

COMPRENDER LAS ANOMALÍAS DE GRAVEDAD Y MAGNETISMO: SU ROL EN INTERPRETACIÓN SÍSMICA

Mario Emilio Sigismondi¹

1: YPF S.A. mario.e.sigismondi@ypf.com

Palabras clave: Magnetometría, Gravimetría, Sísmica

ABSTRACT

This presentation has a message as a seismic interpreter from my own experience on the use of potential methods for those who explore oil and gas, following the idea that there is a wider range of geophysical techniques that include magnetic, gravity, and seismic, among others.

It is factual that 3D seismic remains critical, indeed indispensable, but a full geophysicist interpreter should have good knowledge, under favorable conditions also applied, that the combination of magnetic and gravity with seismic, can be used to reduce risk at key stages of the E&P process. However, inherent interpretation's ambiguity is the main argument against it. Contrary to this widespread notion, although, magnetic and gravity methods are equally effective for reducing risk at the more local scale typified by the prospect itself, even more in the Neuquén basin after three continuous decades of 3D seismic recording: not only in frontier areas but also in mature areas. Before that, I show that predictions in seismic interpretation may also have uncertainty: to identify ambiguous amplitude anomalies, or to imaging the structure and stratigraphic features, for example.

The methodology will briefly review the conventional application of magnetic and gravity involved in comparing: the magnetics' basement conversion to depth with respect to seismic image, attributes such as curvature to compare at regional scale with faults patterns, estimation of density distribution from modeling, and inversion. The examples used to illustrate my views have been taken from case studies that have 3D seismic, both in areas of Development, Exploration blocks, or New Frontier.

The lesson learned suggests that oil companies should eventually have specialists who possess knowledge in potential and seismic methods to support interpretation, and who disseminate and advise innovative and robust solutions in the search for new resources.

INTRODUCCIÓN

Los intérpretes sísmicos de la industria petrolera tienen un aliado en los métodos potenciales, particularmente los de magnetismo y gravedad, aunque algunas veces lo ignoren. ¿Qué es lo esencial, lo típico, la propiedad específica, de esta o de aquella herramienta? Deseo formular esta pregunta, que no apunta a una cuestión abstracta o teórica acerca de una concepción sistemática:

una única metodología dominada por el método sísmico. Apunta a una cuestión muy práctica de qué y cómo debe ser incorporado en la interpretación sísmica la información de magnetometría y gravimetría como elementos válidos, vinculantes, porque me interesa, precisamente por la conservación de lo esencial, la transformación y renovación del intérprete, en un proceso de maduración e impregnación, crecimiento aplicado, sostenible y sistemático en el tiempo.

¿Qué ocurre en el horizonte de frontera exploratoria o de desarrollo de una cuenca sedimentaria si no hay sísmica ni pozos? ¿Qué métodos geofísicos permiten iluminar el subsuelo de manera tal, de describir la eventual presencia algún elemento favorable a la existencia de un sistema petrolero activo y comercial?

Hace bastante tiempo (Telford *et al.* 1990) que los geofísicos entendemos que la respuesta a estas y otras preguntas se obtendrán de la mano de dos métodos primordiales: gravedad y magnetismo. Sin embargo, sus deducciones y alcances derivados se han enfrentado a una serie de dificultades, entre otras: la ambigüedad inherente de su interpretación, el desconocimiento habitual sobre sus bondades y limitaciones, y la ausencia de datos experimentales –fundamentalmente de sísmica y pozos– que guíen el significado de sus anomalías en términos geológicos-prospectivos.

Tres décadas de campañas continuas de registración de sísmica 3D y perforaciones en cuenca Neuquina, Argentina, permiten hoy trasponer algunos paradigmas y poner a prueba la teoría y observaciones pasadas o recientes de métodos potenciales, sus predicciones y soluciones, por el análisis multidisciplinario entre respuestas. La cuestión de la singularidad en las interpretaciones de magnetismo o gravedad, la singularidad de su naturaleza e interpretación se asocia a ambigüedad, sin reparar en el contexto de la comparación o en las limitaciones y bondades de cada herramienta.

La metodología aplicada, consiste en comparar no sólo cualitativamente las anomalías gravimagnetométricas con respecto a la imagen estructural de sísmica, sino también algunas metodologías de conversión a profundidad, estimación de distribución de densidad provenientes de modelado e inversión 3D de gravedad, a partir de ejemplos de casos de estudio de la cuenca Neuquina (Figura 1).

Los resultados permiten afirmar que no se trata simplemente de un ejercicio intelectual, acaso más bien de una posibilidad real para mitigar el riesgo asociado a la búsqueda de petróleo y gas, tanto de áreas de Desarrollo, bloques de Exploración, o zonas de Frontera Exploratoria. La lección aprendida me permite sugerir a las empresas petroleras del medio, que deberían sostener eventualmente a especialistas que posean conocimientos en métodos potenciales y sísmica, ya sea para apoyar la interpretación, difundir y aconsejar soluciones innovadoras y robustas en la búsqueda de nuevos recursos.

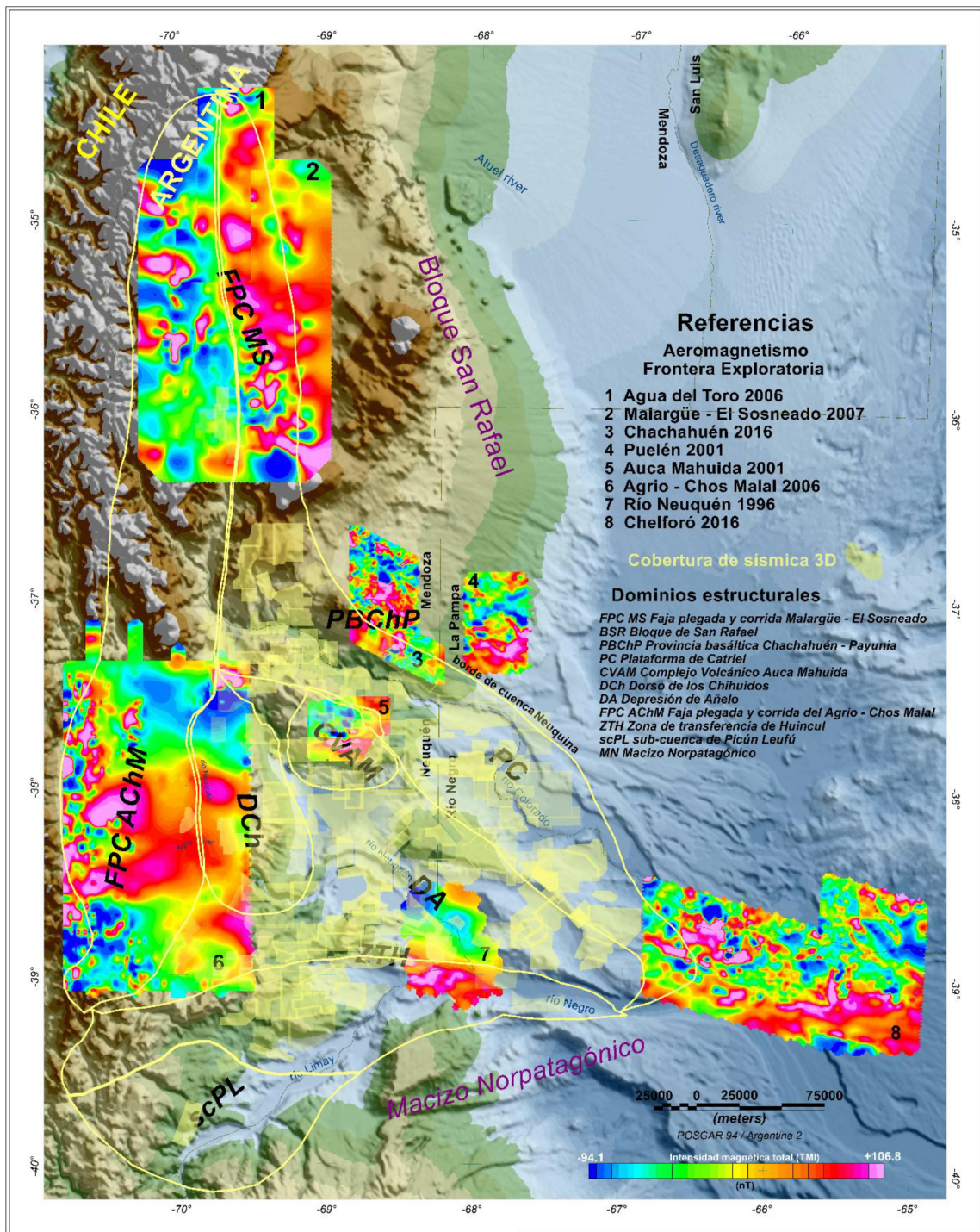


Figura 1. Ubicación relativa de relevamientos de magnetometría respecto a sísmica 3D (polígonos amarillos) de la cuenca Neuquina. Si bien la herramienta por excelencia en E & D de hidrocarburos es sísmica (42.690 km² cubiertos entre 1993/2008) en ciertas circunstancias no es viable ejecutar íntegramente, por ejemplo: faja plegada y corrida (Agua del Toro, El Sosneado, Agrio - Chos Malal); cobertura superficial de rocas volcánicas (Sierra de Chachahuén, Puelén y Auca Mahuida), ambientalmente intangibles (Auca Mahuida), permisología y logística dificultosa (Río Neuquén) o frontera exploratoria (faja plegada y corrida al oeste, Chelforó al este) han confirmado que, recurrir a métodos potenciales (aéreos 1995/2016) es una alternativa válida para optimizar campañas de registración sísmica y disminuir drásticamente la ambigüedad inherente de las interpretaciones potenciales, paradigma que debería ser revisado en cada caso de estudio. En colores: anomalías de Intensidad Magnética Total, TMI por sus iniciales en inglés, expresadas en nT (nanoteslas). Regiones estructurales modificadas de Mosquera y Ramos, (2006); Sigismondi, (2013).

METODOLOGÍA

Fundamentos, limitaciones y diferencias entre métodos potenciales y sísmicos

Los fundamentos teóricos de gravedad y sus aplicaciones prácticas en geofísica de prospección encierran sus raíces en la Ley de la Gravitación Universal de Isaac Newton de 1687 y las ecuaciones diferenciales de Pierre Simón de Laplace de 1770. En términos matemáticos, la teoría potencial describe funciones en las cuales las fuerzas naturales disminuyen con la distancia a sus fuentes: la gravedad y los campos magnéticos, así como los campos eléctricos, el flujo de calor en estado estacionario, ciertos flujos de fluidos y el comportamiento de sólidos elásticos. George Green fue el primero en aplicar el concepto de potencial, que había ideado en un artículo de 1828, y luego adoptado en las ecuaciones originales de James Clerk Maxwell de 1865 y en la teoría de campos. Robert Ladislav Parker (1973) resume elocuentemente la no unicidad de los campos potenciales en el contexto de las ciencias de la Tierra (Grant y West 1965; Blakely 1995).

Las célebres matemáticas de la teoría del campo potencial proporcionan la base de los métodos gravimétricos y magnéticos, que responden a uno de los interrogantes fundamentales

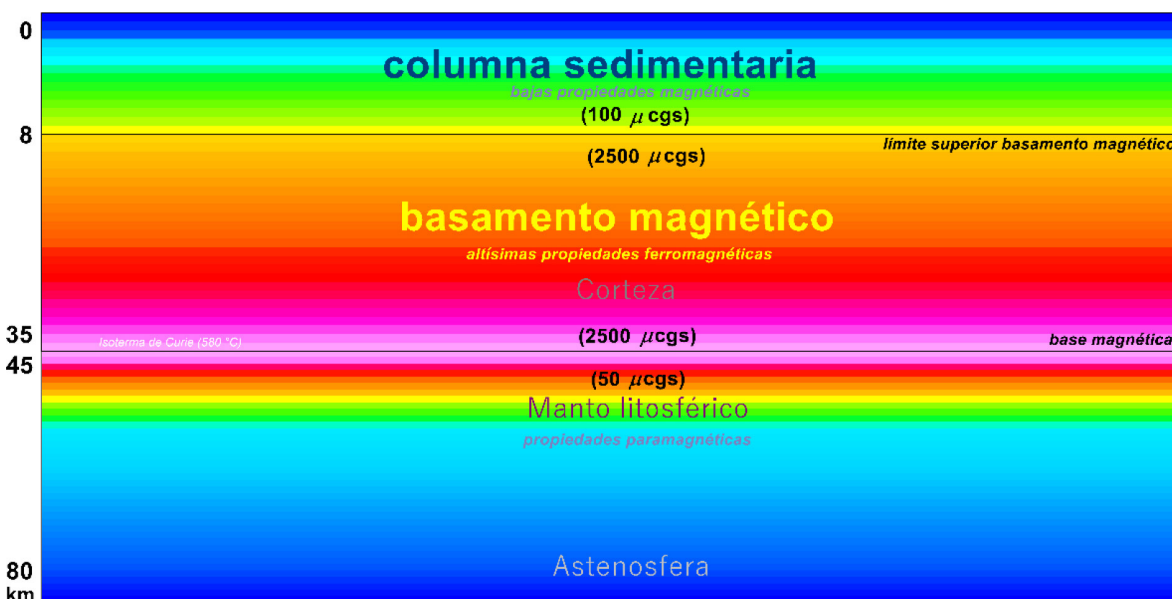


Figura 2. Modelo conceptual de las fuentes de anomalías magnéticas: columna sedimentaria; “basamento magnético”, y “basamento térmico” de susceptibilidad, 100, 2500 y 50 unidades μcgs , respectivamente. Es preciso recordar: 1) La susceptibilidad magnética en volumen, κ , es una propiedad física de las rocas que les permite ser magnetizadas por el campo de la Tierra, $\vec{H}$, proceso de inducción magnética. 2) El campo magnético inducido en la roca es paralelo al $\vec{H}$ y su fuerza es proporcional a la fuerza local del campo. 3) La ecuación vectorial $\vec{M} = \kappa \vec{H}$ describe la situación, siendo $\vec{M}$ la magnetización. 4) La susceptibilidad, κ , es medible con un simple dispositivo de mano y suele ser indicador confiable del contenido mineral magnético en la roca. 5) Valores típicos de κ : dolomitas 8, calizas 25, areniscas 32, lutitas 50, rocas ígneas o volcánicas de 2000 a 15000, en unidades μcgs , (Dobrin y Savit 1988). 6) Respecto al contraste de impedancia acústica, del 15 a 25%, se pone de manifiesto que en prospección magnética no existirían ambigüedades respecto al origen de las fuentes, al menos en escenarios sin alteraciones volcánicas, lo cual la convierten en la más expeditiva y económica forma para planificar campañas de registración sísmica. 7) A la temperatura crítica de Curie de 580°C (Ravat *et al.* 2016) se perderían las propiedades magnéticas de las rocas, pero xenolitos del manto superior han revelado remanencia magnética que podrían contribuir a anomalías (Ferré *et al.*, 2020).

en la búsqueda de un sistema petrolero: conocer la profundidad del basamento magnético y gravimétrico, o, en consecuencia, estimar la disponibilidad de cuenca sedimentaria. Este desafío es apremiante para abrir el camino a la sísmica de 3D en particular utilizada como instrumento de caracterización de reservorios, y cuyo empleo en las últimas tres décadas ha permitido iluminar de la mejor manera diferentes elementos del sistema petrolero, como estructuras, trampas, reservorios, sellos y roca madre.

Es trascendental comprender que, como toda técnica indirecta de observación del subsuelo, tanto en los métodos sísmicos como en los potenciales se trabaja siempre con los contrastes de propiedades, no sus valores absolutos. La interfase sedimentos – basamento, objetivo básico de toda iluminación de subsuelo, representa posiblemente la mayor diferencia, ya se trate de impedancias acústicas (del orden de 5 a 15 % en sísmica); de densidad relativa (+0,20 gr/cm³ en gravimetría) y de susceptibilidad magnética (20 a 1 o mayor, independiente de las unidades) según Dobrin y Savit (1988).

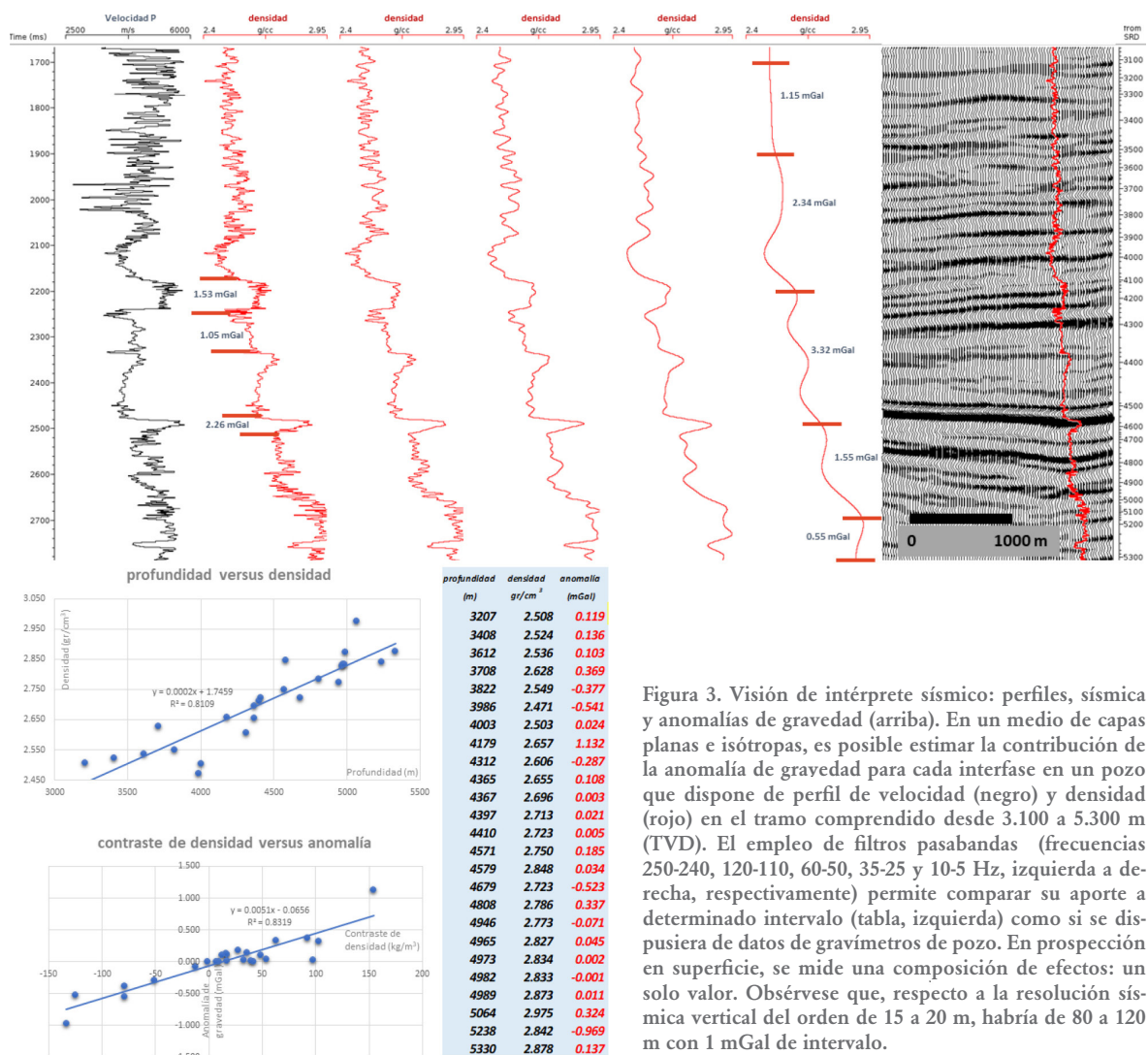


Figura 3. Visión de intérprete sísmico: perfiles, sísmica y anomalías de gravedad (arriba). En un medio de capas planas e isotropas, es posible estimar la contribución de la anomalía de gravedad para cada interfase en un pozo que dispone de perfil de velocidad (negro) y densidad (rojo) en el tramo comprendido desde 3.100 a 5.300 m (TVD). El empleo de filtros pasabandas (frecuencias 250-240, 120-110, 60-50, 35-25 y 10-5 Hz, izquierda a derecha, respectivamente) permite comparar su aporte a determinado intervalo (tabla, izquierda) como si se dispusiera de datos de gravímetros de pozo. En prospección en superficie, se mide una composición de efectos: un solo valor. Obsérvese que, respecto a la resolución sísmica vertical del orden de 15 a 20 m, habría de 80 a 120 m con 1 mGal de intervalo.

Por lo tanto, un intérprete sísmico debe saber en primer lugar que las anomalías magnéticas son una herramienta valiosa para estimar un factor determinante entre los elementos de un sistema petrolero activo: la profundidad sedimentaria, la profundidad de carga o soterramiento que fija a los restantes. Podríamos imaginar en todo caso, que tanto la cubierta sedimentaria superior y la corteza media o inferior (Figura 2) en la práctica no contribuyen al valor final de los mapas de anomalías magnéticas, claro reflejo del basamento.

Otro aspecto para considerar por un intérprete sísmico es lo concerniente a la “resolución vertical” del método gravimétrico (Figura 3): ¿Qué significado prospectivo respecto a sísmica? Para responder a este interrogante, nos remitimos a un cálculo sencillo: si el basamento geológico posee $2,75 \text{ gr/cm}^3$ de densidad respecto al promedio de $2,55 \text{ gr/cm}^3$ de la columna sedimentaria, y se encuentra a 3600 m de profundidad, se generará una anomalía de gravedad del orden de -30 mGal. Si las isoanómalas se mapean cada 1 mGal, la resolución vertical es del orden de 120 m, frente a los 15 a 20 m del método sísmico. Pero con una importante salvedad: para estimar la resolución vertical en gravedad, es necesario tener algún conocimiento de la profundidad, derivado del mismo dato a partir del cálculo espectral promedio, por ejemplo, o de información de sísmica o perforaciones. Siguiendo con el objetivo de estimar la profundidad del basamento: yendo al borde de cuenca, la densidad promedio de la columna sedimentaria será menor ($2,45 \text{ gr/cm}^3$ exclusivamente por efecto de soterramiento) el contraste de densidad al basamento aumentará y la resolución vertical ascenderá a 80 m cada 1 mGal. Una inspección de un mapa de gravedad a escala regional (Figura 4) debe ser utilizado en ese contexto para deducir conclusiones válidas. La presencia de contactos intrusivos superficiales, en el borde noreste de la cuenca Neuquina, debe evaluarse como un desvío de las condiciones ideales explicadas.

La tabla de la Figura 3, elaborada a partir del perfil de densidad de un pozo profundo de la cuenca Neuquina, permite cuantificar, en visión del intérprete sísmico, qué valores se podrían esperar si se empleara un gravímetro de pozo. Prestar atención que las profundidades y anomalías de gravedad han sido seleccionados en intervalos no regulares siguiendo las deflexiones del perfil y/o horizontes sísmicos. Por ejemplo, el tramo desde 4.174 a 4.586 m (TVD) de $0,193 \text{ gr/cm}^3$ de contraste de densidad genera una anomalía de 3,32 mGal. Las variaciones de densidad con la profundidad y la dependencia del valor absoluto de anomalía de gravedad frente al contraste de densidad tienen elevada correlación, como se observa en los crossplots de la Figura 3. Al referirme a “la visión del intérprete sísmico”, se debe tener en mente el hecho de que el método sísmico es sensible a los cambios verticales (Sheriff 2002) en las propiedades del subsuelo, mientras que los métodos potenciales son indicativos de cambios laterales. Aún más: en particular durante el procesamiento sísmico, se simplifican las hipótesis a un modelo de subsuelo formado por capas horizontales de velocidad constante, homogéneas e isotrópicas, paradójicamente a lo que sucede en magnetismo o gravedad. Por lo tanto, la estrategia de todo intérprete sísmico que pretenda integrar su conocimiento con magnetismo o gravedad deberá estar orientada al reconocimiento

de patrones de anomalías en función de cambios laterales originados en la interfase primordial del basamento magnético y/o gravimétrico.

Otro aspecto trascendente para quienes se acercan a la inspección de un mapa de anomalías magnéticas o gravimétricas es el relacionado a la resolución lateral (Figura 5). En los resultados de los mapas de anomalías, la longitud de onda espacial y el espectro de potencia asociado (define profundidades de fuentes), está determinado, según el criterio de Reid (1980) por la frecuencia de Nyquist. Es decir: sería deseable obtener anomalías individuales en función del objetivo geológico, y para ello, son fundamentales dos parámetros: la distancia entre la altura media del sensor y los cuerpos que actúan como fuentes de anomalías, además de la separación entre líneas, que deben definirse en la etapa de modelado y diseño de adquisición.

Ambigüedad e incertidumbre en magnetismo, gravimetría y sísmica

Un análisis de la idea de no unicidad teórica-práctica que todo intérprete geofísico debe tener presente para trabajar con métodos potenciales están relacionados a la incertidumbre y la ambigüedad, recordando que la interpretación sísmica también está sujeta a ambigüedad y “no unicidad” (por ejemplo, Yilmaz 2001).

Varios factores pueden crear situaciones en las que se vuelve imposible resolver ciertas características de los cuerpos a partir de estudios magnéticos. Las ilustraciones empíricas de Reid (1980) muestran que cuanto más lejos esté el sensor magnético de la fuente, más pobre será nuestra capacidad para observar y resolver su forma. En la práctica, el ancho mínimo que es posible resolver es aproximadamente la distancia del sensor a la fuente. Cuando el ancho del cuerpo es menor, la forma de la anomalía permanece esencialmente sin cambios y podríamos encontrar situaciones en las que un cuerpo más estrecho con una magnetización más fuerte tuviera la misma respuesta de anomalía magnética que un cuerpo más ancho con una magnetización más débil. Esta es una forma común de ambigüedad en interpretación, por la cual diferentes cuerpos magnéticos producen esencialmente la misma anomalía. Es decir, la distancia sensor-fuente limita nuestra determinación de ancho y, sin control sobre el ancho, no podemos determinar la fuerza de magnetización.

Otro factor muy importante para tener en cuenta es que la mayoría de los cuerpos magnéticos han sido inducidos alineados paralelamente al campo de la Tierra, cuya fuerza y dirección se conocen y monitorean con bastante precisión a partir de observaciones de campo y satelitales. Sin embargo, si la magnetización del cuerpo quedara dominada por magnetismo remanente, o de susceptibilidad anisotrópica, cualquier inferencia que hagamos asumiendo magnetización inducida estará dominada por este concepto de no unicidad.

La ambigüedad en interpretación sísmica pre-difusión masiva de 3D (Tucker y Yorston 1973) aún se reconoce sobre aspectos significativos, por ejemplo, en Brown (2005). La lista de

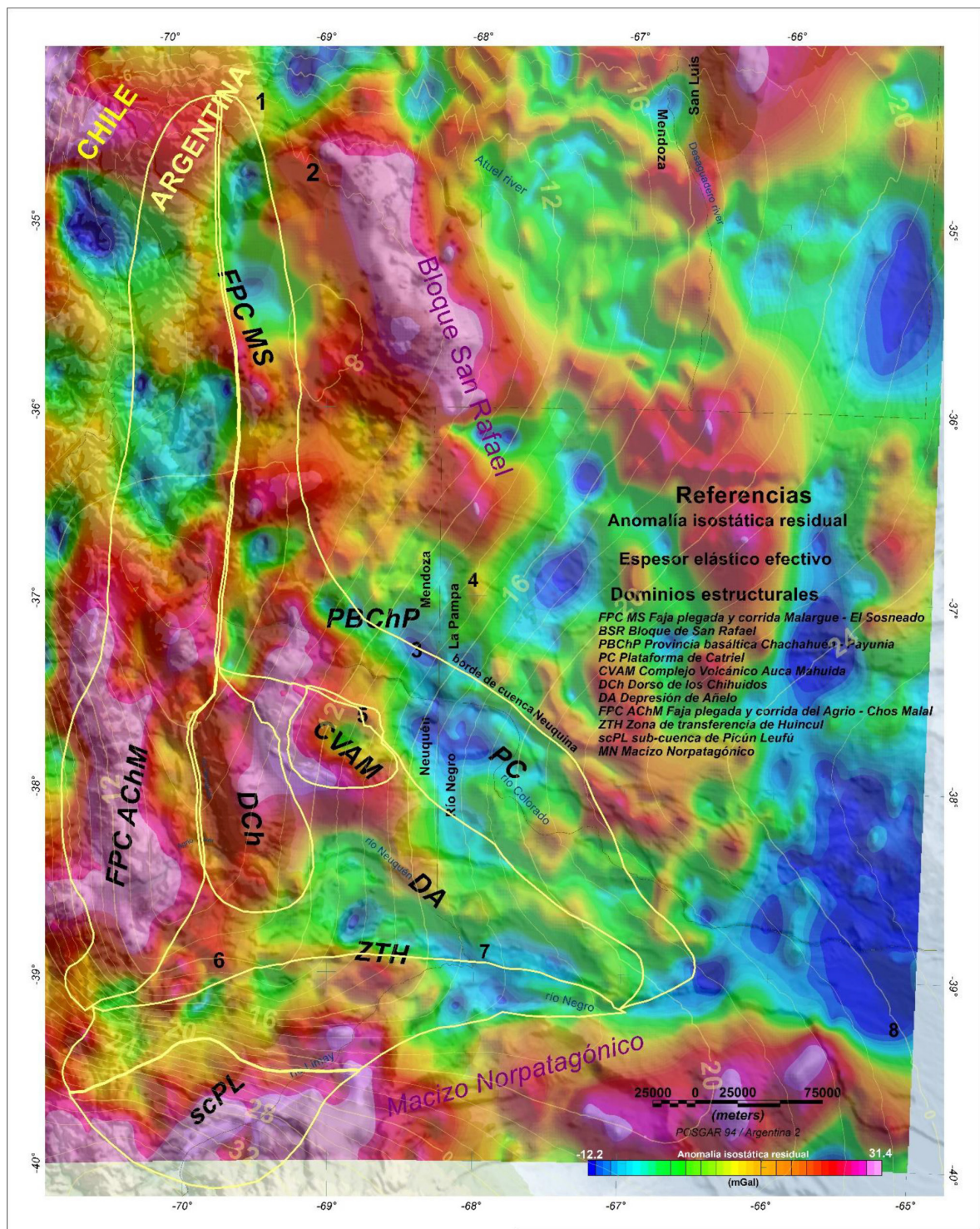


Figura 4. Anomalía isostática residual de la cuenca Neuquina, integrando relevamientos terrestres, aéreos y satelitales. Las elevaciones y depresiones en colores cálidos y fríos, respectivamente. El mínimo de Añelo, elemento primordial, corresponde a una corteza atenuada respecto al valor aceptado como normal de 35 km, cuya función geodinámica ha sido la propagación del sistema de rifting o apertura inicial de la cuenca, tiene espesores sedimentarios mayores a 6,5 km. Regiones estructurales modificadas de Mosquera y Ramos 2006; Sigismondi 2013.

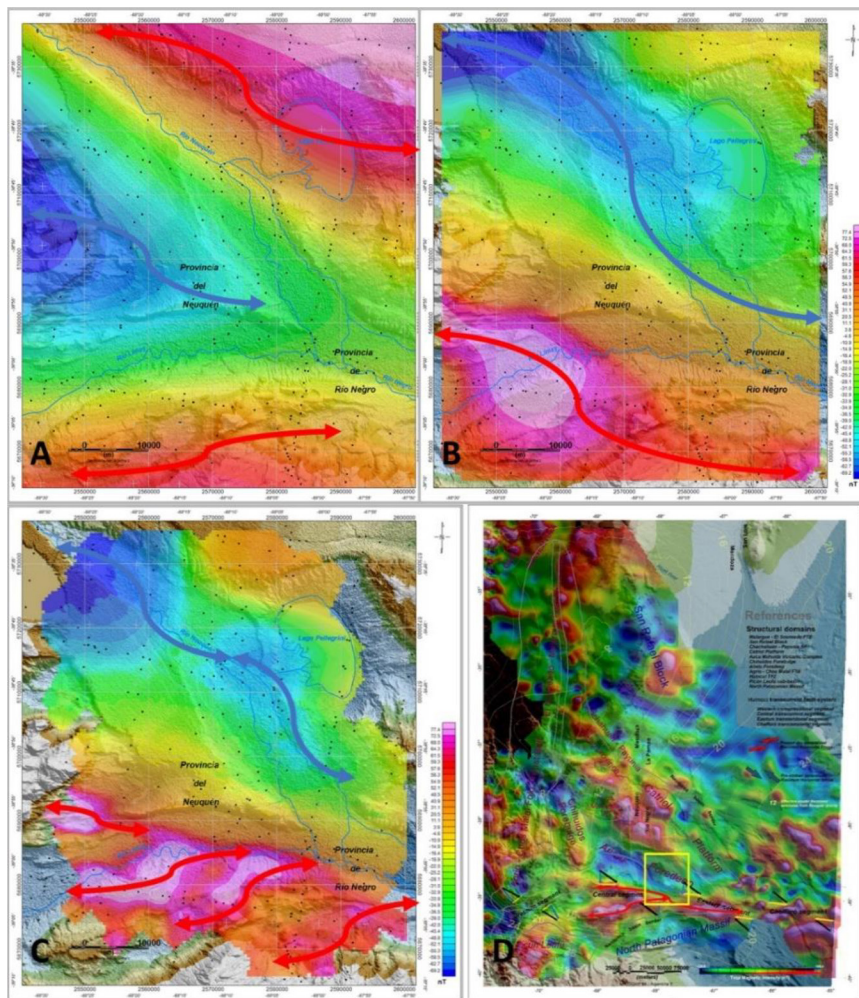


Figura 5. Mapas de anomalías magnéticas (intensidad magnética total, TMI) en la confluencia de ríos Neuquén y Limay, a partir de tres fuentes de información de diferentes longitudes de onda:

Satélite, 2009 (Maus *et al.* 2009).
Aérea regional, 1970.
Aérea local, 1996.

La iluminación del subsuelo en el bajo de Añelo y la dorsal de Huincul, si bien muestra la existencia de máximo/mínimo (rojo y azul) de orientación general NO-SE, la resolución lateral es diferente (fechas azules y rojas).

La longitud de onda espacial y el espectro son diferentes, lo cual hace que la estimación de profundidades de las fuentes, también. El relevamiento de alta resolución de 2.470 km² de 1996 es preferible, no sólo porque logra estimar de forma consistente a pozos y sísmica una profundidad al basamento del orden de 6,54 km, sino porque resuelve lateralmente tres cuerpos individuales al sur del área (C) lo cual permite inferir la existencia de tres o un basamento segmentado por la presencia de fallas.

La figura D, Sigismondi (2013) integra observación de las fuentes A, B y C.

contingencias es asombrosa: en el empleo de atributos en dominio de la amplitud; en estructuras complejas de S/R (Señal/Ruido) deficiente; en la ubicación y geometría de fallas; en predicciones de propiedades de reservorios; en remoción de footprint (huella de adquisición); en las correcciones estáticas o análisis de velocidad, por mencionar las más comunes. Debido a que se muestrean velocidades de propagación de ondas, la ambigüedad entre la velocidad y la profundidad, en escenarios geológicos de velocidades que varían lateralmente, aun estabilizadas con técnicas de suavizado, generan fuentes de incertidumbres en la interpretación.

Teniendo en cuenta aquellos aspectos que influyen en la ambigüedad sísmica, más allá del alcance de este estudio, se ilustra un paradigma relacionado a la influencia combinada entre la topografía y el espesor de la capa de baja velocidad sobre la imagen estructural y estudios de reservorios (Figuras 6 y 7) y la importancia del diseño de adquisición (Figura 8) para el estudio de reservorios de arenas compactas (*"tight-gas"*) en dos zonas en principio sin mayores dificultades del ambiente estructural del bajo de Añelo.

La ambigüedad sísmica en el muestreo de la velocidad de subsuelo no es algo exclusivamente originado durante la registración, se puede deber a muestreos de velocidades que varían de un procesamiento a otro. En la etapa de “migración” en tiempo o en profundidad, dependen no sólo de la experiencia del profesional, sino de la propia interpretación (Brown, 2005). Sin embargo, en la Figura 8 se pone de manifiesto un caso de estudio de arenas tipo *tight-gas*, en el que se busca identificar por técnicas de inversión, aquellas de alta impedancia. Una registración sísmica de 1996 y otra veinte años después, ilustran cómo tres parámetros críticos del diseño al objetivo, fold de cobertura, distribución de azimuths y distribución de offsets, pueden alterar el rango de ángulos en dominio prestack (gathers) y por tanto el resultado final de estimación de densidad y de áreas mineralizadas a desarrollar.

Por lo tanto, deberíamos concluir que también en sísmica existen ambigüedades inherentes que condicionan la interpretación, uno de los argumentos por los cuales periódicamente se reprocesan volúmenes 3D, o llegado el caso, se justifican diseños y adquisiciones nuevas sobre zonas cubiertas previamente.

RESULTADOS

Los métodos potenciales en interpretación sísmica

Para comprender cómo los métodos potenciales pueden auxiliar al intérprete sísmico, enfocaré el análisis en casos de estudio de observaciones a escalas regionales o locales, tanto de la problemática relativa a la imagen estructural, conversión a profundidad, modelado y/o inversión, correspondan a zonas de frontera exploratoria, inter-yacimientos o yacimientos, priorizando los casos de estudio de magnetismo.

Antes de entrar de lleno en los ejemplos, quisiera advertir de algunas características en magnetismo y gravedad en las cuales existen más certezas que indeterminación (Reid 1980).

En magnetismo, las anomalías están compuestas por negativos y positivos, más aún en latitudes intermedias, de manera que una interpretación válida maneja ambas partes como provenientes de una sola fuente. La operación llamada “reducción al polo” (Baranov y Naudy 1957) es un proceso fundamental que, en la mayoría de las situaciones, produce imágenes que representan la geometría de los cuerpos mucho mejor que los datos TMI (intensidad magnética total). Su base física se basa en la teoría de campos potenciales y su aplicación transforma los datos medidos de TMI a la inclinación del campo de la Tierra (i) como si el relevamiento se realizara en los polos magnéticos ($i = 90^\circ$), minimizando en esencia la naturaleza dipolar de las anomalías, lo cual facilita la comparación a los mapas de anomalías de Bouguer. El modelado y planificación de un relevamiento magnético es una práctica que permite cancelar o minimizar el efecto del aliasing de muestreo insuficiente, análogo al footprint de amplitudes sísmicas. Al respecto, Reid

(1980) reconoce la importancia de no proyectar vuelos con líneas oeste-este, pero se entiende se refiere a un escenario en el cual no se conoce el rumbo de las estructuras a iluminar. En la Cuenca Neuquina, los estudios precursores de Braccacini (1964) o recientes (Mosquera y Ramos 2005, entre otros) identifican la existencia de tres rumbos estructurales principales, factor crítico para planificar relevamientos aéreos, como se pone de manifiesto en la fábrica de basamento gravimétrico (Figuras 4 y 9) o signature magnética (Figura 10).

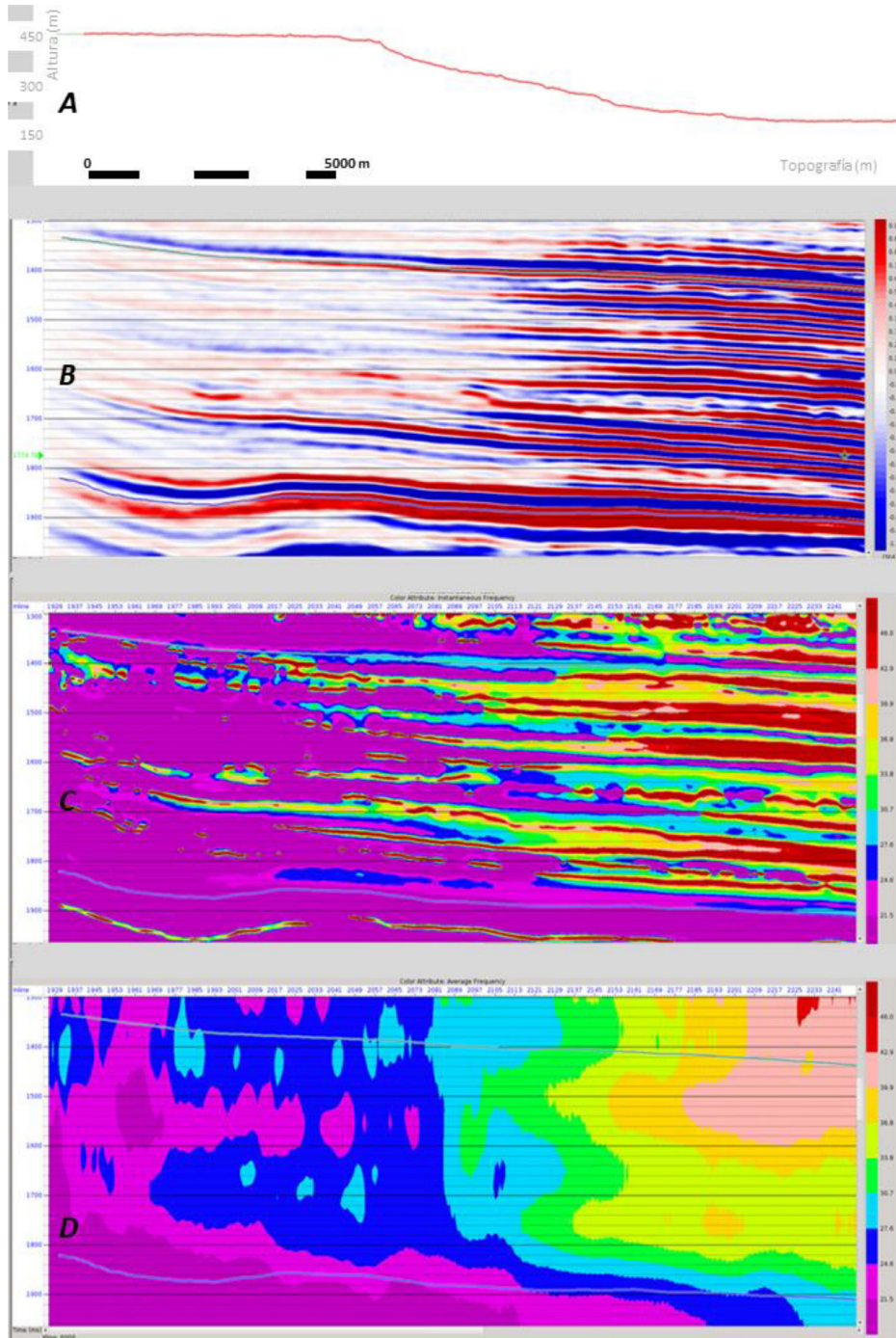


Figura 6. Ambigüedad de la interpretación sísmica 3D.

Los métodos sísmicos se reconocen, respecto a los de campo natural, de mayor precisión en la confección de la imagen estructural del subsuelo. Sin embargo, ciertas circunstancias se deben alertar de la ambigüedad en sus respuestas.

Un relieve topográfico elevado (A), combinado a la presencia de un espesor mayor de capa meteorizada, actúa de pantalla de absorción de energía. Este efecto es notable tanto en la amplitud (B) y en los atributos de traza compleja. Se debe prestar atención a la pérdida de frecuencias instantánea (C) y promedio (D) del lado topográfico elevado, lo cual origina deterioro en la imagen de los reflectores, no sólo de la imagen estructural sino para estudios de sismoestratigrafía.

Un perfil perpendicular al río Neuquén a partir de un volumen sísmico 3D ubicado en el centro de la cuenca Neuquina, de un desnivel de 200 m en superficie (Véase la Figura 7), ilustra la incertidumbre.

Respecto al cálculo de profundidad de las fuentes magnéticas, se puede realizar a partir de diversas técnicas, tanto en perfiles como grillas. Si el objetivo primordial es estimar la geometría del basamento, y si el mismo está controlado por fallas con más razón, las técnicas de SPI (Source Parameter Imaging, Thurston y Smith 1997), deconvolución de Euler (Reid *et al.* 1990), o Señal Analítica (Salem y Ravat 2003) han demostrado coherencia y consistencia comparados con sísmica 3D o 2D en diferentes proyectos de la cuenca Neuquina. En gravimetría, una característica que lo hace más simple es que, mientras el campo magnético es dipolar, el campo de gravedad es monopolar. Si bien las ecuaciones del campo de gravedad y los consiguientes esquemas de modelado son menos complejos que los magnéticos, las ambigüedades en interpretación, Dobrin y Savit (1988) enfatizan e ilustran el fenómeno), teóricamente son mayores, puesto que la señal de gravedad tiene un rango dinámico inherentemente más bajo que el de los datos magnéticos y el contraste relativo de densidad es menor respecto a la susceptibilidad magnética, lo cual sísmicamente equivalente a un menor ancho de banda (Figura 7) para resolver un cuerpo. Sin embargo, para un intérprete sísmico en la práctica, la inspección de un mapa de anomalías de gravedad es más directa y sencilla: un alto estructural de basamento debería corresponder a un máximo relativo y la conversión a profundidad es directa y sencilla, si bien no tan robusta como en magnetismo, especialmente si el relieve de basamento está controlado por fallas. Por último, el campo de gravedad es matemáticamente equivalente a la integral del campo magnético, lo que significa que también está compuesto inherentemente de longitudes de onda más amplias.

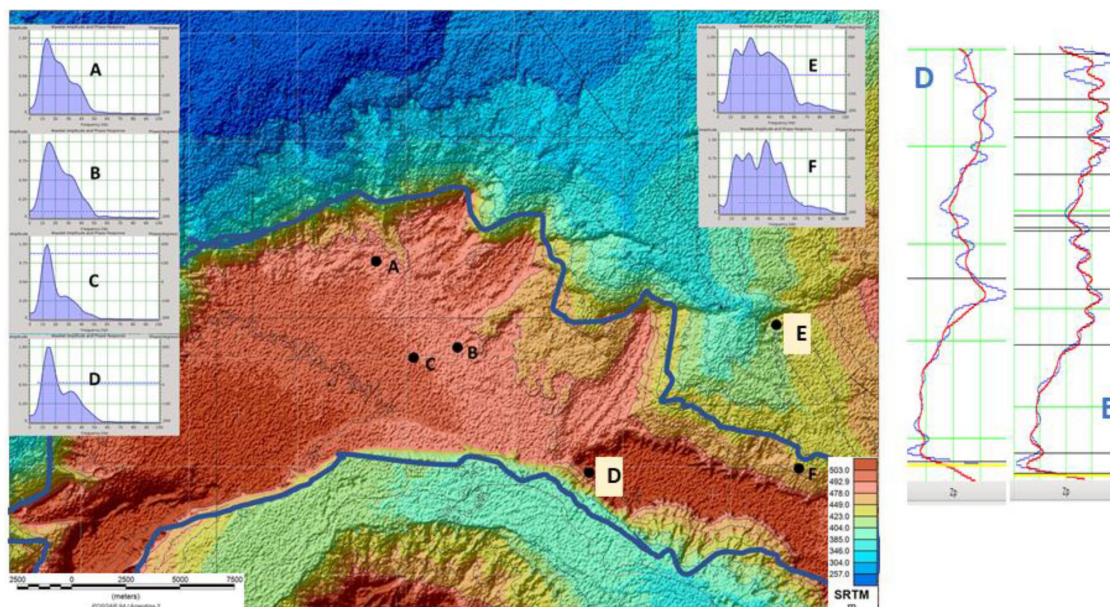


Figura 7. Ambigüedad sísmica 3D. Un efecto combinado entre topografía, weathering y geología de superficie deteriora el ancho de banda sísmico, como se observa en las posiciones A, B, C y D ubicadas sobre la planicie del río Neuquén, respecto a E y F. Según sus espectros de frecuencia, el prejuicio es significativo, pasando de 5-65 Hz a 5-35 Hz, respectivamente. En consecuencia, no sólo se perturba la resolución e imagen estructural (Figura 6) sino el resultado de la caracterización sísmica de reservorios, incertidumbre que se pone de manifiesto una ventana entre 1.200-1.600 ms, a partir de la inspección de la consistencia que se esperaría conseguir entre la traza de impedancia del pozo y de la inversión de trazas sísmica (curvas color azul y rojo, a la derecha de la imagen) ejemplificando en las posiciones D sobre la barda y E debajo de la barda.

Estudios aplicados a obtener la imagen estructural regional

El empleo de gradientes permite identificar la orientación y continuidad geológico-estructural del subsuelo (Cordell 1978; Blakely y Simpson 1986; Grauch y Cordell 1987). A partir de información gravimétrica terrestre, se procedió a la caracterización de la fábrica del basamento por medio de la curvatura máxima gaussiana (Roberts, 2001) de la anomalía residual de Bouguer (Figura 9). Se trata de un atributo matemático similar a las derivadas segundas horizontales, que describe el relieve del basamento asociando los signos positivos y negativos a elevaciones y depresiones, respectivamente, siendo los picos indicios de las crestas de las estructuras (Sigismondi y Soldo 2003). El arreglo regional de las discontinuidades en tres tendencias principales (N-S; NO-SE y O-E) iluminada con gravedad ha sido reconocida en trabajos de detalle (Cristallini *et al.* 2009; Silvestro y Zubiri 2008) y corroborados en sucesivas campañas de sísmica 3D.

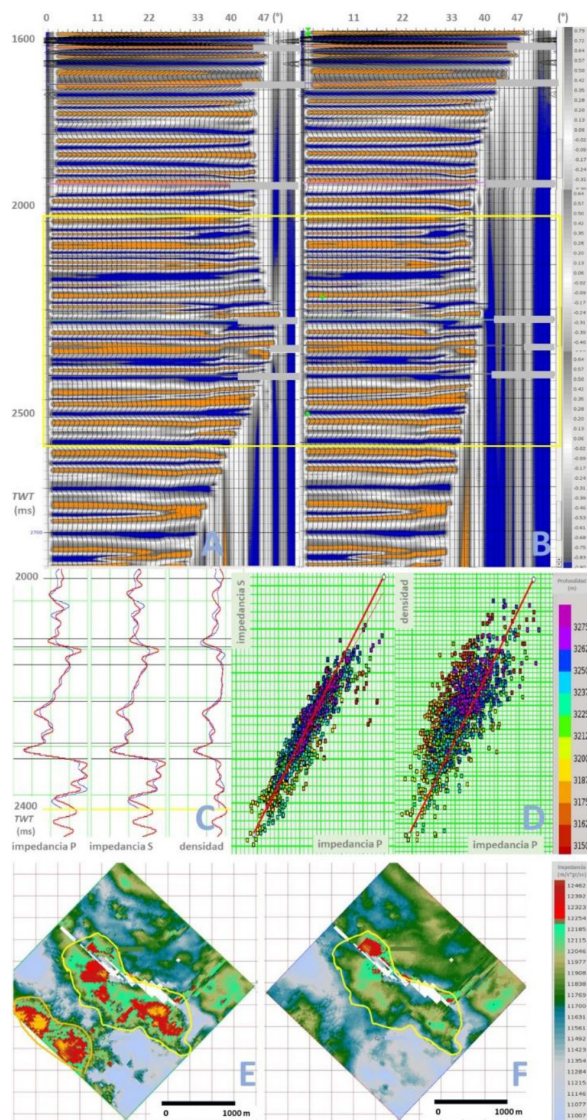


Figura 8. Ambigüedad en la caracterización sísmica de reservorios.

La conversión desde el dominio de distancia al dominio de ángulos de datos presuma (gather), es un paso crítico para ingresar a la inversión simultánea/prestack, pero no tiene resultado unívoco: depende, entre otros factores, del diseño de adquisición para la ventana de interés a estudiar, o del modelo de velocidad utilizado, elemento manejado por el procesador y/o el intérprete.

A mayor rango de ángulos en la ventana de interés (recuadro en amarillo, figuras A y B), mayor será la probabilidad de recuperar o estimar la traza de la densidad (C) desde la inversión, escenario que para datos terrestres no es tan sencillo de conseguir por la geometría y logística (rango de offsets) de registración.

En dos levantamientos sísmicos 3D en una zona de yacimientos maduros del centro de cuenca Neuquina, realizados en los años 1995 y 2016, se ejemplifica e ilustra al respecto.

Un control de calidad consiste en la inspección de respuestas de impedancias y de densidad entre el dato de pozo y el dato sísmico (C y D).

Un examen de los mapas de anomalías de impedancia (E y F) en el intervalo correspondiente a reservorios de arenas *tight-gas*, muestran áreas diferentes para el desarrollo de yacimientos, de manifiesto en el polígono amarillo.

Sencillamente: si la sísmica fuera una herramienta sin ambigüedad no se necesitaría periódicamente reprocesamientos. El intérprete sísmico también convive naturalmente con la incertidumbre en los resultados, aun tratándose de un método de muestreo e iluminación del subsuelo de varios órdenes de magnitud mayores tanto vertical como lateralmente respecto a métodos potenciales.

Otros ejemplos de implicancias geodinámicas se pueden observar en los mapas de las Figuras 4 y 19, en la caracterización del basamento y discontinuidades mayores a partir de las anomalías isostáticas y de Bouguer, respectivamente), integrando información terrestre, aérea y satelital (Sigismondi 2013). A partir de anomalías magnéticas (Figura 10), es posible observar la existencia de un prominente lineal de discontinuidad de primer orden atribuida al límite tectónico del terreno de Patagonia (Ramos *et al.* 2020).

Estudios aplicados a la conversión a profundidad en zonas de frontera exploratoria interyacimientos

De acuerdo con el marco estructural, disponibilidad de datos sísmicos y pozos perforados, la faja plegada y corrida del Agrio-Chos Malal se puede catalogar como una región de frontera exploratoria, desde el punto de vista petrolero. Las campañas de sísmica 3D son elocuentes: sólo seis registraciones cubren un 3% del total de la cuenca Neuquina. El auxilio de magnetismo aéreo cubriendo 20.928 km² de 2006, ha posibilitado recuperar la imagen en profundidad del basamento

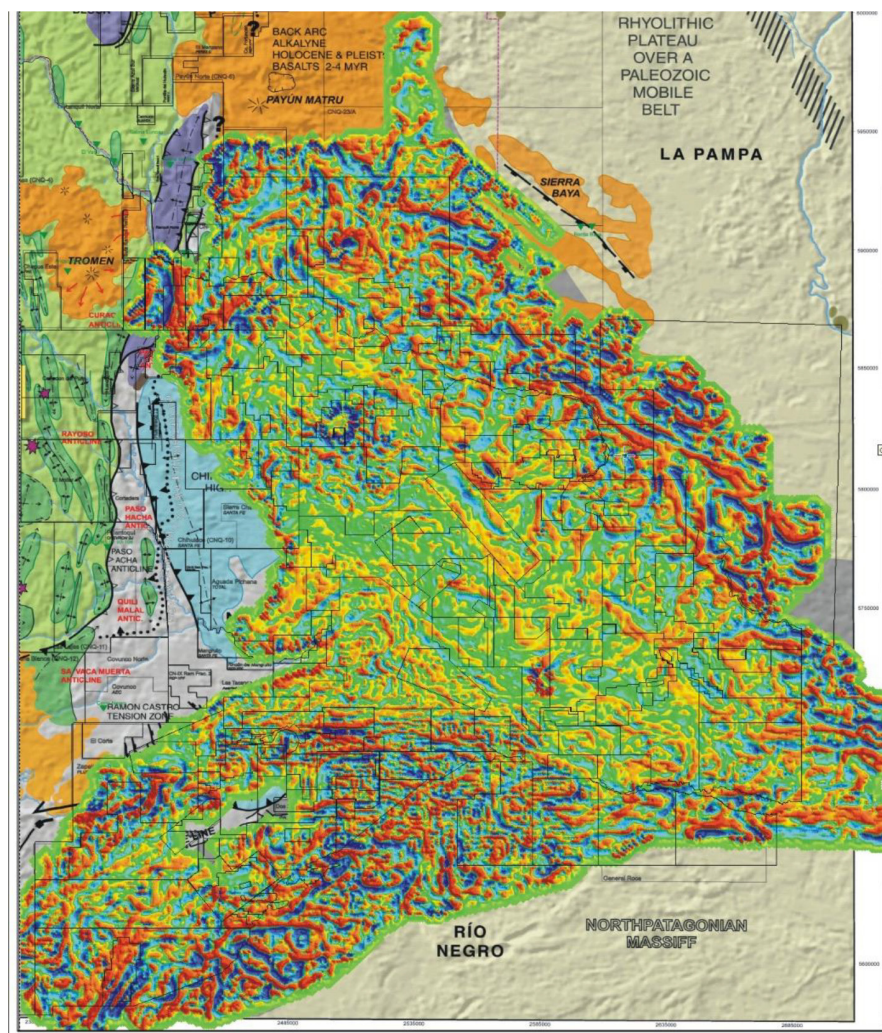


Figura 9. Cuenca Neuquina: curvatura (Roberts 2001) máxima gaussiana de la anomalía residual de Bouguer análogo a Lidiak *et al.* (1985). Colores cálidos y fríos, representan a las elevaciones y depresiones relativas, entre +1 y -1.

Advertir los cambios en texturas de las fábricas de basamento gravimétrico, por ejemplo:

Configuración lineal de la dorsal de Huíncul en rumbo primordial O-E; arreglo radial en el Auca Mahuida; NO-SE plataforma oriental; fosa de China Muerta SO-NE, que ponen de manifiesto el valor y la contribución al conocimiento del subsuelo del dato de gravedad, más aún cuando no existe un solo volumen sísmico que abarque toda la cuenca.

Las regiones estructurales y leyendas han sido tomadas del Adjunto 19 de Phoenix Oil & Gas SA, Julio de 2001.

(Figura 10) a partir de la conversión de anomalías RPT por la técnica SPI (Thurston y Smith 1997). Las depresiones y elevaciones relativas asignadas a la interfase sedimentos – basamento, se identifican, respectivamente, en colores fríos y cálidos. Luego, a la grilla de profundidad magnética se la transfirió a una estación de interpretación sísmica y se la comparó a los cortes horizontales en 3D, identificados con las letras A, B, C, D, E y F (Figura 11): Cañadón del Puma, Cortaderas, Las Lajas, Las Tacanas, Covunco sur y Anticlinal Campamento.

Un escenario de restricciones medioambientales, permisología y logística en registración para el Desarrollo de yacimientos (Figura 12) de 220 km² que aún permanecen sin imagen 3D se expone como experiencia del empleo de datos aeromagnéticos, en el siguiente apartado.

Estudios aplicados a la conversión a profundidad en zonas de yacimientos

Presentaré tres ejemplos de la Cuenca Neuquina.

En el primero corresponde destacar que, aún después de cinco campañas de registración sísmica 3D en un lapso de veinte años (1995-2016) orientadas al Desarrollo de yacimientos de arenas compactas *tight-gas*, alrededor de 200 km² son inaccesibles, fundamentalmente por la existencia de obstáculos culturales, logísticos y naturales, hasta el presente insalvables. Para mitigar esta dificultad, los métodos potenciales combinados que cubren íntegramente los bloques de interés han permitido iluminar el basamento magnético y obtener los principales rasgos estructurales. Para el intérprete sísmico, inferir cómo el basamento interviene en la deformación sedimentaria donde no existe cobertura sísmica, ilustrado en la existencia de dos espolones principales (Figura 12) tanto a niveles de la Fm. Vaca Muerta (sísmica) como del basamento (magnetismo) estimula a la búsqueda, en zonas de frontera de yacimientos, de analogías respecto a las posibles ubicaciones de nuevas zonas de interés.

En el segundo ejemplo, la premisa es comparar la solución de estimación de profundidad del basamento magnético contrastando a 450 km² de 3D sísmico (Figura 13), en un ambiente de altos estructurales de basamento y grandes espesores de facies volcániclasticas (Gr. Precuyano) en una zona de transición entre la dorsal de Huincul, dorso de los Chihuidos y faja plegada del Agrio - Chos Malal. La identificación de fallas ha sido respaldada por atributos sísmicos (curvatura y coherencia, Figura 15) y perforaciones, mientras que las anomalías aeromagnéticas RTP (Figura 14) provienen del levantamiento regional de los 1970's, diseñado en una grilla N-S de equidistancia 10 km, y líneas de control ortogonales cada 30 km, cuya finalidad era la identificación de zonas propicias para campañas de registración sísmica de 2D. Obsérvese que el relieve del basamento magnético muestra un conspicuo alto estructural al oeste, y las fosas sedimentarias conocidas por sísmica, en un rango de valores entre -1.750 mndm y -5.000 mndm. Se pone de manifiesto las anomalías magnéticas convertidas a profundidad logran una imagen estructural consistente a sísmica. A pesar de no emplearse un dato aeromagnético de alta resolución, la robustez del

resultado trasciende la conversión a profundidad y sugiere revisar el paradigma de la ambigüedad atribuida a los métodos potenciales en contextos análogos. Las Figuras 15 y 16 ilustran al lector de la fortaleza de las predicciones magnéticas, y su utilidad no sólo en la interpretación sísmica sino también para planificar campañas de nuevas registraciones en zonas de frontera exploratoria análogas.

El tercer ejemplo es el sistema volcánico fisural Plioceno-Pleistoceno Auca Mahuida, de complejidad sísmica unida a: logística de adquisición (topografía), restricciones ambientales (Área Protegida) y principios físicos (cubierta superficial basáltica). La presencia de cuerpos ígneo-metamórficos concordantes y discordantes con la estratificación, espesores de cientos de metros y elevados contrastes de susceptibilidad, originan anomalías de alta frecuencia, y estimaciones de

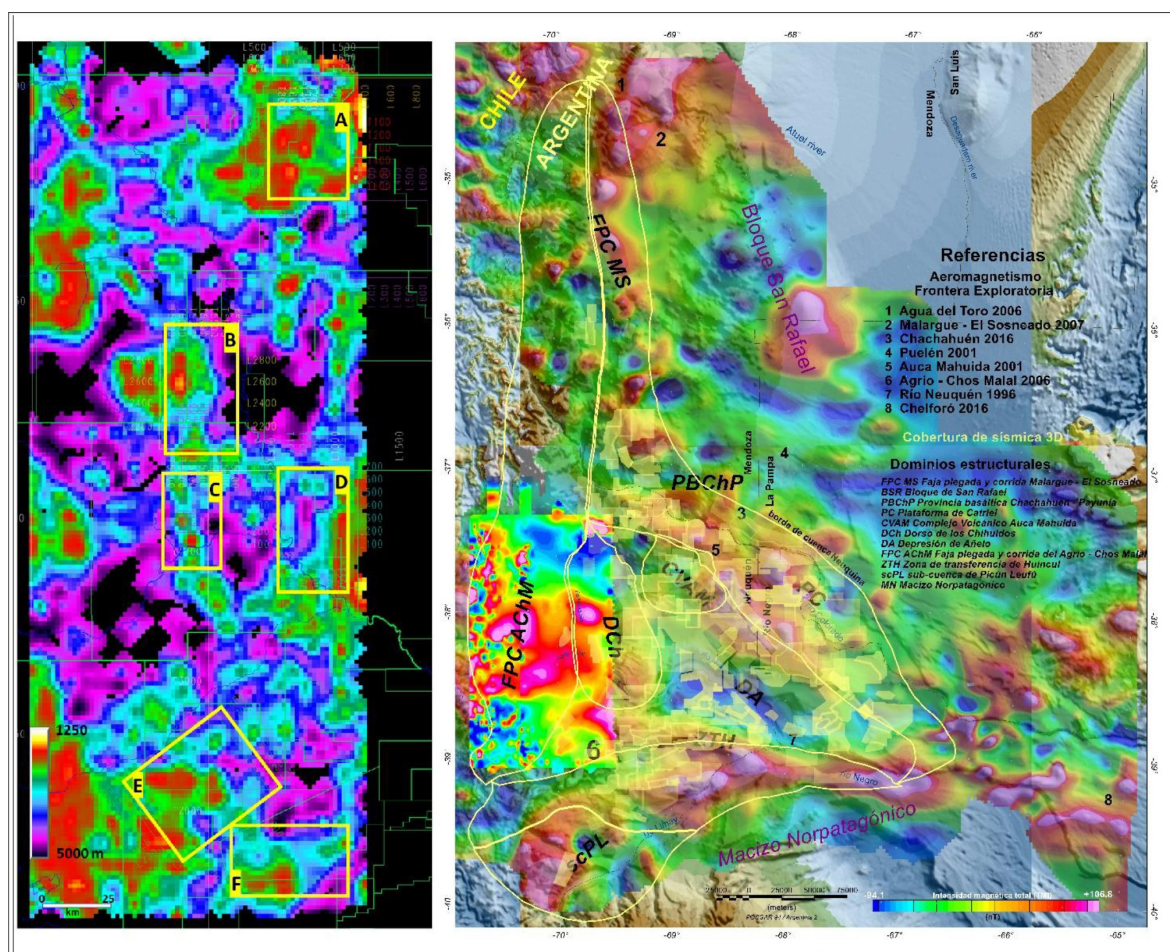


Figura 10. Conversión a profundidad de las anomalías magnéticas (izquierda) de la faja plegada y corrida del Agrio - Chos Malal, cuya ubicación relativa se muestra en contexto regional filtrada a longitudes de onda mayores, a la derecha. Una de las diferencias más importantes que existen entre este sector de la faja plegada y las otras zonas de frontera, radica en el hecho que además del levantamiento aéreo de aproximadamente 20.928 km² también se realizaron campañas de geología de superficie, levantamiento de perfiles semiregionales y captura de información gravimétrica y de susceptibilidad magnética de las rocas aflorantes (Raniolo 2007). La inspección de un mapa de anomalías magnéticas no es intuitivo como uno de gravedad: pueden existir depresiones y elevaciones relativas del basamento, sin una relación unívoca a los máximos y mínimos de las anomalías, respectivamente. Se hace necesario elaborar alguna conversión a profundidad (Spector y Grant 1970; Naudy 1971; Thompson 1982) para una interpretación fidedigna. Por medio del empleo del método SPI (Thurston y Smith 1997) se muestra el relieve relativo con altos y bajos en colores cálidos y fríos, correspondiendo a los colores negros los valores de mayor profundidad, en metros. Los levantamientos sísmicos de 3D (letras A, B, C, D, E y F) de la Figura 11 se muestran en polígonos amarillos.

profundidad en un escenario apartado de la teoría, pero que verifican las elevaciones y depresiones relativas del basamento sísmico (Figura 17), en un arreglo geométrico radial.

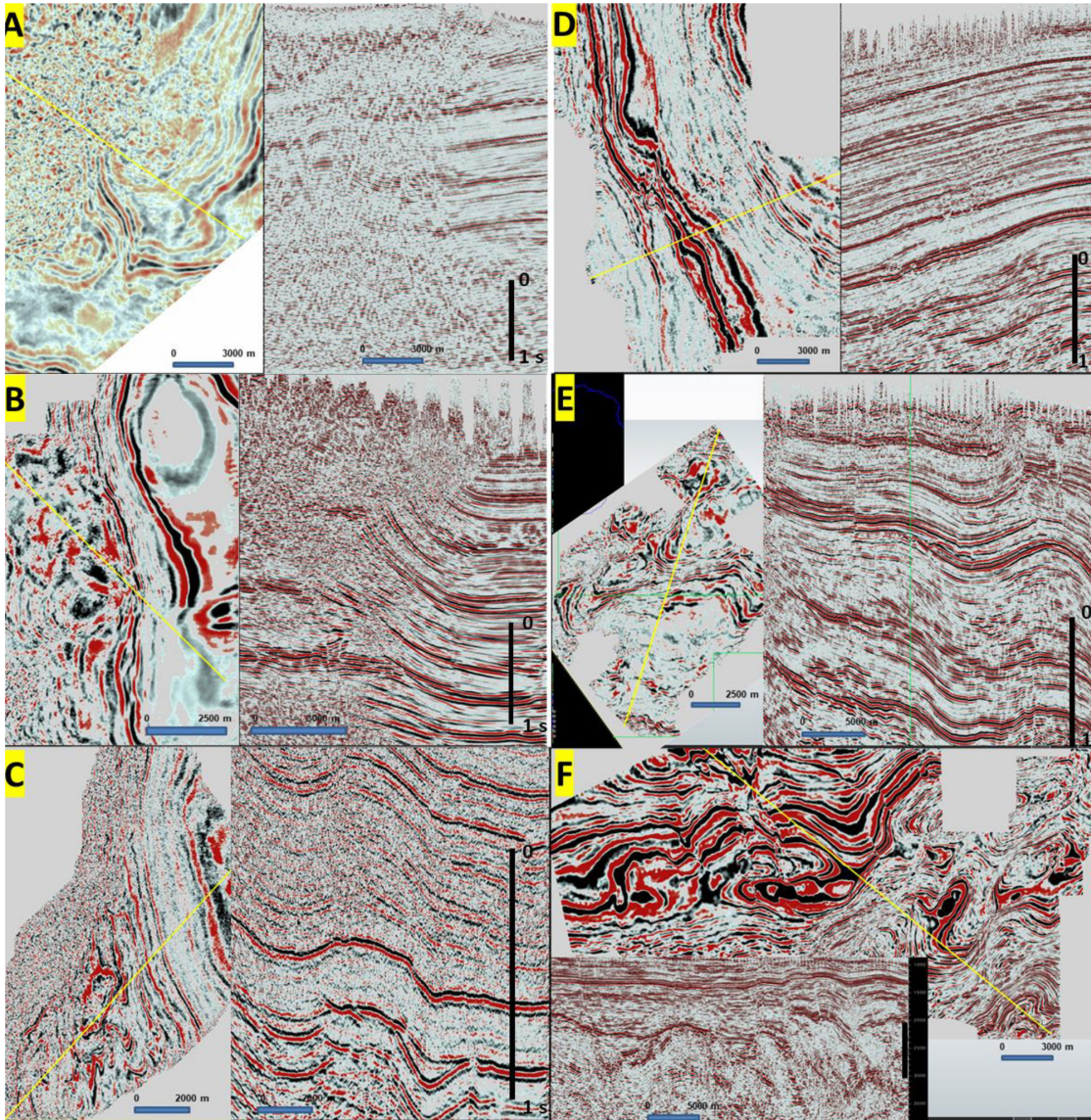


Figura 11. Analogía entre el relieve del basamento magnético y sísmico en áreas cubiertas por sísmica 3D.

A) Un corte sísmico en tiempo constante a 3.600 ms y una sección NO-SE. Obsérvese que, la solución de conversión a profundidad por el método de SPI (elevaciones y depresiones relativas del relieve magnético en tonos cálidos (amarillos, rojos y verdes) y fríos (violetas y azules, Figura 10 A) predice la existencia de un alto estructural de basamento al oeste que es consistente a la baja S/R del dato sísmico y en un rumbo estructural N25°O igual. El método de estimación SPI calcula las profundidades suponiendo un modelo tipo escalón, consistente a zonas falladas. B) El relieve magnético (Figura 10B) muestra al oeste, una elevación de basamento (color rojo) también honrada por el time-slice sísmico a 3636 ms, y la traza en dirección NO-SE. C) La conversión a profundidad muestra hacia el noroeste una elevación de basamento (color rojo, Figura 10 C) también honrada por el time-slice sísmico a 3.270 ms, y la traza con rumbo SO-NE. D: El relieve magnético en muestra hacia el oeste un hundimiento notable del basamento (Figura 10 D, rojo) consistente al corte de tiempo constante a 3.310 ms y a la traza OSO-ENE. E: La solución SPI muestra hacia el sur una elevación de basamento (color rojo, Figura 10 E) respetada por slice a 3.452 ms y la traza en dirección casi N-S. F) El relieve magnético en Figura 10 F muestra un alto estructural al sur, que en sísmica se resuelve como un sistema de fallas que segmenta bloques elevados y deprimidos al basamento, de rumbo promedio SO-NE. El time-slice sísmico está a 2.450 ms y la sección de NO-SE. Téngase en cuenta las variaciones de escalas en sísmica, representados por sementos verticales de tiempo doble (color negro) o distancias horizontales (azul).

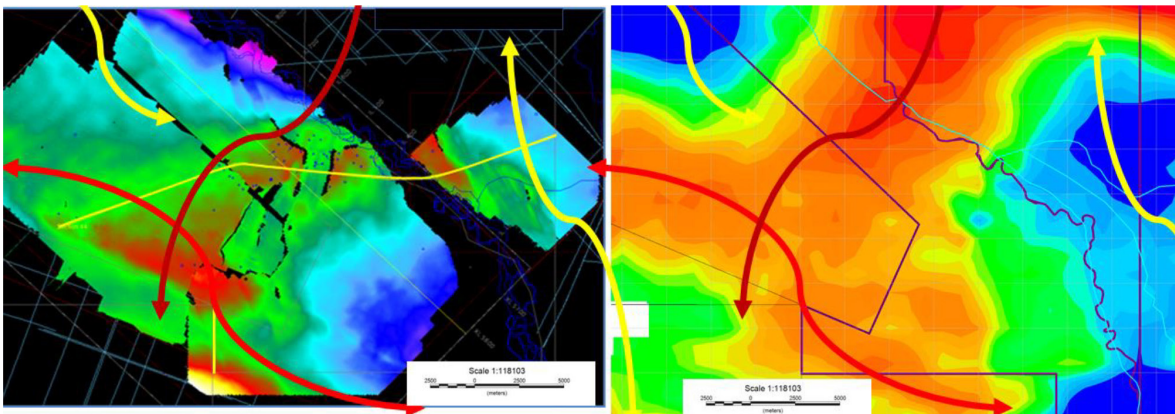


Figura 12. Caracterización magnética del basamento, cuenca Neuquina. Obsérvese la consistencia entre la imagen sísmica en tiempo doble y la magnética en profundidad. Por un lado, la presencia de dos espolones elevados (colores rojos) de orientación general SSO-NNE y ONO-ESE, en la imagen estructural de la base de Fm. Vaca Muerta, a partir de tres adquisiciones sísmicas 3D yuxtapuestas (izquierda) del orden de 626 km². En segundo lugar, a partir de una prospección aérea local que cubre 2.470 km² es factible descubrir el fuerte control que desempeña el basamento en la deformación de toda la columna sedimentaria, con un esquema similar en rumbo (en rojo elevaciones relativas) utilizando la técnica SPI para conversión a profundidad de las anomalías magnéticas. La imagen magnética juega un rol primordial para construir un cuadro estructural completo, pues debido a restricciones ambientales y/o permisología, no ha sido posible, en al menos cinco campañas sísmicas 3D (1995/96/99/ 2015/16) cubrir por completo la confluencia de los ríos Neuquén y Limay, donde se asientan los centros urbanos más importantes de la región. La registración sísmica muestrea el subsuelo con celdas cuadradas de 25 m de lado, mientras que la captura de datos magnéticos se realizó en promedio de 15 puntos/km² volando a 400 m sobre el terreno.

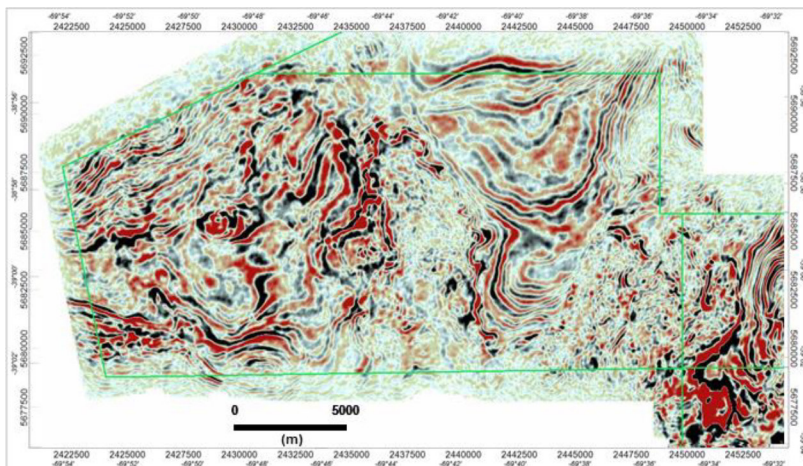


Figura 13. Un corte a tiempo constante a 2.200 ms ratifica la existencia de zonas elevadas y deprimidas, típicos reflectores de baja S/R discontinuos y elevada S/R continuos, del basamento acústico y la columna sedimentaria. El muestreo sísmico del subsuelo sensible a cambios verticales proviene de celdas de 25 m de lado, siendo en total 720.000 trazas que cubren aproximadamente 450 km². Comparar a la Figura 14.

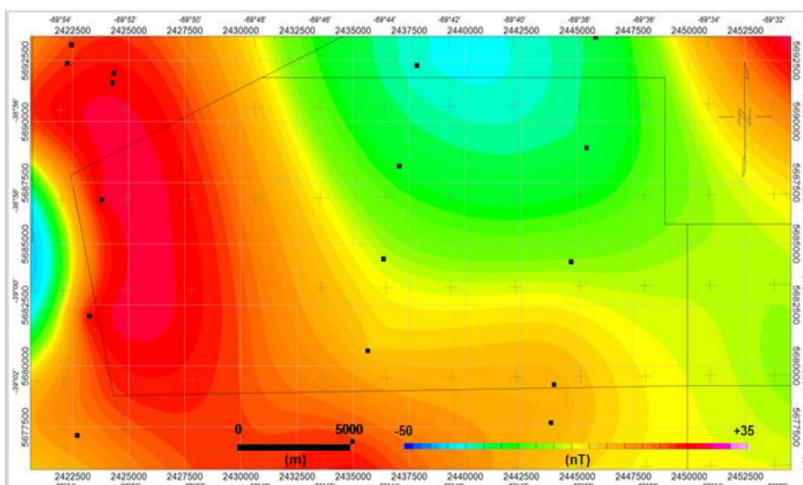


Figura 14. Anomalías RTP. La adquisición consistió en líneas de vuelo N-S y de control ortogonales, cada 10 y 30 km, respectivamente. En este mapa la separación es del orden de 13 km, por lo cual para la confección de esta imagen de anomalías disponemos de 30 valores, perceptibles en particular a cambios laterales, en un rango de - 50 nT y +35 nT. La relación entre el muestreo magnético y sísmico es del orden de 1:20000. Véase la Figura 13.

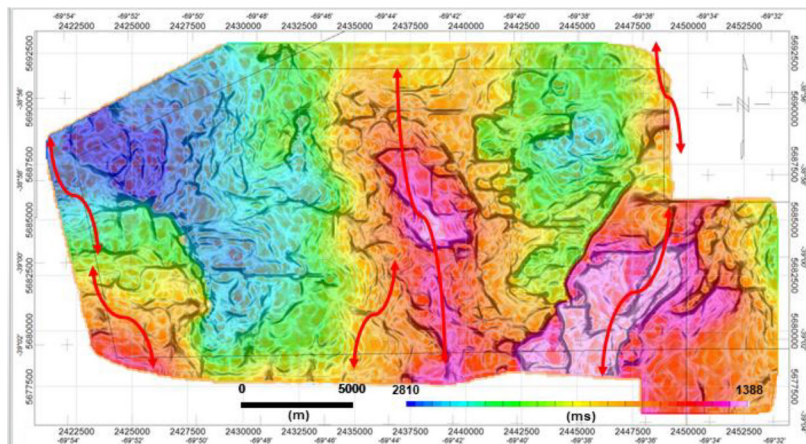


Figura 15. Mapa estructural en tiempo del basamento sísmico.

Los altos y bajos en colores cálidos y fríos, respectivamente, mientras las discontinuidades en segmentos negros a partir de curvatura y coherencia (De Simone y Sigismondi, inédito 2019).

El relieve está entre 1.388 ms y 2.810 ms, equivalentes en profundidad a 2.200/2.800 m y 4.000/4.500 m, zonas respectivamente, elevadas y deprimidas.

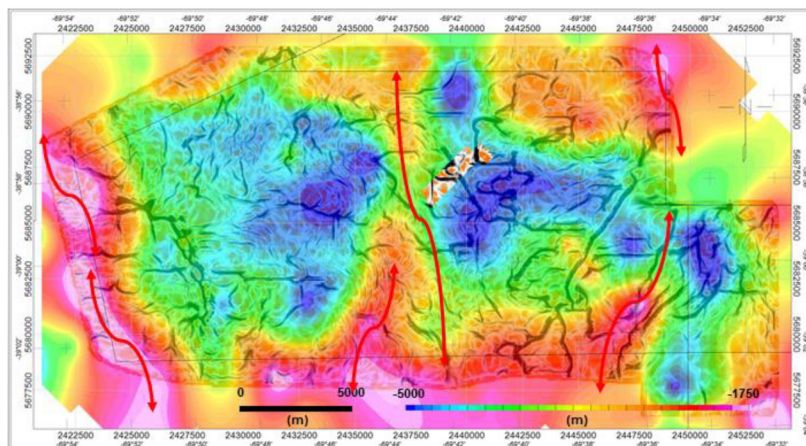


Figura 16. Mapa estructural en profundidad basamento magnético (colores) superpuesto a sísmica (flechas en rojo para elevaciones y segmentos negros para fallas).

La interpretación magnética implica determinar los parámetros que caracterizan a la fuente de anomalía. Si bien la estimación de profundidad depende del modelo asumido, el método SPI (Thurston y Smith 1990) es, idealmente, el mejor para este caso, porque ha sido ideado para contactos de escalones (fallas) típicos de basamento.

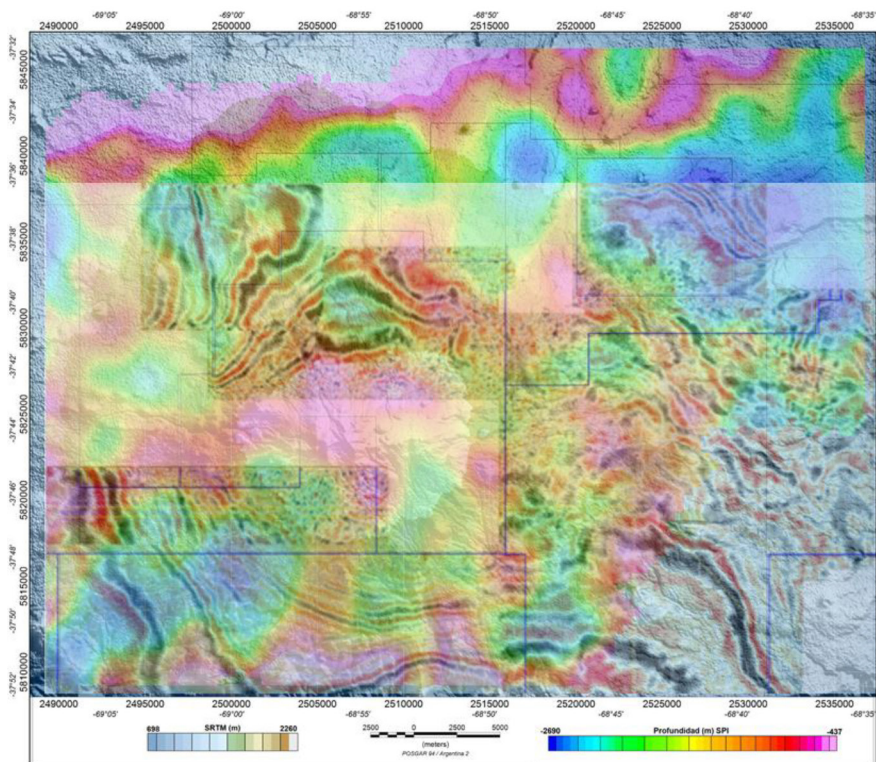


Figura 17. Basamento magnético del complejo volcánico Auca Mahuida a partir de SPI.

La imagen transparente es un time-slice tomando siete volúmenes. Carece de 3D sísmico unos 172 km².

Se destacan lineamientos NO-SE de fracturas que se relacionan a la implantación del cuerpo volcánico central. Las elevaciones relativas del basamento magnético provienen de las anomalías residuales RTP, presentan un arreglo radial, se ilustran en colores cálidos.

La registración combinada gravimetría-magnetometría se realizó en el año 2001 a una altura promedio de 2.830 msnm, y es de 1.500 km² aproximadamente.

Estudios aplicados a conversión a profundidad en zonas de frontera de nuevas áreas de Exploración

Imagine una región de frontera exploratoria (sin un sistema petrolero activo o eficiente conocido actual) de 10.000 km² en la cual disponemos de diez líneas sísmicas 2D que cubren menos del 10 %, y una perforación petrolera. El bloque de exploración de Chelforó, provincia de Río Negro, es paradigmático, sólo el sector oeste poseía sísmica 2D de bajo fold, en un mallado de dirección NE-SO de 5 km entre líneas siguiendo ortogonalmente el lineamiento estructural

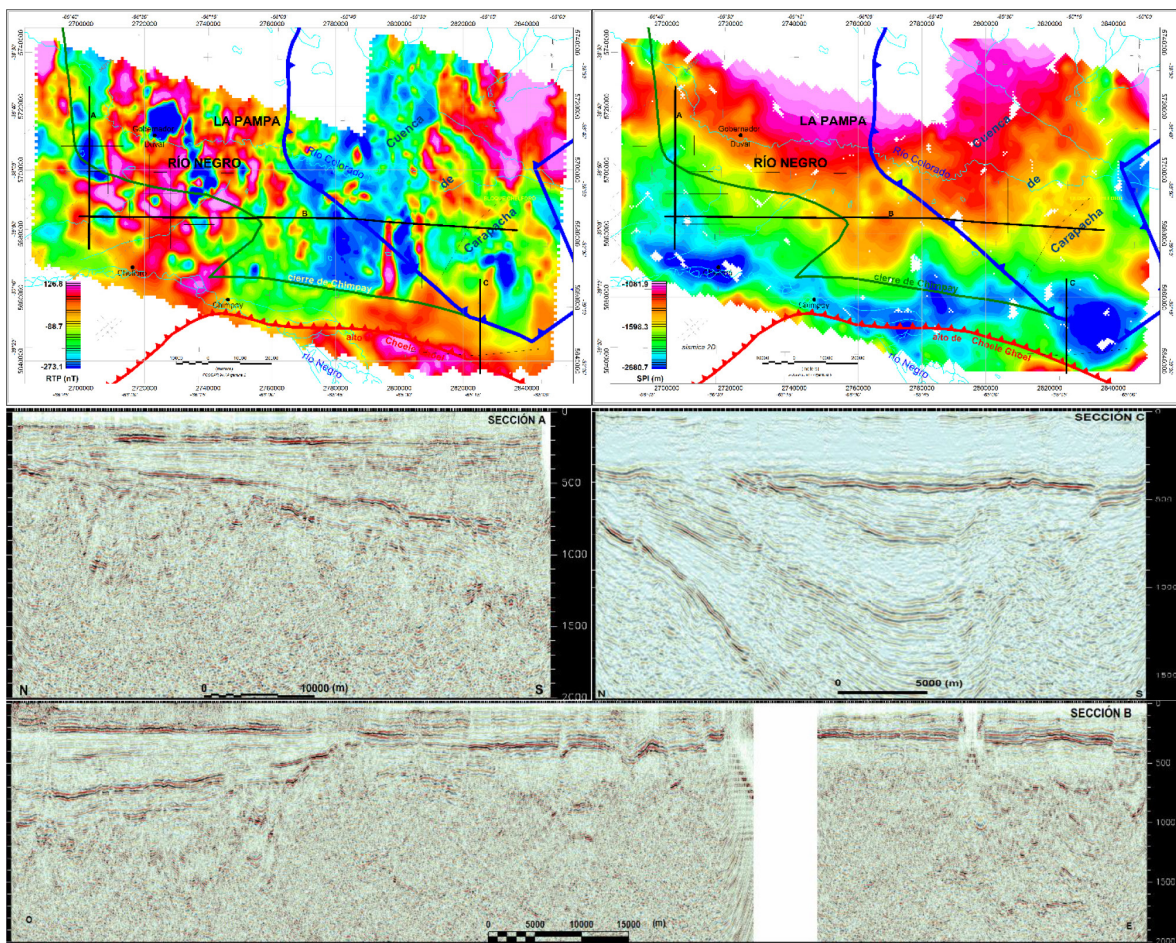


Figura 18. Basamento magnético, bloque de Chelforó, frontera exploratoria. Mapa de anomalías residuales RTP (arriba, izquierda) y estimación de profundidad del basamento (arriba, derecha). La sección sísmica A, dirección NS de 50 km de longitud al oeste del área, coincide con la predicción SPI respecto a la existencia de un depocentro sedimentario (Grupo Precuyo al sur); la sección B cruza el bloque de oeste a este en 137 km de largo, respetando los altos y bajos relativos de prognosis magnética; la Sección C, al este del bloque en azimuth NS, es la más importante ya que confirma la existencia de un hemigraben de alrededor de 650 km², que formaría parte de la cuenca de Carapacha (Kostadinoff *et al.* 2005). La presencia de sectores de mínimos orientales y meridionales, identificados en SPI, que a la fecha no reconocen la existencia de un sistema petrolero activo o eficiente, alto riesgo asociado, hacen promisoría la respuesta. Los colores cálidos y fríos representan elevaciones y depresiones relativas de basamento magnético (arriba a la derecha) y anomalías RTP positivas y negativas, respectivamente. Una lección aprendida es la propuesta de registración sísmica adicional al sur del bloque, para validar la conexión entre cuenca Neuquina y la cuenca de Carapacha.

de Estancia Vieja de la Cuenca Neuquina, y líneas de control cada 10 km. Un levantamiento aeromagnético-gravimétrico permitió iluminar áreas promisorias para una nueva registración sísmica. Para tal fin, en una primera etapa se validó la interpretación del basamento magnético a la sísmica local, y luego se extendió al bloque completo. En una segunda etapa, se identificaron los lugares más promisorios, y se propuso una campaña sísmica regional 2D. Finalmente, las observaciones nuevas revelan la existencia de depocentros sedimentarios consistentes a la solución SPI magnética (Figura 18). Se pueden advertir tres secciones sísmicas de la nueva adquisición, que honran las respuestas de estimación de profundidad, acompañando el criterio de Kostadinoff *et al.* (2005), se trate de depocentros del Grupo Precuyo o de la cuenca de Carapacha, al oeste y al este, respectivamente.

El resultado concreto sintetiza y fija un concepto fundamental: despejar dudas al intérprete sísmico de la ambigüedad referida a la conversión a profundidad del método magnético en escenarios análogos.

Modelado directo e inversión 3D gravimétrica y magnética

El primer ejemplo, Figura 19, pertenece a una zona de yacimientos del borde sur de la cuenca Neuquina y representa el modelado inicial iterativo con control simultáneo a la interpretación de una sección sísmica 2D. Es posible así, verificar la correspondencia entre altos y bajos de basamento sísmico y anomalías positivas y negativas, respectivamente, de magnetismo y gravimetría.

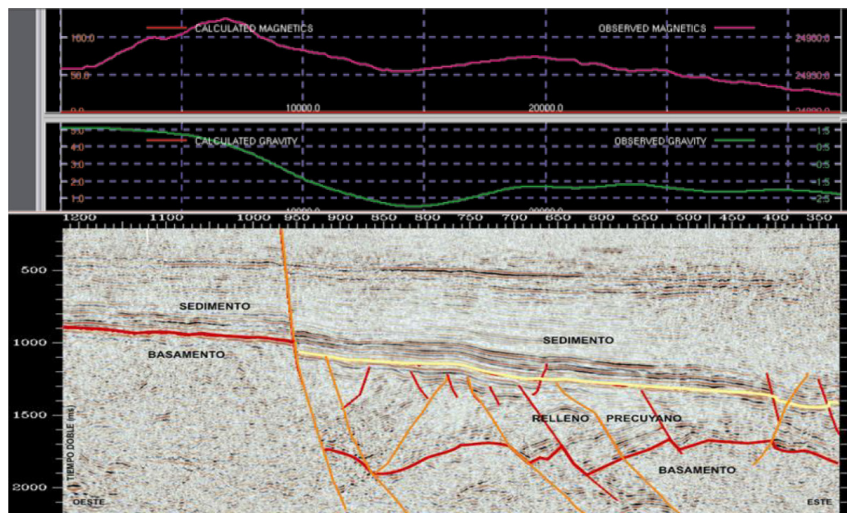


Figura 19. Modelado magnético y gravimétrico inicial de una sección sísmica. Las elevaciones y depresiones del basamento sísmico están asociadas a anomalías positivas: TMI (violetas) y Bouguer (verde).

La amplitud gravimétrica, del orden de -46 mGal, para un modelo de placa 2,24 g/cm³ y 2,79 g/cm³ de densidad sedimento-basamento, predice un relieve estructural de 2.200 m, equivalentes a 870 ms en la sección sísmica.

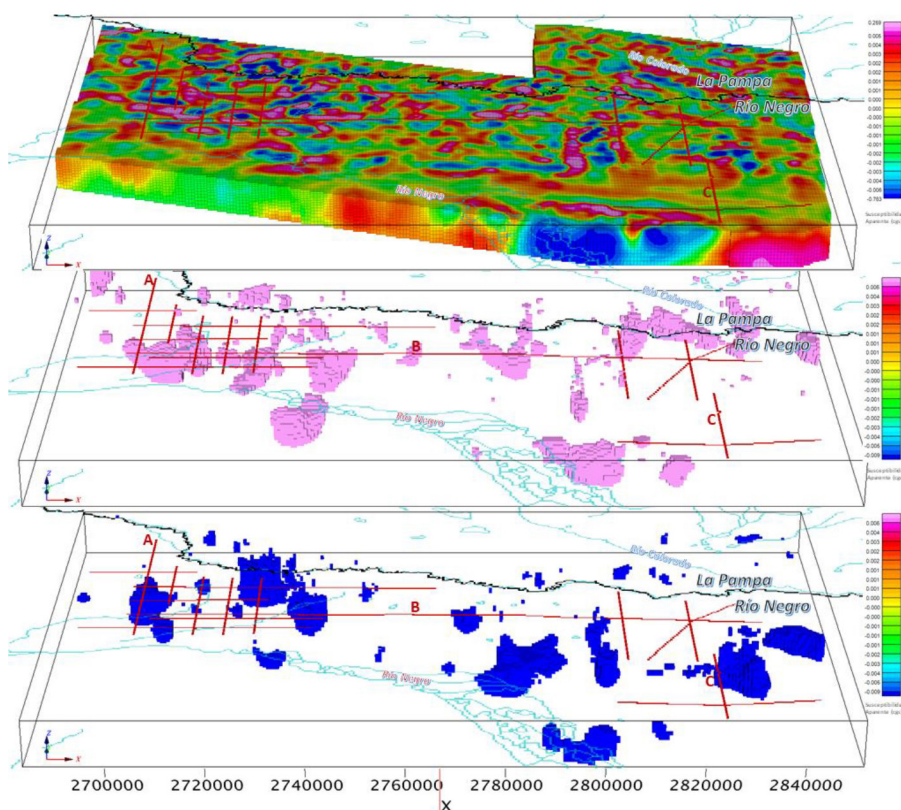


Figura 20. Inversión 3D de Chelforó, a partir de datos magnéticos registrados en 2017, en una superficie de 10.000 km², con líneas de vuelo cada 2 km y de control cada 10 km, O-E y N-S, respectivamente.

Los voxels de susceptibilidad (nT) magnética aparente, que oscilan entre +0,01 a +0,26 (centro) y -0,44 a -0,01, (abajo), son indicio de zonas relativamente elevadas y deprimidas del basamento.

La información sísmica 2D de última generación, con las secciones A, B y C de la Figura 18 en rojo.

En el segundo caso, se muestra el modelado directo e inversión de la anomalía magnética TMI sobre 10.000 km² en Chelforó (Figura 20) siguiendo el criterio de Li y Oldenburg (2003) para trabajos a gran escala. La captura de geocuerpos de susceptibilidades magnéticas positivas (color violeta, centro de la imagen) y negativas (color azul, imagen inferior) proviene de un modelo de celdas de 500 m de resolución vertical, 684 m en dirección de X y 692 m en dirección de Y. Las profundidades fueron controladas en una ventana entre +337 m y - 9800 m. La inversión no está controlada por datos de pozos. La nueva registración sísmica 2D (líneas sólidas rojizas) ha confirmado la predicción de profundidad magnética (Sigismondi 2019, inédito) y gravimétrica (Longo 2019, inédito). El volumen de susceptibilidad fue exportado a una estación de trabajo de interpretación sísmica para validar respuestas.

Por último, la Figura 21 muestra un ejemplo de inversión libre de datos terrestres de gravedad de la Cuenca Neuquina, el cual se ha exportado a programas de interpretación para ajustar los modelos de baja frecuencia del proceso de inversión de trazas sísmicas.

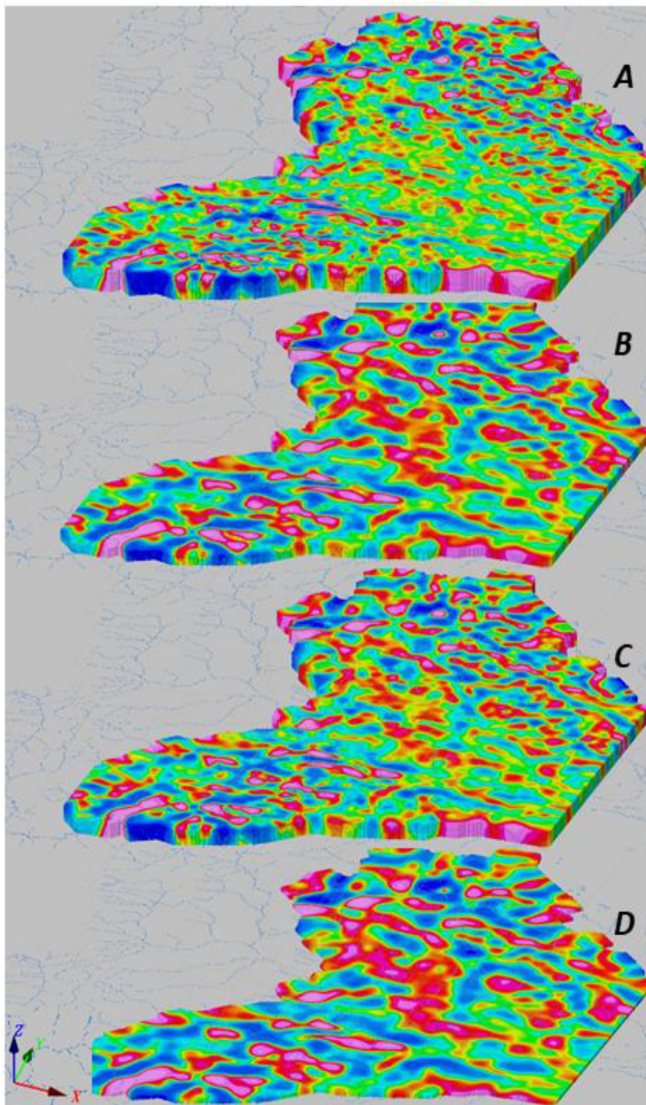


Figura 21. Inversión libre 3D completa (topografía incluida), cuenca Neuquina. Se han estimado las variaciones laterales de densidad a partir de la grilla de anomalías de gravedad terrestre, siguiendo la metodología propuesta por Li y Oldenburg (2003) para trabajos a gran escala.

Las restricciones estructurales permiten establecer límites en el rango de densidades y filtrar las longitudes de onda espaciales en los resultados a partir de una sola superficie, la anomalía de Bouguer. Se ilustran en cuatro capas, A, B, C y D, ubicadas respectivamente en -2500 m, -4500 m, -6500 m y -8500 m debajo del plano de referencia (nivel del mar) las heterogeneidades laterales de densidad.

Los colores cálidos, tonos de rojo, anaranjado y amarillo, representan contrastes positivos, y los colores fríos (celeste y azul), contrastes negativos, en un rango variable de densidad entre $-0,297 \text{ gr/cm}^3$ y $+0,222 \text{ gr/cm}^3$.

Obsérvese si bien la recuperación de la densidad a partir de datos sísmicos es de mejor resolución, es difícil lograr que abarque una superficie aproximada de 96.000 km^2 como en este caso, lo cual requeriría de uniones sucesivas de sísmica de 3D.

La inversión de gravedad necesita restricciones adicionales. La existencia de megamerges sísmicos hace posible subdividir el volumen para aplicar a modelos semiregionales que permitan construir un modelo de bajas frecuencias según sea el objetivo de una inversión sísmica.

CONCLUSIONES

He intentado alentar al intérprete geofísico a acercarse a la comprensión y utilidad de los métodos potenciales, siendo consciente de que en la industria petrolera es de vanguardia el empleo del método sísmico 3D.

Para todo intérprete sísmico, se considera un beneficio incorporar una formación en magnetometría y gravimetría, conocer sus bondades y limitaciones, en un determinado marco de referencia geológico y, en función de los objetivos de cada estudio, que contribuya en la evaluación de proyectos y toma de decisiones, se trate de la etapa de Exploración o de Desarrollo de hidrocarburos.

Concluyo con una propuesta orientada a estudios interdisciplinarios, que seguramente el lector comprenderá, no se agotan en la cuenca Neuquina. Sectores aledaños a ejidos urbanos: Central Co-Plaza Huincul, Plottier-Neuquén-Centenario-Cipolletti, Allen-Estación Fernández Oro, o de embalses: Mari Menuco-Los Barreales y Jagüel-Casa de Piedra, presentan complejidades para diseño y registración sísmica 3D, en particular aquellos orientados al desarrollo de yacimientos.

Por lo tanto, se entiende que campañas aeromagnéticas-gravimétricas, permitirían iluminar el basamento y contribuir a la comprensión de la deformación de la columna sedimentaria superpuesta, calibrando anomalías con información de pozos y sísmica, que como se ilustró en los ejemplos presentados, permiten identificar los sectores relativamente más elevados y deprimidos.

AGRADECIMIENTOS

A los colegas y autoridades de CONEXPLO 2022 e YPF S.A. por revisar y autorizar esta contribución.

REFERENCIAS CITADAS

- Baranov, V. y Naudy, H., 1957. Numerical calculation of the formula for reduction to the magnetic pole. *Geophysics* 22, 359-383.
- Blakely, R. J., 1995. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, 441 p., Cambridge (Reino Unido).
- Blakely, R.J. y Simpson, R.W. 1986. Approximating Edges of Source Bodies from Magnetic or Gravity Anomalies. *Geophysics*, 51, 1494-1498.
- Bracaccini, I.O., 1964. Ordenación y resumen de los antecedentes geológicas relativos a la zona cordillerana de las provincias de Mendoza y Neuquén, República Argentina, Dirección General de Fabricaciones Militares, Contrato 1103, inf. No 1, 295 págs., Bs. As.
- Bracaccini, I.O., 1964. Geología estructural de la zona cordillerana de Mendoza y Neuquén, República Argentina, Dir. Gral. De Fabricaciones Militares, Contrato 1103, inf. No 4, 220 págs., Bs. As.
- Brown, Alistair R., 2005. Pitfalls in 3-D Seismic Interpretation. RMAG/DGS 11th annual 3-D Seismic Symposium March 11, 2005, in Denver, Colorado. AAPG Explorer, marzo, 2005.
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J.M., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. Controles precuyanos en la estructura de cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65(2), 248 - 264.
- Dobrin, M., y Savit, C. ,1988. *An introduction to geophysical prospecting*, 4th ed.: McGraw-Hill Book Company.
- Grant, F.S. y West, G.F. 1965. *Interpretation theory in applied geophysics*. McGraw-Hill Book Company, 583p.
- Ferré, E., Kuppenko, I., Martín-Hernández, F., Ravat, D., & Sánchez-Valle, C. (2020). Magnetic Sources in the Earth's Mantle, *Nature Reviews Earth and Environment*, DOI: 10.1038/s43017-020-00107-x.

- Grauch, V.J.S. y Cordell, L., 1987. Limitations of Determining Density or Magnetic Boundaries from the Horizontal Gradient of Gravity or Pseudo-gravity Data. *Geophysics*, 52, 118-121.
- Johnson, E.A.E., 1998. Use higher resolution gravity and magnetic data as your resource evaluation progresses. *The Leading Edge*, 17: 99-99. <https://doi.org/10.1190/1.1437846>. Society Exploration Geophysics, Tulsa, Oklahoma.
- Kostadinoff, J., Gregori, D.A. y Raniolo, A. 2005. Configuración geofísica-geológica del sector norte de la provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 60, 2 (abr. 2005), 368-376.
- Li, Y.G. y Oldenburg, D.W., 2003. Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method, *Geophys. J. Int.*, 152(2), 251-265.
- Lidiak, E.G., Hinze, W.J., Keller, G.R., Reed, J.E., Braile, L.W. y Johnson, R.W., 1985. Geologic significance of regional gravity and magnetic anomalies in the east-central Midcontinent. En Hinze, W.J. (ed.) *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*, Society Exploration Geophysics, Tulsa, Oklahoma.
- Longo, L.M., y Sigismondi, M.E., 2019. Informe de interpretación gravimétrica y magnética del bloque de Chelforó. YPF. Inédito.
- Maus, S.U., Barckhausen, H., Berkenbosch, N., Bournas, J., Brozena, V., Childers, F., Dostaler, J. D., Fairhead, C., Finn, R. B., von Frese, C., Gaina, S., Golynsky, R., Kucks, H., Lühr, P., Milligan, S., Mogren, R. D., Müller, O., Olesen, M., Pilkington, R., Saltus, B., Schreckenberger, E., Thébaud, F., Caratori Tontini, 2009. EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* Volume 10, Issue 8. American Geophysical Union.
- Mosquera, A. y Ramos, V.A., 2006. Intraplate deformation in the Neuquén Basin. En Kay, S.M. y Ramos, V.A. (eds.) *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S latitude)*. Geological Society of America, Special Paper 407: 97-124.
- Naudy, H., 1971, Automatic determination of depth on aeromagnetic profile: *Geophysics*, 36, 717-722. Nettleton, L.L., 1971. *Elementary gravity and magnetics for Geologist and Seismologist*, Society of Exploration Geophysicists, Monograph Series No. 1, 1815-1818 p. Tulsa, Oklahoma, USA.
- Parker, R.L., 1973. The Rapid Calculation of Potential Anomalies. *Geophysical Journal International*. 31: 447- 455. DOI: 10.1111/J.1365-246X.1973.Tb06513.X
- Ramos, V.A., Naipauer, M., Leanza, H.A., y Sigismondi, M.E., 2020. An Exceptional Tectonic Setting along the Andean Continental Margin. *American Association of Petroleum Geologists. Memoir 120: The Vaca Muerta Fm.* ISSN: 0271-8529.
- Raniolo, L.A., 2007. Informe de los perfiles gravimétricos y de susceptibilidad magnética realizados en las provincias de Neuquén y Mendoza. Inédito. Petrobras Energía S.A. 116 p.
- Ravat, D., Morgan, P., y Lowry, A.R., 2016. Geotherms from the temperature-depth constrained solutions of 1-D steady-state heat-flow equation: *Geosphere*, 12(4): 11871197, doi:10.1130/GES01235.1.
- Reid, A. B., 1980. Aeromagnetic survey design. Short Note. *Geophysics*, Vol. 45. NO. 5, May 1980; P 973- 976.

- Reid, A., Allsop, J.M., Grnaser, H., Millett, A.J., y Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91.
- Roberts, A., 2001. Curvature Attributes and Their Application to 3D Interpreted Horizons. *First Break*, 19, 85-99.
- Salem, A. y Ravat, D.A., 2003. Combined analytic signal and Euler method for automatic interpretation of magnetic data. *Geophysics*, 68, 1952-1961.
- Sheriff, R., 2002, *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics*, cuarta edición Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Reference Series No. 13.
- Sigismondi, M. E. y Soldo, J.C., 2003. Curvature attributes and seismic interpretation: Case studies from Argentina basins. *The Leading Edge*, 22, 1122-1126.
- Sigismondi, M. E., 2013. "Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura termal, datos de gravedad y sísmica de reflexión". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Silvestro, J. y Zubiri, M., 2008. Convergencia oblicua: Modelo estructural alternativo para la Dorsal Neuquina (39° S) Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(1), 49-64.
- Spector, A. y F. Grant, 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics* 35, 293-302. Telford, W., L. Geldart, y R. Sheriff, 1990, *Applied geophysics*, 2nd ed.: Cambridge University Press.
- Thompson, D. T., 1982, EULDPH - A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data: *Geophysics*, 47, 31-37.
- Thurston, J.B. y Smith, R.S., 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method, *Geophysics*, 62(3), 807-813.
- Tucker, P.M. y Yorston, H.J., 1973. *Pitfalls in Seismic Interpretation*. Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Monograph Series, volume 2.
- Yilmaz, O., 2001. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*: SEG. Investigations in Geophysics.