el diálogo de relleno degradado del punto.

La pestaña **Marks** contiene los ajustes de las marcas de los puntos.

Pestaña **Style**.

La opción **Visible** muestra u oculta las marcas.

La opción **Draw every** dibuja una de cada dos, tres, etc. marcas según el valor elegido.

La opción **Angle** fija el ángulo de rotación de las marcas.

La opción **Clipped** define si se dibuja una marca situada fuera de los bordes de la gráfica.

La pestaña **Arrows** ajusta la flecha de la marca al punto.

El botón **Border** abre el diálogo de la línea de la flecha.

El botón **Pointer** abre el diálogo de la forma de la punta (opciones de la pestaña Point).

La opción **Length** fija la longitud de la flecha.

La opción **Distance** fija la distancia entre la punta y el punto.

La opción **Arrow head** fija el tipo de punta: **None** — la definida con **Pointer**; **Line** — punta clásica fina; **Solid** — punta clásica gruesa.

La opción **Size** fija el tamaño de la punta clásica.

La pestaña **Format** contiene los ajustes del marco de la marca.

El botón **Color** abre el diálogo del color de fondo del marco.

El botón **Frame** abre el diálogo de la línea del marco.

El botón **Pattern** abre el diálogo del fondo.

La opción **Bevel** fija el tipo de marco: normal, elevado o hundido.

La opción **Size** fija el grado de elevación o hundimiento.

La opción **Size** permite redondear las esquinas del marco.

Las opciones **Transparent** y **Transparency** fijan el grado de transparencia del marco.

Pestaña **Text**:

El botón **Font** abre el diálogo de fuente de las marcas.

El botón **Outline** abre el diálogo del contorno de las letras.

La opción **Inter-char spacing** fija el espaciado entre letras.

El botón **Gradient** abre el diálogo de relleno degradado del texto.

La opción **Outline gradient** indica si el degradado se aplica al contorno o al interior de las letras.

El botón **Shadow** abre el diálogo de sombra del texto.

Diálogo de vista previa de impresión

El diálogo se abre desde el menú principal Options/Print preview o con doble clic sobre cualquier objeto del programa.

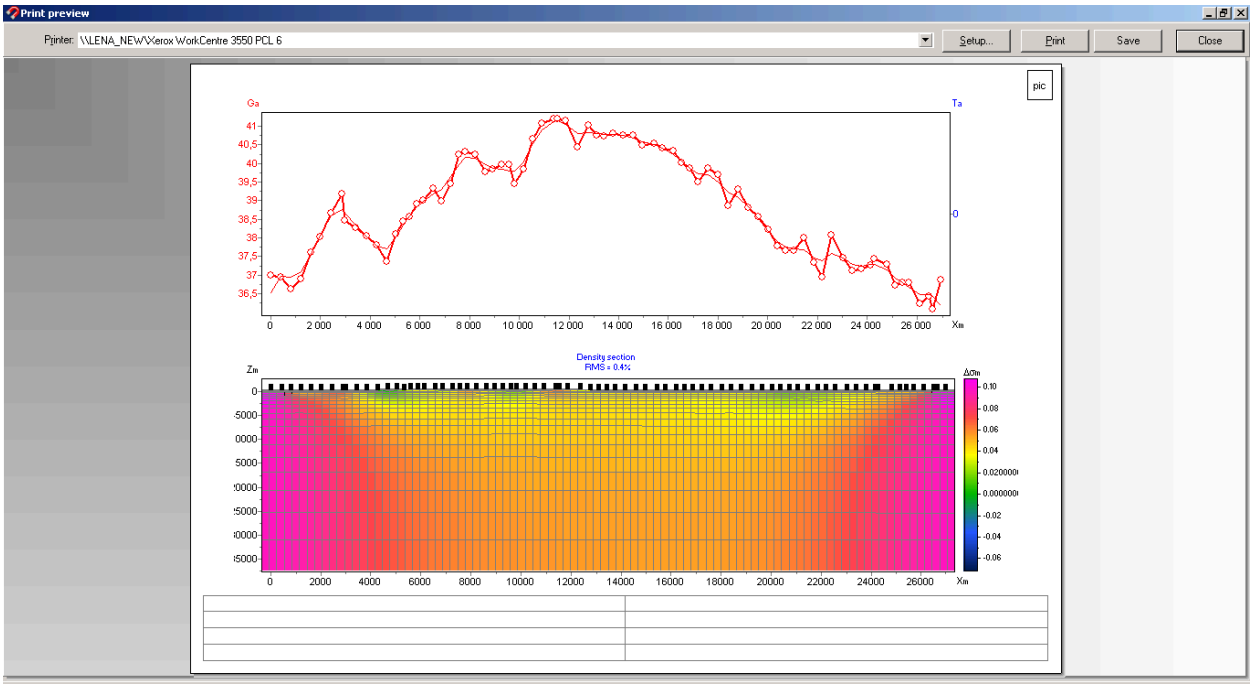


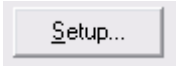
Fig. 23 Ventana **Print preview**

Para mover un objeto en la hoja use el botón izquierdo del ratón.

El menú principal de la ventana **Print Preview** contiene los botones:



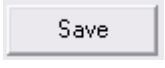
- Elegir impresora entre las configuradas.



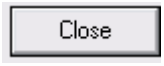
- Configuración de impresión: tamaño y orientación de la hoja, propiedades de impresión, páginas por hoja y otros parámetros.



- Enviar la figura a imprimir.



- Guardar en archivo de mapa de bits.



- Cerrar la ventana Print preview.

Los cuadrados de la parte superior de la hoja sirven para sellos, timbres o logotipos. Haga clic derecho en el cuadrado y elija la imagen ráster que desea insertar. El tamaño se cambia con el ratón.

En la parte inferior de la hoja hay una tabla editable. Para añadir texto haga clic derecho en la tabla y escriba el texto en la ventana. Los comentarios se guardan en archivo con el botón  y se cargan con .

Formato de los archivos de datos

Formato del archivo de datos

El programa usa un formato universal con las coordenadas y cotas de los puntos de medición. Todas las magnitudes geométricas se dan en metros.

Formato de datos del programa ZondGM.

El archivo de texto contiene las columnas:

prpos - posición del punto de medición en el perfil

LATITUDE - latitud

LONGITUDE - longitud

z - cota

GRAV - valor medido del campo gravimétrico (en mGal)

MAG - valor medido del campo magnético (en nT)

Ejemplo de archivo de datos:

prpos LATITUDE LONGITUDE z GRAV

479 -3.49.38.31598 -40.49.47.04385 156.645 977996.7625

478 -3.50.14.23385 -40.49.34.86847 176.749 977993.118

477 -3.50.41.81796 -40.49.12.96376 158.598 977996.16

476 -3.50.56.86075 -40.48.43.78614 153.596 977995.8746

475 -3.51.29.57703 -40.48.33.59533 163.494 977992.9616

474 -3.51.34.51079 -40.47.58.78146 150.784 977994.8251

473 -3.51.57.72425 -40.47.37.80829 173.923 977989.1426

472 -3.52.13.61573 -40.47.09.33508 151.016 977993.4726

471 -3.52.13.05078 -40.46.50.40375 164.658 977990.0839

470 -3.52.27.34988 -40.46.39.50728 170.948 977988.923

469 -3.52.44.12399 -40.46.27.26992 154.136 977992.3446

468 -3.52.54.85479 -40.46.09.14952 161.646 977990.9782

467 -3.53.10.34938 -40.45.59.98908 162.519 977990.9039

466 -3.53.27.27992 -40.46.01.57194 168.091 977990.0246

465 -3.53.45.00000 -40.46.02.08070 172.989 977989.2686

464 -3.53.50.90568 -40.45.46.82738 175.239 977988.88

Formato del archivo de registros y litología

Para crear un archivo litológico se recomienda el módulo integrado de ZONDGM2D. Los registros y la columna litológica se guardan en archivos de formato específico. El primer tipo

tiene extensión txt y contiene registros o litología. Estructura del archivo de registros:

La primera columna es la profundidad del punto (desde la superficie), la segunda el valor del registro. La tercera y la cuarta se rellenan con ceros.

Ejemplo de archivo de registros:

0.5 118.3035394 0 0

1 126.9002384 0 0

1.5 123.4170888 0 0

2 116.1519574 0 0

2.5 117.240884 0 0

3 111.9424174 0 0

3.5 142.0405875 0 0

4 125.3686538 0 0

4.5 521.0730567 0 0

5 735.5232592 0 0

5.5 707.7315998 0 0

6 706.3561614 0 0

6.5 725.9945623 0 0

7 722.433627 0 0

7.5 717.0991126 0 0

8 716.9836552 0 0

8.5 725.5024012 0 0

9 722.3551713 0 0

9.5 731.5717173 0 0

10 723.5097884 0 0

10.5 726.8844987 0 0

11 725.962034 0 0

11.5 743.2485878 0 0

12 726.4061156 0 0

12.5 734.399887 0 0

13 727.9166309 0 0

13.5 116.1921851 0 0

14 517.9613065 0 0

14.5 125.3706264 0 0

15 111.2952478 0 0

15.5 131.911879 0 0

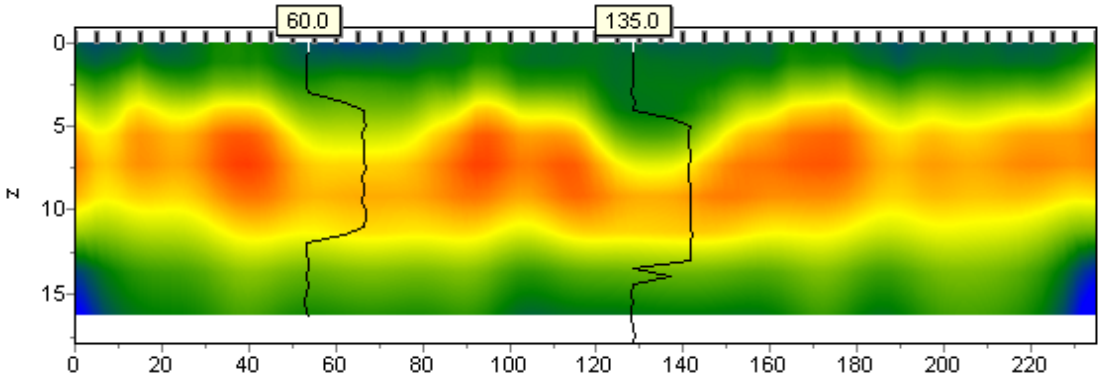
16 107.9217309 0 0

16.5 114.9327361 0 0

17 134.0939196 0 0

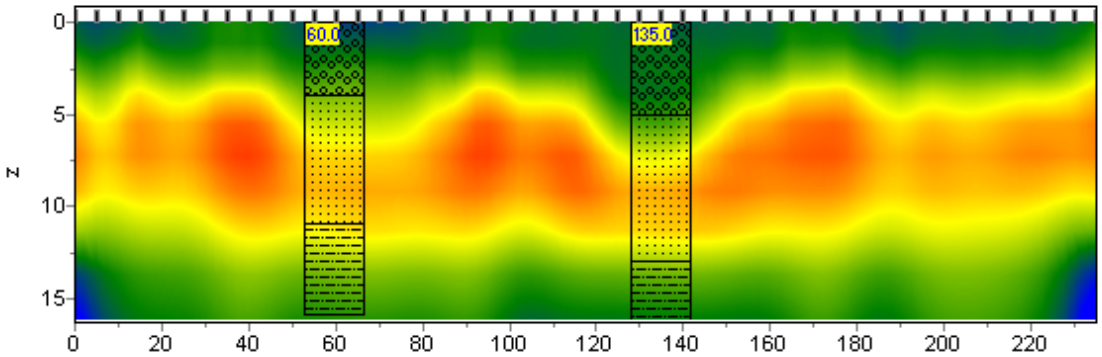
17.5 138.4457143 0 0

18 129.1165104 0 0

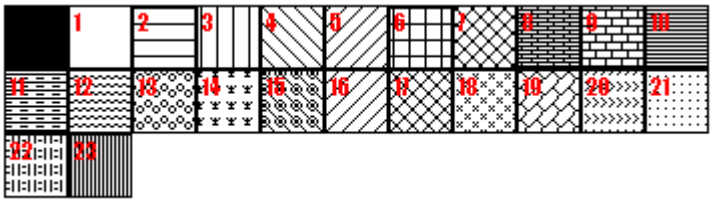


Estructura del archivo litológico:

La primera columna es la profundidad (desde la superficie) del horizonte litológico. La segunda se rellena con ceros. La tercera es el color de la capa en la escala litológica y la cuarta el tipo de trama.



Las primeras 23 tramas para la columna litológica:



Ejemplo de archivo litológico:

0 1 0 13 Techo de la capa 1

4 1 0 13 Muro de la capa 1

4 1 0 19 Techo de la capa 2

11 1 0 19 Muro de la capa 2

11 1 0 27 Techo de la capa 3

16 1 0 27 Muro de la capa 3

El segundo tipo tiene extensión *.crt: son archivos de control que indican el tipo de datos y la forma de visualización. A continuación se describe la estructura del CRT para visualizar

litología y registros de cualquier número de sondeos.

2280.txt Primera línea — nombre del archivo de registros o litología

brhl2280 Segunda línea — nombre del sondeo (se muestra sobre él)

18 2 2 1 0 1 0 0 Tercera línea — parámetros de control:

18 — coordenada del sondeo en el perfil.

2 — anchura de la imagen (en porcentaje de la longitud del perfil, normalmente 1 - 20).

2 — tipo de visualización 0 - 3.

0 - registros (como gráfica);

1 - registros (columna de color interpolada), con la escala de colores de la sección;

2 - columna litológica;

3 - registros (columna de color), los colores corresponden a la escala de colores del modelo;

1 — parámetro de normalización de registros 0 - 2.

0,1 — mismo mínimo y máximo para todos los datos;

1,2 - se resta el valor medio de cada registro;

0 - índice del método de registro (si se muestran varios métodos, deben indicarse los índices de todos)

0 — n-1, donde n es el número de métodos.

1 — color de la gráfica.

0 — escala de datos logarítmica 0 o lineal 1.

0 — desplazamiento vertical del sondeo respecto a la superficie.

3246.txt Descripción del siguiente sondeo del perfil

brhl3246

102 2 2 1 0 1 0 0

REVISIÓN Y ACELERACIÓN DE MÓDULOS (VERSIÓN 2026)

Se revisaron todos los módulos del proyecto, salvo las bibliotecas estándar. Las aceleraciones se hicieron donde eran sencillas y no cambian el algoritmo. A continuación se indican los cambios que afectan al usuario.

Sección	Cambio	Efecto
Producto matriz-vector en la inversión (RES2dFEM)	Pasada fusionada sin arreglos temporales	196 → 118 ms
Inversión conjunta	Igual para dos modelos	405 → 234 ms
Elección del amortiguamiento	Soluciones aproximadas en el barrido, exacta para el valor elegido	Barrido varias veces más rápido
Problema directo con la matriz en caché	Bucle exterior por celdas, lectura contigua de filas	Menos fallos de caché
Campo magnético del modelo de malla (magmcore)	Normales de aristas por celda, arctan2, lista de puntos construida una vez	1,27 veces más rápido
Campo de un modelo estratificado arbitrario	Gauss–Legendre de 8 puntos y campo lejano	314 → 13 ms (24×)
Suavizado de datos	Aproximación cuadrática local como en ZondGM3D	Tiempo lineal, paralelo
Deconvolución de Euler	Contorno del modelo y arreglos de ventana construidos una vez	Más rápida en perfiles largos
Derivadas del campo	Solo se calculan las filas usadas del sistema	Menos trabajo por llamada
Ordenación	Burbuja sustituida por quicksort	O(n log n) en lugar de $O(n^2)$
Polígonos	División en partes por búsqueda en anchura	$O(n^2)$ en lugar de $O(n^4)$

Principales errores corregidos:

- la capa equivalente en modo gravimétrico aplicaba el núcleo gravimétrico a valores magnéticos;
- en el cálculo de derivadas, las estaciones gravimétricas de otros tipos provocaban acceso fuera del arreglo;
- en la deconvolución de Euler el índice automático era siempre 5;
- en la capa equivalente RTP el desajuste se escribía en la estación equivocada y la comprobación de sondeos usaba el número de línea como número de estación;

- el estabilizador de suavizado entraba en el operador como $(C + c_p)^T (C + c_p)$ en lugar de $C^T C + c_p I$;
- la inversión conjunta usaba índices no inicializados y códigos de error como límites;
- el ajuste del nivel DC usaba estaciones del tipo equivocado y un bloque de ajuste funcionaba con un índice no inicializado;
- la matriz del sistema de la inversión estratificada no era simétrica;
- las operaciones con polígonos usaban índices de nodos erróneos y no se comprobaban las líneas sin el número necesario de campos;
- el coeficiente de la corrección de Bouguer era unas mil veces demasiado grande.