

## INTERPRETACION DE ANOMALIAS MAGNETICAS MEDIANTE EL USO DE LA SEÑAL ANALITICA: DOS ESTUDIOS DE CASO

*Silvia Miranda*

Instituto Geofísico Sismológico Volponi. Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Meglioli 1160 -S- (5400). San Juan. e-mail: s\_mirandaar@yahoo.com

### RESUMEN

Se presentan dos ejemplos de aplicación del uso de la señal analítica en combinación con otros métodos de transformación de anomalías (p.e., pseudoanomalías) para la interpretación de datos magnéticos terrestres provenientes de dos zonas de Argentina: uno de carácter local, el distrito aurífero Hualilán, y otro a escala intermedia, la cuenca Cuyana. Se presentan los respectivos mapas de profundidades de fuentes magnéticas calculadas para una serie de cuerpos con forma de diques buzantes (Hualilán) y de contactos verticales de contrastes de magnetización (Cuyana).

**Palabras Claves:** anomalías magnéticas, señal analítica, Hualilán, cuenca Cuyana

### ABSTRACT

Two examples of the application of the analytic signal are presented in combination with other anomaly transformation methods (e.g., pseudoanomalies) for the interpretation of ground magnetic data of two areas of Argentina: one of local scale, the auriferous locality known as Hualilán, and another of intermediate scale, the Cuyana basin. The corresponding maps of calculated depths of magnetic sources are presented for a series of dipping dike-like sources (Hualilán) and of vertical contacts of magnetization contrasts (Cuyana).

**Keywords:** magnetic anomalies, analytic signal, Hualilán, Cuyana basin

### INTRODUCCION

La forma de cualquier anomalía magnética depende de la inclinación y la declinación del campo magnético terrestre, de tal manera que el mismo cuerpo producirá una anomalía de forma diferente dependiendo de su ubicación geográfica y su orientación.

Un objetivo importante en el procesamiento de datos magnéticos es simplificar la compleja información provista por los datos originales. Para ser más específicos, una simplificación sería que la amplitud de la anomalía sea proporcional a una propiedad física de la fuente, tal como en el caso del campo de gravedad

sobre un cuerpo con determinado contraste de densidad. Los datos magnéticos están en este sentido, distorsionados por la inclinación del vector magnetización.

Para alcanzar la simplificación aludida, varios métodos de transformación de campo magnético han sido propuestos. Entre ellos, las transformaciones de pseudogravedad y de reducción al polo que consideran una analogía entre los contrastes de magnetización y los de densidad o bien mediante el cálculo de una función compleja denominada señal analítica. El reposicionamiento de las anomalías magnéticas se efectúa usualmente por la reducción al polo, el cual en general supone

que tanto el campo geomagnético como la dirección de vector de magnetización remanente tienen direcciones constantes sobre la región considerada. Aunque esta suposición resulta razonable para la interpretación de algunas anomalías locales, no es válida para anomalías de componente total  $\Delta T$  de escala regional (datos satelitales, datos aeromagnéticos o marinos sobre grandes extensiones). Además, en general es difícil determinar directamente a partir de las anomalías medidas las proporciones o respuestas debidas a la geometría del cuerpo y a los efectos de las magnetizaciones inducida y remanente, los cuales son habitualmente desconocidos.

Con el fin de tener en cuenta las variaciones en dirección del campo geomagnético, se han discutido variados procedimientos de reducción al polo (p.e., Hansen y Pawlowski, 1989; Mendonca y Silva, 1993). Sin embargo, ninguno de ellos produce una distribución de magnetización única a partir de un conjunto dado de observaciones.

Un enfoque alternativo, usando una función compleja conocida como señal analítica (SA) fue propuesto por Nabighian (1972, 1984), en principio como una herramienta para estimar la profundidad y la posición de las fuentes. Roest *et al.* (1992) probaron que en el dominio del número de onda, la SA para cualquier cuerpo 2D es independiente del campo magnético ambiente y de la dirección de los parámetros de magnetización del cuerpo fuente. Para anomalías 3-D, la forma de la señal analítica es prácticamente independiente de las inclinaciones de magnetización y del campo geomagnético. Siendo entonces una aproximación aceptable, en problemas 3D la técnica es usada para el mapeo y la determinación de la profundidad de la fuente, contribuyendo además a conocer la naturaleza de la magnetización causativa. Tiene la ventaja sobre la reducción al polo que la dirección de

magnetización no necesita ser conocida o supuesta.

En el presente trabajo se ensayan distintas técnicas de transformación de las anomalías magnéticas componente vertical medidas sobre una cuadrícula en un área del distrito minero Hualilán sito en la provincia de San Juan, Argentina (Fig. 1a); a partir de la señal analítica se mapea la profundidad del techo de las fuentes de anomalías, se identifican una serie de cuerpos infiriendo su forma y dirección de buzamiento. También, usando datos magnéticos terrestres de componente total, distribuidos irregularmente, se calcula la profundidad de magnetización para el área de la cuenca Cuyana (Fig. 1b), mediante la detección de contactos verticales derivados de la señal analítica. Ambos estudios muestran las ventajas del uso de la señal analítica de datos terrestres cuando no se dispone de información respecto de la magnetización de las fuentes anómalas.

## LA SEÑAL ANALÍTICA

Nabighian (1970, 1972) desarrolló la noción de señal analítica 2-D o envolvente de energía, de las anomalías magnéticas. El concepto de señal analítica de una función  $f(x)$  se interpreta como una intensidad de campo complejo ( $A$ ) debido a un potencial complejo; el cálculo puede hacerse de tres maneras distintas (p.e., véase en Blakely, 1995):

1- calculando directamente  $F_1(x)$ , la transformada de Hilbert de  $f(x)$ , de modo que:

$$A(x) = f(x) - i F_1(x), \quad (1)$$

2- calculando la transformada de Fourier de  $f(x)$ , igualando a cero los valores para  $k < 0$ , duplicando los valores para  $k > 0$  y luego computando la transformada inversa de Fourier del resultado.

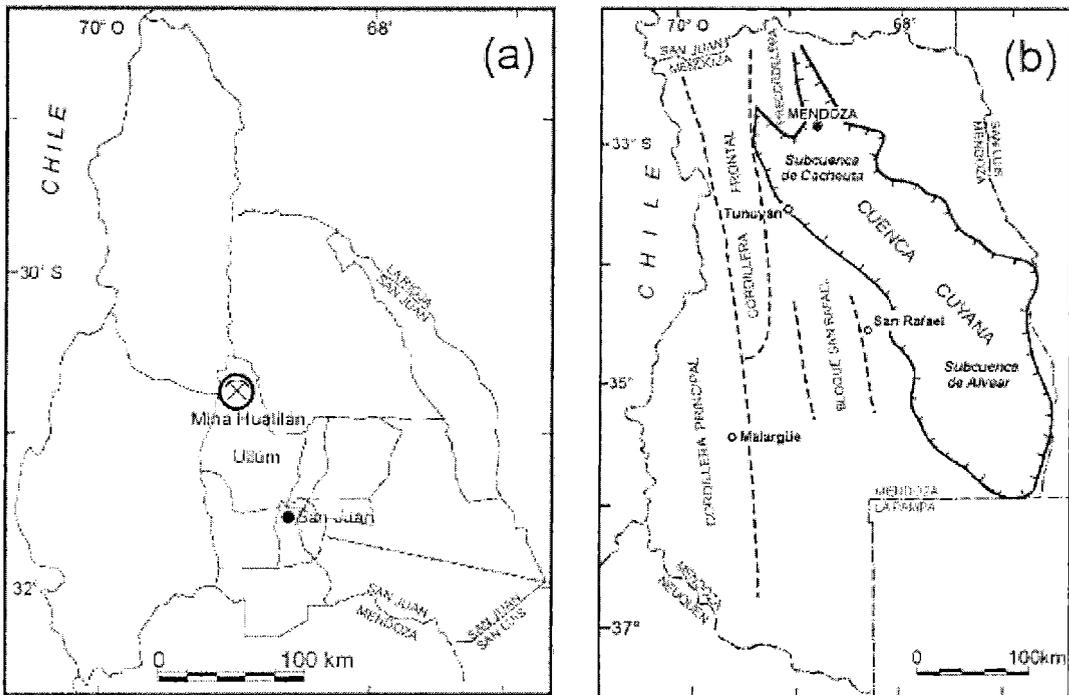


Figura 1. Áreas de estudio: (a) Distrito minero Hualilán. (b) Cuenca Cuyana.

$$\Im[A] = \Im[f](1 + i \operatorname{sgn} k) \quad (2)$$

3- calculando las derivadas direccionales en dos direcciones perpendiculares.

El método es válido para anomalías de gravedad y magnéticas (componente total, horizontal o vertical).

Nabighian (1984) y Roest *et al.* (1992) extendieron el método a problemas tridimensionales, demostrando que el valor absoluto de la amplitud de la señal analítica 3-D puede calcularse a partir de los tres gradientes ortogonales de la anomalía magnética, usando la expresión:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial z}\right)^2} \quad (3)$$

donde,

$|A(x, y)|$  es la amplitud de la señal analítica en  $(x, y)$ ,  $\Delta T$  es la anomalía magnética observada en  $(x, y)$ .

La ventaja del uso del valor absoluto de la señal analítica es que su forma sobre estructuras lineales es independiente de los parámetros del campo magnético terrestre y de la dirección de magnetización de la fuente. Los máximos de SA se correlacionan directamente con sus cuerpos magnéticos causativos y se posicionan simétricamente sobre ellos. Además, la SA tiene características similares a las de las derivadas del campo magnético, de modo que es muy sensible a los 'bordes' de los cuerpos magnéticos causativos.

### Profundidad a partir de la Señal Analítica

Nabighian (1972) calculó la señal analítica 2-D sobre una lámina, mostrando que la forma de la señal analítica es una curva campana simétrica con el máximo ( $x=0$ ) sobre el borde de la lámina o contacto vertical (localizado en

$x=0$ ). Además, la curva se relaciona con la profundidad ( $h$ ) de acuerdo con:

$$|A(x)| = C_F \frac{1}{(x^2 + h^2)^{1/2}} \quad (4)$$

El factor de amplitud  $C_F$  varía dependiendo de la componente de anomalía de campo que se mida según detalla la Tabla 1, en la cual además se consignan las ecuaciones respectivas para el parámetro  $\theta_F$ , que está relacionado con la fase  $\phi(x)$  de SA, definida como:

$$\phi(x) = \text{tg}^{-1} \left( \frac{d\Delta T / dx}{d\Delta T / dz} \right) \quad (5)$$

Los símbolos en la Tabla 1 representan:

$M$ : intensidad de magnetización ( $M = \chi T_0$ ,  $\chi$  es el contraste de susceptibilidad y  $T_0$  es la intensidad del campo geomagnético).

$I_0$ : inclinación del campo geomagnético.

$\alpha$ : rumbo del cuerpo medido en sentido horario, desde el norte magnético.

$\delta$ : buzamiento del contacto.

Como se puede ver en la ec. (4) y en la Tabla 1 todos los componentes direccionales están contenidos en el factor de amplitud  $C_F$  que es una constante. Por lo tanto, sólo la amplitud de la señal analítica es afectada por las componentes vectoriales del modelo. La forma depende sólo de la profundidad.

Un polígono de  $n$  lados es equivalente a  $2n$  láminas o contactos, donde cada lámina termina en un vértice del polígono. Así, la señal

analítica tendrá un pico o máximo en cada vértice. Se supone que la magnetización es uniforme y que la sección transversal de cualquier cuerpo puede representarse como un polígono de extensión finita o infinita.

Otros parámetros de la fuente (tales como el semiancho  $b$ , el buzamiento, la susceptibilidad) pueden calcularse evaluando  $|A(x)|$  en  $x = 0$ , y los parámetros  $\theta_F$  y  $C_F$  (p.e., Nabighian, 1972). Luego veremos el caso particular de un dique bidimensional buzante.

La calidad de los parámetros del cuerpo estimados a partir de la señal analítica depende de la exactitud con la que se distinguen las componentes simétricas asociadas a cada contacto. De esta manera, la principal desventaja de la señal analítica se relaciona con la dificultad para resolver las curvas campana, que en algunos casos se superponen o interfieren.

### Detección de contactos verticales

Suponiendo que las anomalías son causadas, por ejemplo, por contactos verticales es posible estimar la profundidad mediante reglas de semiamplitud máxima (Roest *et al.*, 1992). En este caso  $h$  es estimada en función de la distancia  $x_{1/2}$  o semiancho en la mitad de la amplitud máxima de la señal analítica. Como vimos el factor  $C_F$  depende de la amplitud de SA, y por lo tanto varía con el rumbo de la estructura 2-D de tal forma que las variaciones en amplitud deben ser interpretadas con precaución (Roest *et al.*, 1992). Además, si bien el máximo se localiza directamente sobre el contraste de magnetización, el signo del con-

**Tabla 1.** Valores de los parámetros  $C_F$  y  $\theta_F$  para cada componente del campo magnético (véase en Nabighian, 1972).

	Campo Total ( $\Delta T$ )	Campo Vertical ( $\Delta Z$ )	Campo Horizontal ( $\Delta H$ )
$C_F$	$2 M \text{ sen} \delta \left( -\cos^2 I_0 \cos^2 \alpha \right)$	$2 M \text{ sen} \delta \left( -\cos^2 I_0 \cos^2 \alpha \right)^{1/2}$	$2 M \text{ sen} \delta \text{ sen} \alpha \left( -\cos^2 I_0 \cos^2 \alpha \right)^{1/2}$
$\theta_F$	$2 I - \delta - 90^\circ$	$I - \delta$	$I - \delta - 90^\circ$

traste no puede inferirse a partir de la técnica SA, puesto que esta se basa en el cálculo de su valor absoluto.

Debido a la dificultad para separar las distintas curvas campana, que a veces se interfieren, es recomendable usar también la distancia ( $x_i$ ) entre los puntos de inflexión de la curva SA, los cuales se producen más cerca del máximo y por lo tanto son menos afectados por las anomalías vecinas. La estimación de la distancia  $x_i$  requiere el cálculo de la derivada segunda, con respecto a  $x$ , de la curva  $|A(x)|$ .

Las relaciones que vinculan la profundidad  $h$  con las distancias  $x_{1/2}$  y  $x_i$  correspondientes a cada modelo (contacto vertical, dique) se detallan en tabla 2 (Atchuta Rao *et al.*, 1981; MacLeod *et al.*, 2003).

**Tabla 2.** Profundidad  $h$  como función del semiancho ( $x_{1/2}$ ) en la mitad de la amplitud máxima de la señal analítica y con relación a la distancia  $x_i$  entre los puntos de inflexión de la curva SA.

Geometría de la fuente	Distancia en la mitad de la amplitud máxima	Distancia entre los puntos de inflexión ( $x_i$ )
Contacto	$h = 0,6 x_{1/2}$	$h = 0,71 x_i$
Dique/sill	$h = x_{1/2}$	$h = 0,87 x_i$

## DISTRITO MINERO HUALILAN

El distrito aurífero Hualilán se ubica unos 120 km hacia el nornoroeste de la ciudad de San Juan (Fig. 1a). El yacimiento propiamente dicho se encuentra al este de la ruta Provincial N° 436 y a una altura de unos 1750 m sobre el nivel medio del mar. La actividad minera comenzó en el siglo XVI y continúa en el presente, aunque esporádicamente.

El yacimiento Hualilán, sito en la Pre-cordillera sanjuanina, comprende dos zonas mineralizadas, norte y sur, compuestas de distintos cuerpos encajados en calizas ordovícicas afectadas primero por fallamiento inverso y luego por fallamiento transversal normal de alto ángulo, con una profunda zona de oxidación limonítica portadora de oro libre con

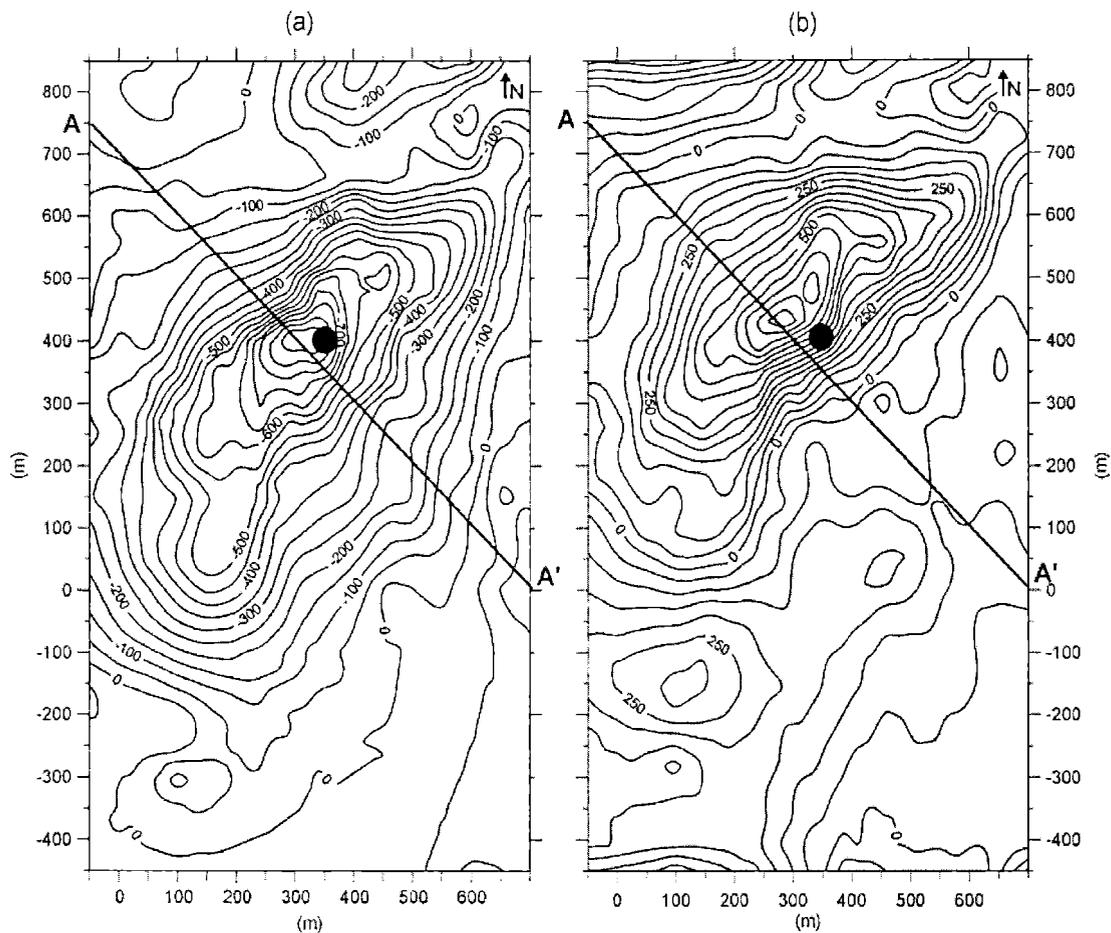
pirita aurífera asociada a blenda, cuarzo y hedenbergita en profundidad. La litología abarca, además de las calizas (de rumbo aproximadamente norte-sur y buzantes al oeste), pizarras, areniscas, dacitas y relleno moderno.

De acuerdo a Angelelli (1984), se trata de un yacimiento de carácter hipomesotermal con un metasomatismo intenso de la caliza como efecto de un proceso de alteración hidrotermal relacionado con la intrusión de dacitas horblendíferas de edad miocena. Cuerpos sub-volcánicos dacíticos afloran en gran número en los alrededores de Hualilán (Bengochea *et al.*, 1988).

El área de interés en este análisis se encuentra inmediatamente al noreste de la zona sur. En la Figura 2 se muestra el mapa de anomalías magnéticas componente vertical  $\Delta Z$ . Los valores de campo (precisión estimada mejor que  $\pm 10$  nT), reprocesados para este estudio, fueron medidos en 1988 (Herrera, 1989; Victoria, 1989) sobre una cuadrícula de 50 metros de lado, con densificaciones (datos cada 25 metros) en la zona anómala. En el mapa de  $\Delta Z$  se observa una fuerte anomalía negativa, cuyo eje indicaría el rumbo de la estructura general en dirección NO.

En la Figura 3 se muestra un perfil levantado perpendicular al rumbo general de la anomalía principal, para el cual se han calculado: las derivadas horizontal ( $\partial \Delta Z / \partial x$ ) y vertical ( $\partial \Delta Z / \partial z$ ), la señal analítica, las pseudoanomalías de gravedad y las anomalías reducidas al polo. Para estas dos últimas transformaciones se usaron los valores de los elementos del campo obtenidos del modelo DIGRF 1985:  $D_0 = +3,3^\circ$ ;  $I_0 = -28,8^\circ$ ,  $T_0 = 24835,4$  nT (IAGA, 2000).

La curva de campo  $\Delta Z$  muestra un fuerte mínimo negativo, con asimetría de mayor gradiente en el flanco noroeste. Cuando la anomalía es reducida al polo (sólo inducción) el gradiente de los flancos se invierte, resultando más abrupto en el flanco sureste.



**Figura 2.** Área al noreste del yacimiento Hualilán sur. (a) Mapa de anomalías magnéticas componente vertical. (b) Mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo. Isoanómalas cada 50 nT. El círculo relleno demarca la posición geográfica de la base (30° 43' 30" Sur, 68° 56' 30" Oeste), utilizada durante el levantamiento para registrar la variación diurna del campo geomagnético. A — A' indica la ubicación del perfil analizado en la Figura 3.

Esta situación indicaría que el buzamiento de la estructura es hacia el noroeste en total acuerdo con el buzamiento de las estructuras geológicas.

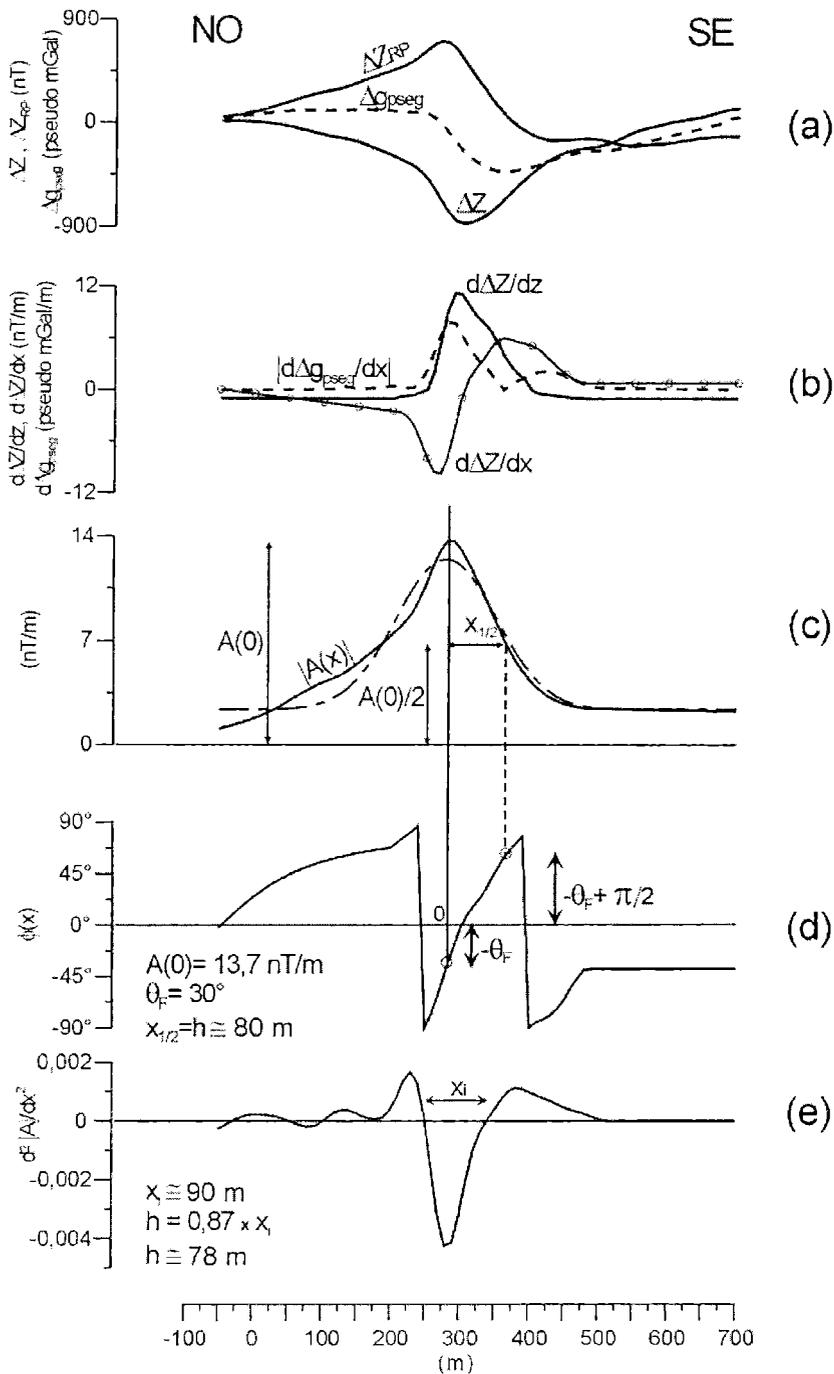
Lo expresado se observa en los mapas de la Figura 2, en la cual se incluyó el mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo. Así, el buzamiento hacia el noroeste se produciría sobre toda el área de medición.

Atchuta Rao *et al.* (1981) formularon un método para la interpretación de anomalías magnéticas debidas a diques de ancho  $2b$  y profundidad de techo  $h$ , basado en la forma

de la curva de SA y su fase  $\phi(x)$  dada por la expresión (5).

$\phi(x)$  se relaciona con el parámetro  $\theta_F$  (tabla 1) a través de:  $\phi(x) + \phi(-x) = -2\theta_F$ .

Cuando la distancia (medida sobre el eje  $x$ ) entre  $-\theta_F + \pi/2$  y  $-\theta_F - \pi/2$  coincide con la distancia  $2x_{1/2}$  en la mitad del valor máximo  $A(0)$  de la curva SA, el cuerpo puede ser tratado como un dique muy angosto ( $b \ll h$ ). En este caso las relaciones derivadas por Atchuta Rao *et al.* (1981) que nos permiten calcular los parámetros del dique son:



**Figura 3.** Para la sección A-A' (véase su ubicación en figuras 2 y 4) se grafican: (a) la anomalía magnética componente vertical observada ( $\Delta Z$ ), la anomalía reducida al polo ( $\Delta Z_{RP}$ ), la anomalía de pseudogravedad ( $\Delta g_{pseg}$ ); (b)  $d\Delta Z/dx$  y  $d\Delta g_{pseg}/dx$  y  $d\Delta Z/dz$ ; (c) la curva del valor absoluto de la señal analítica calculada ( $|A(x)|$ ), y en línea de trazos, la curva de Gauss teórica que mejor ajusta a la calculada; (d) la fase  $\phi(x)$  y (e)  $(d^2|A(x)|/dx^2)$ . Además, se indican los valores calculados a partir de estas curvas.

$$|A(x)| = \frac{2 C_F}{x^2 + h^2}$$

$$|A(x)|_{x=0} = A(0) = \frac{2 C_F}{h^2}$$

$$|A(x)|_{x=\pm h} = \frac{A(0)}{2} = \frac{2 C_F}{2 h^2}$$

$$h = x_{1/2}$$

$$\phi(x)_{x=0} = -\theta_F$$

$$\phi(x)_{x=\pm h} = -\theta_F \pm \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{d^2 |A(x)|}{dx^2} = C_F \frac{2(3x^2 - h^2)}{(x^2 + h^2)^3} \quad (6)$$

$$\therefore h = 0,87 x_i$$

En la Figura 3c se representa la curva SA computada indicándose los parámetros derivados de la misma. También se ha incluido la curva de Gauss teórica de mejor ajuste a los valores de SA, exhibiendo una alta consistencia.

La profundidad estimada a partir de la semiamplitud máxima de SA es de 80 m. Este valor es claramente consistente con el calculado a través de la derivada segunda de SA (Fig. 3e).

El valor verdadero de  $\theta_F$  se obtiene teniendo en cuenta los signos, alrededor del origen, de las derivadas horizontal y vertical de campo (Atchuta Rao *et al.*, 1981). Observando los signos de  $dAZ/dz$  y  $dAZ/dx$  (Fig. 3b) y teniendo en cuenta la Tabla 2 de Atchuta Rao *et al.*, el rango de  $\theta_F$  varía entre  $-90^\circ$  y  $-180^\circ$ , de tal manera que el valor verdadero es  $\theta_F = -120^\circ$ . Usando esta última cantidad podemos calcular el buzamiento del dique (véase tabla 1), que resulta:  $\delta = 118,11^\circ$ , o  $\delta \cong 62^\circ$  hacia el noroeste.

Por otro lado, el valor absoluto del gradiente de las pseudoanomalías de gravedad (Fig. 3b)

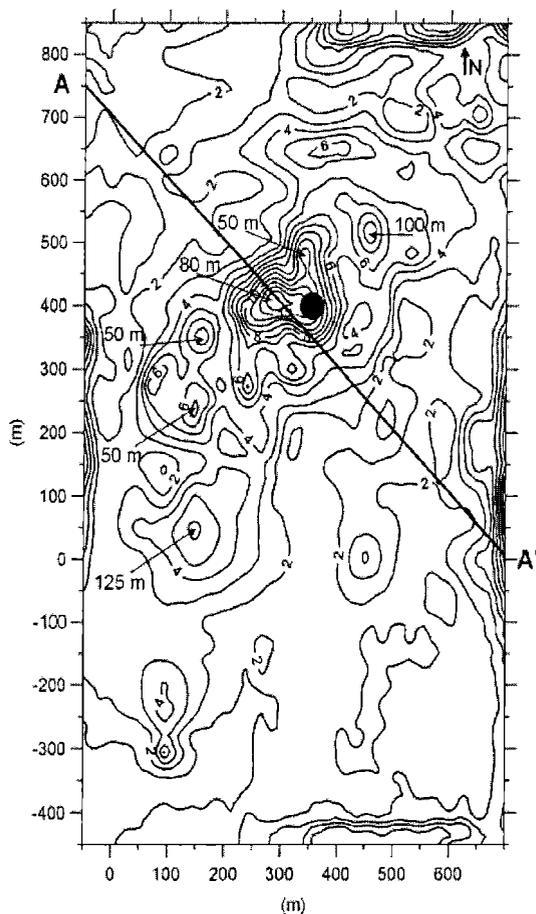
está desplazada hacia el noroeste con respecto al máximo de la señal analítica. Este desplazamiento es indicativo de la existencia de una componente remanente en la anomalía (Roest y Pilkington, 1993). Además, en el caso de contactos inclinados, este desplazamiento horizontal se produce siempre en la dirección del buzamiento (Grauch y Cordell, 1987), confirmando el buzamiento del dique hacia el noroeste.

El mapa de la Figura 4 muestra las amplitudes de la señal analítica calculadas usando la ec.(3). También se indican las profundidades de techo estimadas para una serie de diques angostos alojados en caliza. En este caso, se considera que la extensión en profundidad de los cuerpos es importante con respecto a la distancia al nivel de observación (la superficie topográfica) y por lo tanto las profundidades calculadas se acercan más al techo de las fuentes. Ellas oscilan entre 50 y 125 metros por debajo de la superficie.

Tentativamente, a través de las ec. (6) y la Tabla 1, calculamos la probable susceptibilidad magnética, que resulta del orden de  $\chi \cong 0,1$  cgs. Esta alta susceptibilidad indicaría una fuerte magnetización con una importante componente de remanencia.

## CUENCA CUYANA

La cuenca Cuyana se extiende con rumbo NO-SE sobre el centro oeste de Argentina (Fig. 1b). Se trata de una cuenca tipo rift cuyo origen se remonta al Triásico inferior, producto de esfuerzos extensionales que provocaron el hundimiento escalonado de bloques suavemente rotados, a través de fallas lítricas con una superficie de despegue de bajo a moderado ángulo (Boll y de la Colina, 1993). En el Cenozoico la cuenca es sometida a una reactivación general como consecuencia de la orogenia Andina, responsable de la configuración estructural actual. En aproxima-



**Figura 4.** Valor absoluto de la señal analítica calculada para la zona del yacimiento aurífero Hualilán. Isoanómalas cada 1 nT/km. Se indican las profundidades de techo estimadas. El círculo relleno demarca la posición geográfica de la base (30° 43' 30" Sur, 68° 56' 30" Oeste). Indica la ubicación del perfil analizado en la Figura 3.

damente 34° S de latitud, un alto estructural divide a la cuenca Cuyana en dos grandes subcuencas: al norte la de Cacheuta y al sur la de Alvear.

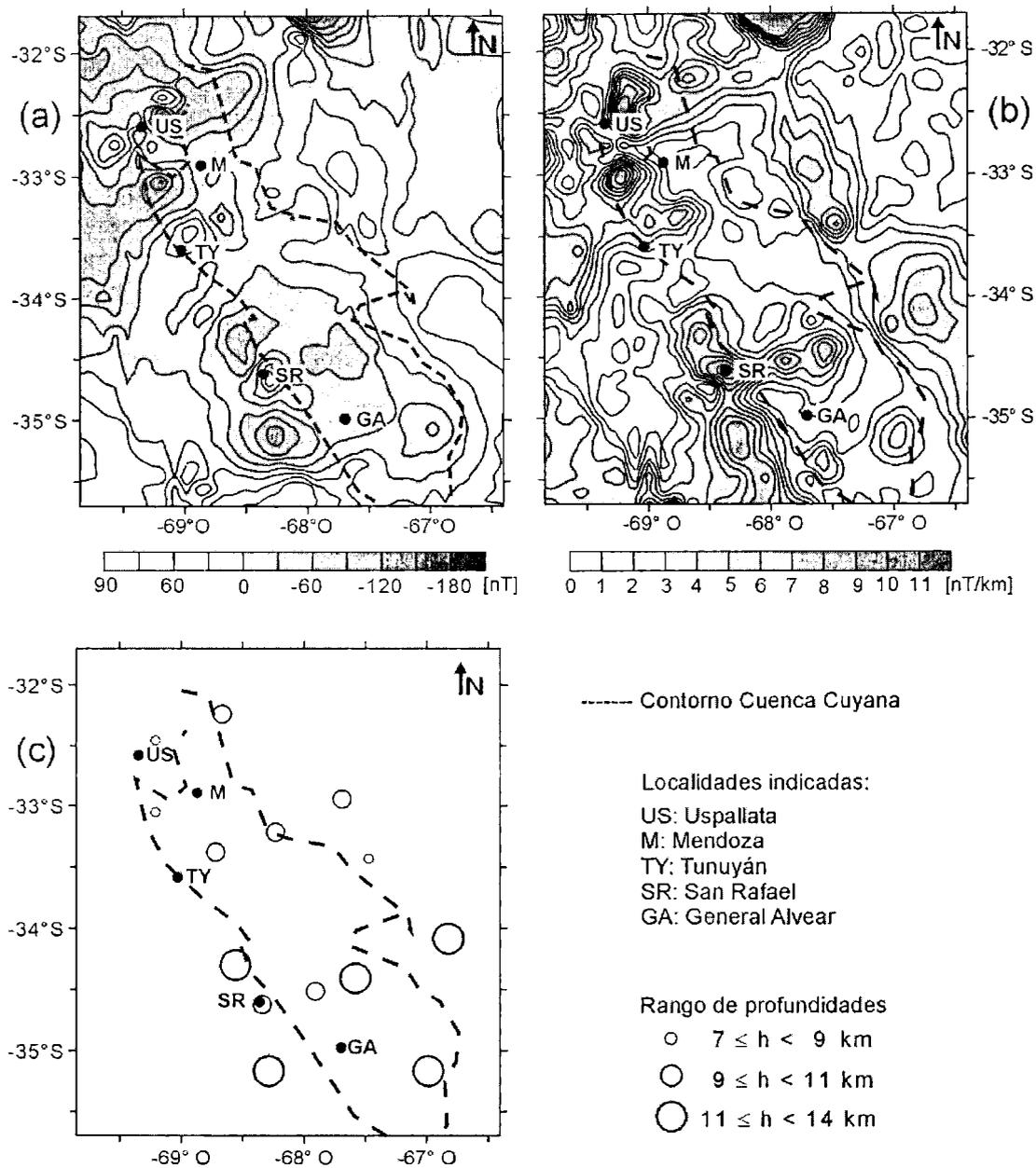
Las rocas más antiguas que conforman el basamento de la cuenca son metamorfitas, pertenecientes al ámbito geológico de las Sierras Pampeanas y atribuidas al Precámbrico. Estas rocas dominan netamente en el sector oriental del zócalo mientras que hacia occidente se observa mediano a bajo grado

de metamorfismo. Finalmente integran el sustrato las vulcanitas y las rocas piroclásticas del Grupo Choiyoi (Permotriásico). El relleno de la cuenca Cuyana está conformado casi en su totalidad por una potente sucesión clástica y parcialmente vulcanoclástica, de edad triásica.

La Figura 5a muestra el mapa de anomalías magnéticas componente total para el área de la cuenca. Los datos corresponden a mediciones propias llevadas a cabo en el período 2000-2001, con una distribución irregular siguiendo la red vial de la región. El campo geomagnético internacional de referencia (IAGA, 2000) se usó para remover del campo observado la influencia del campo magnético principal para la época de medición. Los valores de anomalías fueron regularizados a una malla de 10 km de lado. En términos generales, las anomalías muestran un carácter similar, señalando que las fuentes magnéticas corresponderían a un intervalo común de profundidad.

El mapa en la Figura 5b muestra el valor absoluto de la señal analítica calculada, junto con las profundidades estimadas (Fig. 5c) suponiendo contactos verticales de contrastes de magnetización. Los valores de profundidad se calcularon mediante los semianchos del módulo de la señal analítica correspondientes, valores que fueron afectados por los factores consignados en la Tabla 2. El proceso de interpretación requirió de la identificación de los picos o máximos de  $|A|$  y del rumbo de la estructura representada por cada uno de ellos. En casos sencillos como el presente estos pasos pueden realizarse visualmente. Para anomalías de mayor complejidad (p.e., datos aeromagnéticos de alta resolución), resulta conveniente recurrir a técnicas automáticas tales como las utilizadas por Roest *et al.* (1992).

Las profundidades tienen el carácter de valores medios pues consideramos que las capas son de un espesor comparable con la distancia al nivel de observación (Roest *et al.*,



**Figura 5.** Se grafican para el área de la cuenca Cuyana: (a) las anomalías magnéticas componente total cada 40 nT; (b) el valor absoluto de la señal analítica cada 1 nT/km; (c) las profundidades medias de contrastes de magnetización calculadas a partir de la señal analítica.

1992). Ellas son preliminares debido a la distribución irregular de la información. Los valores de  $h$  oscilan entre 7,7 y 14 km, con un valor medio de 10,6 km consistente con las profundidad media determinada por métodos

espectrales (Miranda, 2004) En términos generales se observa un aumento de la profundidad hacia el sur, es decir que la profundidad de contrastes de magnetización parecería ser un tanto más superficial sobre la

subcuenca de Cacheuta que sobre la subcuenca de Alvear. Estas subcuencas presentan características tectónicas particulares tales como la inversión tectónica durante la orogenia andina, que afectó fundamentalmente la parte norte de la cuenca, y el cambio del ángulo de subducción. Con respecto a la amplitud máxima de SA, los mayores valores se producen en la zona de Uspallata (13 nT/km) y al suroeste de San Rafael (10 nT/km). En el resto de las curvas los máximos varían entre 4 y 9 nT/km (valor medio de 7 nT/km). De acuerdo a este análisis regional, los terrenos geológicos presentes en el área exhibirían propiedades magnéticas similares. Este resultado es consistente con la interpretación de Miranda (2004) de distintos terrenos geológicos presentes en el basamento de la cuenca, identificados por exhibir relaciones magnetización/densidad características ( $\Delta M/\Delta\sigma$ ), aunque bajos y de rango muy restringido ( $-4 \times 10^{-3} \text{SI} \leq \Delta M/\Delta\sigma \leq 4 \times 10^{-3} \text{SI}$ ).

## CONCLUSIONES

Para el área adyacente a la mina Hualilán sur, utilizando datos de anomalías magnéticas componente vertical, transformaciones de reducción al polo y de pseudogravedad y el valor absoluto de la señal analítica se establecieron:

- la ubicación de una serie de cuerpos magnetizados con rumbo aproximadamente noreste-suroeste,
- el buzamiento de los cuerpos, identificados como diques buzantes, hacia el noroeste ( $\approx 60^\circ$ ),
- la profundidad del techo de los cuerpos de entre 50 y 125 metros.

Para el área de la cuenca Cuyana, a partir de las anomalías magnéticas componente total y la señal analítica, se determinaron en forma preliminar:

- los contactos de contrastes de magnetización (a tal efecto supuestos verticales), señalados

por los contornos de la señal analítica que en buen número se alinean con rumbo paralelo al eje de la cuenca,

- las profundidades medias de los contactos de entre 7 y 14 km, a partir de las isoanómalas de señal analítica cuando las mismas permitieron una clara identificación.

Si bien se observa una mayor profundidad de magnetización hacia el sur (subcuenca de Alvear), la reducida varianza que exhibe la señal analítica calculada indicaría que las características magnéticas del subsuelo de esta región son semejantes.

**Agradecimientos:** a los revisores del manuscrito por las consideraciones y sugerencias realizadas.

## REFERENCIAS

- Angelelli, V., 1984. Yacimientos Metalíferos de la República Argentina II. Comisión de Investigaciones Científicas CIC, Provincia de Buenos Aires, pp. 704.
- Atchuta Rao, D., H.V. Ram Babu and P.V. Sanker Narayan, 1981. Interpretation of magnetic anomalies due to dikes: the complex gradient method. *Geophysics*, 46(11):1572-1578.
- Bengochea, J.D., A.L. Bengochea y G.R. Más, 1988. Inclusiones fluidas en el yacimiento de oro en calizas Hualilán, Provincia de San Juan, Argentina. *Actas Tercer Congreso Nacional de Geología Económica*. Buenos Aires. I:251-267.
- Blakely, R., 1995. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge Univ. Press.
- Boggetti, D., V. Martínez Cal, C. Regazzoni, L. Andrada y M. Marnetti, 1999. Aporte de la sísmica 3D al modelo prospectivo en la cuenca Cuyana. *Actas IV Congreso de Exploración de Hidrocarburos*. Mar del Plata, Argentina. I:263-281.
- Boll, A. y J. de la Colina, 1993. Armazón estratigráfico del Triásico-Jurásico en Atamisqui-Cuenca Cuyana-Mendoza. *Actas XII Congreso Geológico Argentino y II Cong. de Exploración de Hidrocarburos*. I:33-40.
- Grauch, V. J. S. and L. Cordell, 1987. Limitations on determining density or magnetic boundaries

- from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data: *Geophysics*, 52(1):118-121.
- Hahn, A., E. Kind and D. Misha, 1976. Depth estimation of magnetic sources by means of Fourier amplitude spectra. *Geophysical Prospecting*, 24:287-308.
- Hansen, R. O. and R. S. Pawlowski, 1989. Reduction to the pole at low latitudes by Wiener filtering. *Geophysics*, 54:1607-1613.
- Herrera, J., 1989. Interpretación de anomalías magnéticas en el sector noreste del área Mina Hualilán. Tesina de Licenciatura en Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. Inédito. 129 pp.
- (IAGA) International Association of Geomagnetism and Aeronomy Division V, Working Group 8, M. Manda (chair), 2000. International Geomagnetic References Field - 2000. Scientific Report.
- MacLeod, I. N., K. Jones and T. Fan Dai, 2003. 3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. [www.geosoft.com](http://www.geosoft.com), pp.12.
- Mendonca, C. A. and B. C. Silva, 1993. A Stable Truncated Series Approximation of the Reduction-to-the Operator. *Geophysics*, 58:1084-1090.
- Miranda, S., 2004. Mapeo de la Relación Magnetización-Densidad en la Región de la Cuenca Cuyana (Argentina). Enviado a *Geoacta*.
- Nabighian, M., 1970. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 38: 517-537.
- Nabighian, M., 1972. Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section. *Geophysics*, 39:85-92.
- Nabighian, M., 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, 49:780-786.
- Roest, W. and M. Pilkington, 1993. Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58(5):653-659.
- Roest, W., J. Verhoef and M. Pilkington, 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57(1):116-125.
- Victoria, M. S., 1989. Interpretación de anomalías magnéticas en el sector sur del área Mina Hualilán. Tesina de Licenciatura en Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan. Inédito. pp.129.