

Correspondence:

## Modelo geológico-estructural de la base del cretácico generado por inversión 3D de datos aerogravimétricos Cuenca Ucayali, Perú

### Geological-structural model of the cretaceous base generated by 3D gravimetric inversion of aerogravimetric data - Ucayali Basin, Peru

**Carlos Daniel Flores Martínez**

Ingeniero Geólogo, consultor independiente, carlos.flores.m@uni.pe, <https://orcid.org/0000-0001-9303-8734>

#### Resumen

La investigación fue elaborada empleando datos gravimétricos y geológicos propiedad de la empresa Pacific Stratus Energy S.A., sucursal del Perú y forma parte de las actividades exploratorias que la empresa realiza en la parte noreste de la Cuenca Ucayali. Con este objetivo se contrató a la empresa Carson Aerogravity (2009) para la adquisición y procesamiento de datos geofísicos, los cuales en una primera interpretación arrojó resultados poco satisfactorios por lo que se decidió volver a interpretarlos. La metodología empleada el modelo matemático propuesto por Rao y Babu (1991) para el cálculo de anomalías gravimétricas. El procesamiento de los datos de campo fue realizado netamente por Carson Aerogravity (2009) en su centro de cómputo con sede en Perkasi, Pennsylvania, EE. UU. Datos aerogravimétricos de calidad, combinados adecuadamente con información geológica, y la utilización de algoritmos matemáticos 3D, permitieron generar un Mapa Estructural de la Base del Cretácico que muestra una muy buena correlación con la sísmica 2D existente en el área de estudio. Se concluye que utilizando información aerogravimétrica, se pudo lograr una adecuada exploración de un área de estudio, como base para la planificación de la subsiguiente adquisición sísmica 2D y/o 3D.

**Palabra Clave:** Geología estructural, geofísica, gravimetría, sísmica

### **Abstract**

The research was prepared using gravimetric and geological data owned by the company Pacific Stratus Energy S.A., a Peruvian branch, and is part of the exploratory activities carried out by the company in the northeast part of the Ucayali Basin. For this purpose, the company Carson Aerogravity was contracted to acquire and process geophysical data, which in a first interpretation yielded unsatisfactory results, so it was decided to interpret them again. The methodology used the mathematical model proposed by Rao and Babu (1990) for the calculation of gravimetric anomalies. The processing of the field data was carried out entirely by Carson Aerogravity (2009) in its computer center based in Perkasi, Pennsylvania, USA. Quality aerogravimetric data, properly combined with geological information, and the use of 3D mathematical algorithms, allowed to generate a Structural Map of the Cretaceous Base that shows a very good correlation with the existing 2D seismic in the study area. It is concluded that using aerogravimetric information, an adequate exploration of a study area can be achieved as a basis for planning the subsequent 2D and / or 3D seismic acquisition.

**Keywords:** Structural geology, geophysical, gravimetry, seismic

### **Introducción**

Los métodos geofísicos indirectos (no invasivos) en áreas con escasa información geológica o inaccesibles, se tornan casi indispensables en las primeras etapas de la exploración por hidrocarburos. A fines del 2008, la empresa Pacific Stratus Energy junto con la empresa Carson Aerogravity realiza un estudio en la parte noreste de la cuenca Ucayali. Éste trabajo consistió en adquirir datos aerogravimétricos, procesarlos e integrarlos con información geológica para obtener un modelo geológico-estructural que permita un mejor entendimiento de esta parte de la cuenca. En la primera parte del estudio, que incluye la adquisición y procesamiento de los datos, el trabajo fue netamente de Carson Aerogravity (2009). En la selección de los datos geológicos, la integración con el modelo matemático y la inversión el trabajo se realizó con la asesoría directa de Mario Profeta de Carson (2007). En la interpretación de los resultados los asesores internos fueron E. Ramírez y N. Chigne.

Los datos geofísicos se registraron desde un avión equipado con un gravímetro, un magnetómetro y un equipo de navegación GPS (León, Alemán, Chumpitaz, Fabián y Sipion, 2020). En una etapa inicial, la primera metodología que se utilizó, no tuvo los resultados deseados por lo que se decidió revisar la información y las interpretaciones a fin de proponer una nueva metodología que contribuya a mejorar los resultados.

La historia tectónica y sedimentaria que se describe a continuación proviene principalmente de De La Cruz et. al. (1997), Lipa et. al. (1997) Valenzuela y Zavala (1998) y de la interpretación geológica de los datos disponibles tanto de superficie, de pozos y de sísmica. Es así que la metodología empleada en este trabajo a partir de los datos gravimétricos procesados, es innovadora dado que en el proceso integra de manera diferente tanto los datos geofísicos como geológicos, para obtener el modelo geológico-estructural resultante (Milsom, 2003; Pérez-Segura, et.al, 2019).

El estudio se encuentra ubicado en la parte central del Perú, al noreste de la Cuenca Ucayali, al norte del departamento del mismo nombre, próxima a la frontera con Brasil y cubre un área aproximada de 15,000 km<sup>2</sup>. Cerca de 4 meses fue el tiempo que se empleó en volar la malla

de 10 x 10 Km y de 2.5 x 10 Km en el área de mayor interés. En total suman 5,200 km lineales aproximadamente y cubren un área de 15,000 km<sup>2</sup>.

La velocidad y altura de vuelo promedio fueron de 185 km/hr y 1,285 m.s.n.m. respectivamente. Cabe mencionar que la resolución de la herramienta es inversamente proporcional a la velocidad de registro de los datos, es decir, mientras más lento sea el registro, mayor será la resolución del gravímetro (Wooldridge, 2010).

El avión empleado fue un DeHavilland Twin Otter, bimotor modelo N920R equipado con un sistema de prospección gravimétrica y magnetométrica que fue desarrollado por Franklin D. Carson y William R. Gumert (1984). Además, la nave cuenta con un sistema de navegación GPS que emplea los satélites NAVSTAR y estaciones en tierra que se usaron como puntos de control geodésico para corregir las lecturas de posicionamiento.

El Gravímetro que se usó fue de marca LaCoste & Romberg (modelo S-82) el cual va montado sobre un estabilizador y cuyas lecturas fueron grabadas tanto en papel como en medios magnéticos.

En el contexto regional, la cuenca Ucayali se puede catalogar dentro de las denominadas Cuenclas Subandinas. Estas corresponden al sistema Antepaís o *foreland*, que en Sudamérica se ubican al Este de la cordillera de los Andes cuyo eje longitudinal es paralelo al eje de la cordillera. Localmente, la zona estudiada se ubica dentro de este sistema, aproximadamente entre el límite del *foredeep* y el *foreboulge* (Hermosta et. al., 2006). La Cuencla Ucayali colinda hacia el Este con la Cuencla de Acre en Brasil, por el Norte con el Alto de Contaya que lo separa de la Cuencla Marañón; hacia el Oeste, el límite lo define la cordillera oriental y hacia el Sur el Arco de Fitzcarral separa esta cuenca de la de Madre de Dios.

La Cuencla Ucayali es una unidad morfo-estructural asimétrica que se acuña hacia el Este en dirección al Escudo Brasileiro (Cratón Brasileiro). Se le puede definir como Pericratónica-Foreland ubicada en la región central del oriente peruano cubriendo un área aproximada de 120,000 Km<sup>2</sup>. A partir de información sísmica, datos de pozos y reconstrucción geológica con datos de superficie tomados en secciones erosionadas, se ha estimado en la parte más profunda de la cuenca una acumulación aproximada de 11,000 pies de sedimentos continentales de edad Terciaria.

Estos a su vez, sobreyacen a otros 10,000 pies de sedimentos de origen marino y continental de edades que van desde el Paleozóico hasta el Cretácico (Lipa et. al., 1997). Hacia el Oeste de la cuenca se observa el cinturón de fajas plegadas que resultan del levantamiento del pie de monte de la Cordillera Oriental debido a la compresión andina.

Estos esfuerzos producen pliegues y cabalgamientos (*overthrust*), que colocan secuencias antiguas sobre capas más jóvenes a través de superficies de despegue que suelen estar conformadas por materiales de naturaleza plástica, tales como lutitas hidratadas o capas de sal. Esta complejidad estructural se simplifica gradualmente hacia el Este, en dirección al cratón, donde los esfuerzos compresivos se disipan formando fallas inversas de relevo, que en algunos casos producen la inversión de antiguas fallas normales asociadas a grábenes pre-existentes (Hermosta et. al., 2006). Las edades de estos movimientos tectónicos compresionales van desde la orogenia Nevadiana (180 a 135 Ma) pasando por la orogenia Andina temprana (120 Ma) hasta el último movimiento en el terciario tardío denominado Quechua 3, que es responsable

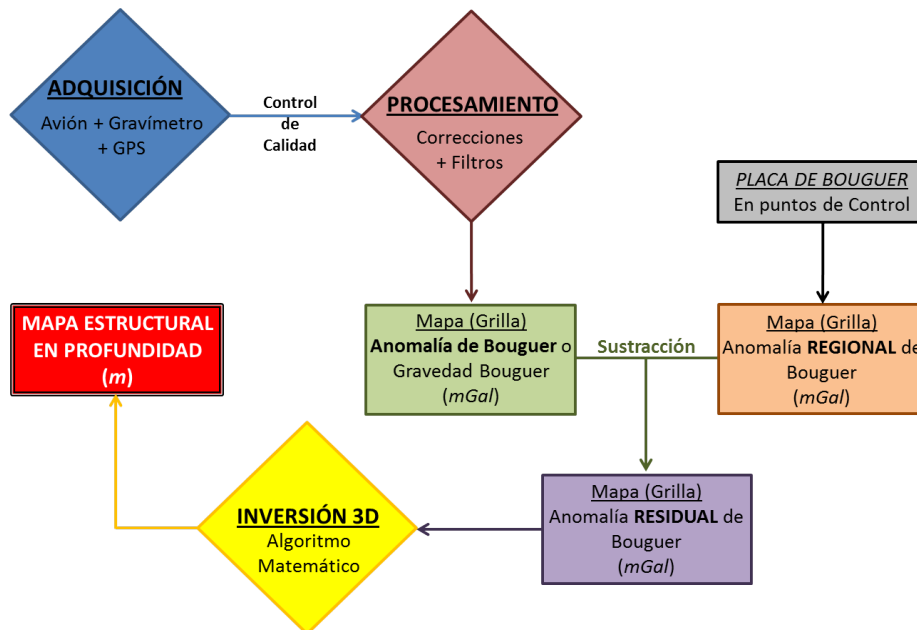
del levantamiento de las denominadas montañas del Shira, Sierra de Moa y Sierra del Divisor, y otros (Velarde et. al., 1978).

### Materiales y métodos

La metodología empleada se fundamenta en el modelo matemático propuesto por Rao y Babu (1990) para el cálculo de anomalías gravimétricas. En base a éste método y mediante un algoritmo de programación, se diseñó un programa el cual realiza iteraciones sucesivas de los datos gravimétricos de entrada en Miligals (Malla de Anomalía Residual de Bouguer) hasta que éstos converjan a un error mínimo, respetando al mismo tiempo los valores de profundidad en los puntos de control (Tierra y Kirby, 2007). El resultado arroja una malla en metros que será el modelo geológico-estructural. A este proceso se le denomina Inversión Gravimétrica 3D.

El siguiente esquema resume el proceso que se siguió desde la adquisición hasta el producto final:

Figura 1. Flujograma de la metodología empleada.



El procesamiento de los datos de campo fue realizado netamente por Carson Aerogravity en su centro de cómputo con sede en Perkasié, Pennsylvania, EE.UU.

En este proceso, los datos del sistema de navegación fueron corregidos por aceleración y/o cambios de velocidad tanto de la aeronave como del gravímetro. Además, los datos fueron

corroborados en los cruces de líneas dentro de la malla de adquisición para confirmar la fidelidad de las mediciones y de ser el caso, corregir cualquier discrepancia observada.

Por otro lado, se realizó un perfil de los siguientes parámetros: topografía, tensión del muelle del gravímetro en Miligals, corrección Eötvös, elevación GPS, aceleraciones verticales obtenidas de los datos GPS y tres gráficos de gravedad al aire libre con varios niveles de filtrado. La comparación de estos gráficos revela la confiabilidad de los datos.

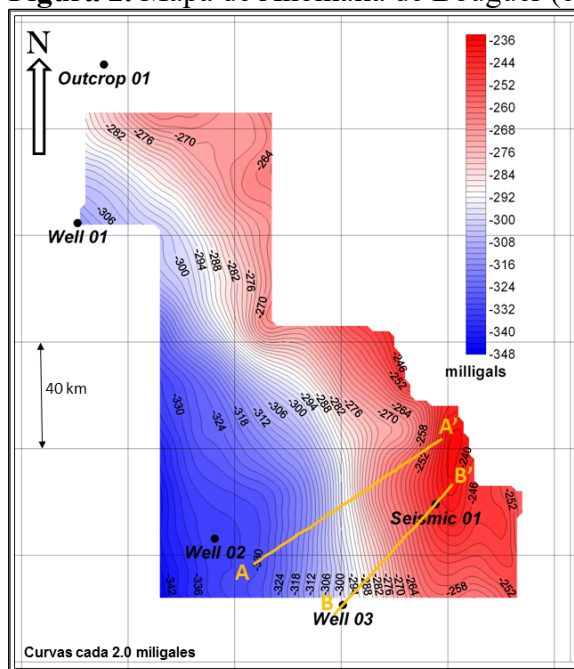
Del documento Carson Aerogravity (2009), Data Acquisition & Processing Report, resumimos las siguientes correcciones realizadas como parte del procesamiento hecho a los datos registrados.

## Resultados

Este mapa es el resultado del procesamiento de los datos aerogravimétricos, tal como se ha explicado en el Capítulo III. Por otro lado, la corrección de Bouguer se realizó empleando una densidad promedio de 2.0 gr/cc, según los registros de densidad de los pozos. Asimismo, la corrección por topografía se hizo considerando variaciones en tres direcciones (3D).

En el proceso de obtención de esta malla ningún dato geológico fue incorporado, por lo que puede decirse que es un mapa 100% geofísico. En él se puede notar, por ejemplo, que los materiales de mayor densidad se encuentran hacia el Noreste del área, lo que coincide con la tendencia regional del basamento en esta parte de la cuenca, próxima el Foreboulge. Esta misma tendencia se observa en las líneas sísmicas de rumbo SW-NE o W-E.

**Figura 2.** Mapa de Anomalía de Bouguer (en mGal).

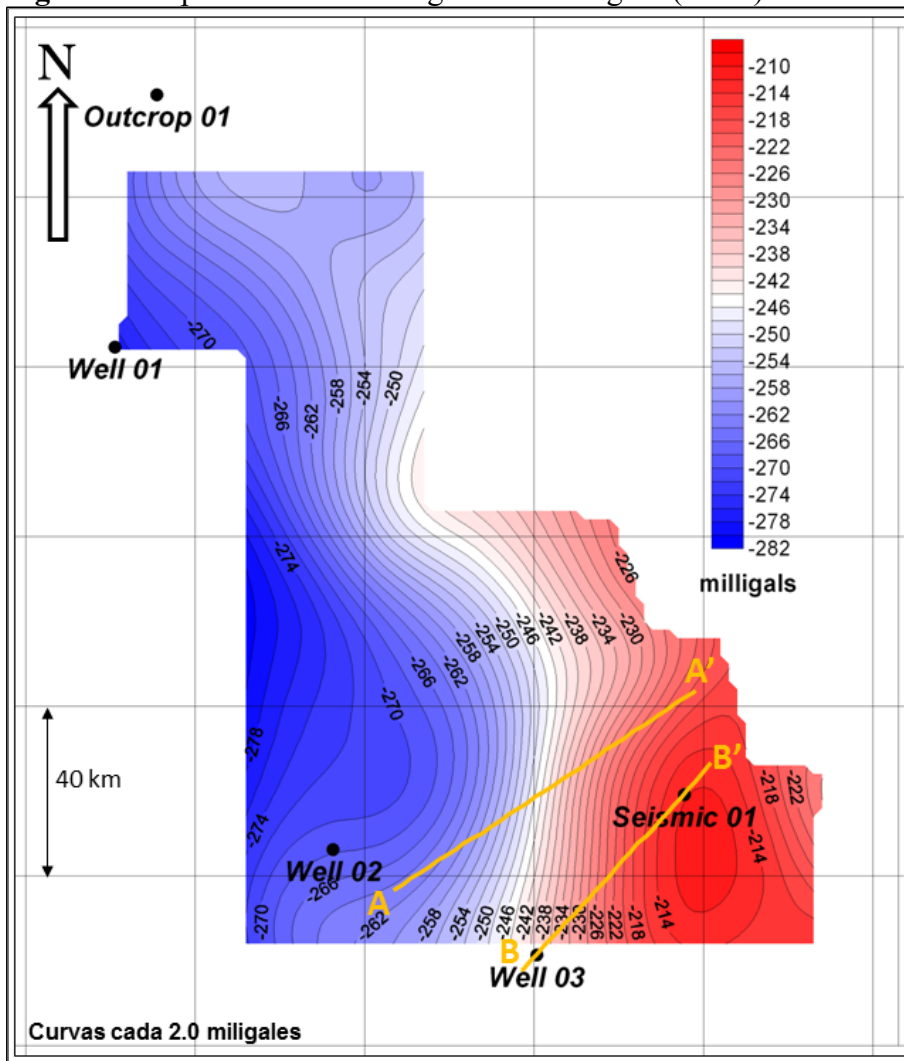


### Mapa de Anomalía Regional de Bouguer

Este mapa se construyó mediante el cálculo de la capa infinita de Bouguer en cada punto de control obteniéndose en cada uno de ellos la Anomalía Residual. Luego, se restaron estos valores de Anomalía de Bouguer y se obtuvieron cinco valores puntuales de Anomalía Regional. Estos valores fueron mapeados tanto por interpolación como por extrapolación considerando la tendencia regional de la Anomalía de Bouguer.

En la Figura 3 se puede observar que la variación de densidades por debajo del horizonte objetivo (Anomalía Regional de Bouguer) mantiene la tendencia del mapa anterior, pero con una marcada diferencia hacia el Sureste del área, lo cual podría atribuirse al engrosamiento de la secuencia Paleozóica hacia el Este y Noreste del área.

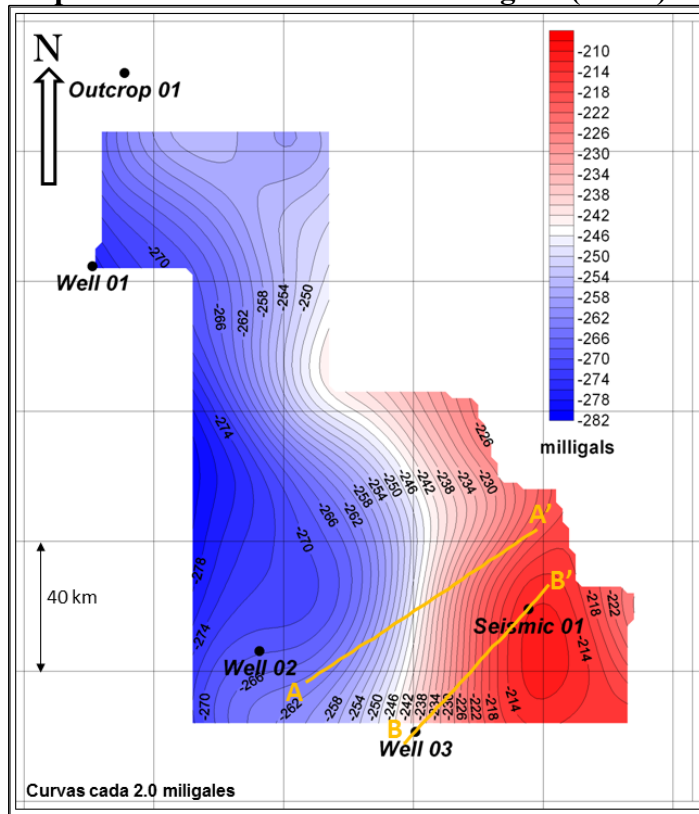
**Figura 3.** Mapa de Anomalía Regional de Bouguer (mGal).



### Mapa de Anomalía Residual de Bouguer

Mediante una simple sustracción de mallas (Anomalía de Bouguer menos Anomalía Regional) se obtuvo el mapa de la Anomalía Residual de Bouguer que finalmente fue empleado en la inversión. En él ya se puede observar los efectos de cambios de densidad muy locales que pueden corresponder a eventos geológicos estructurales, tales como grábenes o anticlinales. Sin embargo, no se descarta que tales variaciones puedan deberse a cambios estratigráficos (Fig. 4).

### Mapa de Anomalía Residual de Bouguer (mGal).



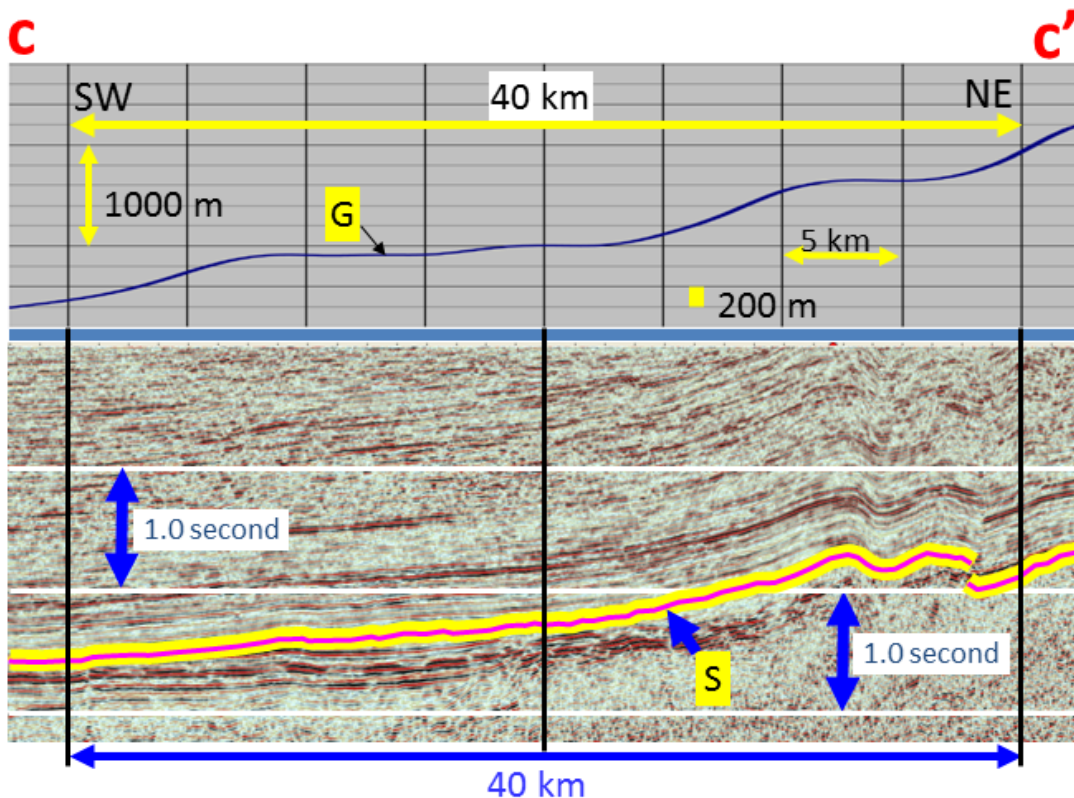
### Mapa Estructural en la Base del Cretácico

Es el mapa final que se obtiene de la Inversión Gravimétrica 3D que honra en su ubicación espacial y en profundidad a los cinco puntos de control geológico empleados. Asimismo, se observan en el mapa diversas deformaciones estructurales muy locales, tales como anticlinales con alineamientos N-S, los cuales coinciden con la dirección de las estructuras que afloran en el área y cuya dirección también coincide con las estructuras identificadas en la interpretación de la sísmica existente (Fig. 5).



estructural obtenida de la inversión, correlaciona muy bien con la sísmica, respetando la tendencia regional del horizonte interpretado en tiempo. Además, en la parte derecha de la Figura 6, se aprecia que el límite resolutorio de la gravimetría no permite discriminar dos pliegues o anticlinales que están muy cerca uno del otro y que el gravímetro los lee como una pequeña meseta estructural (Oliveira, et. al, 2019).

**Figura 6.** Comparación de Sección Estructural en metros (arriba) y Sección Sísmica en milisegundos (abajo).



Como se observa en la figura 6, el modelo aerogravimétrico tiene la predictibilidad suficiente para reproducir la tendencia regional observada en la sísmica 2D. Si bien la resolución horizontal es menor, la metodología no reemplaza a una imagen sísmica, pero es de gran aporte en la definición de *plays* o *leads* sobre todo en regiones frontera con poca información como es el caso del lote 138.

Empleando información aerogravimétrica, se pudo lograr una adecuada exploración de un área de estudio, como base para la planificación de la subsiguiente adquisición sísmica 2D y/o 3D. Así mismo, Santacruz, et. al. (2017), en su investigación señala que los datos de aerogravimetría dieron mejor resultado, logrando una adecuada exploración.

Como se mencionó anteriormente, la resolución lateral de la gravimetría es inversamente proporcional a la velocidad con la que se realiza el registro por lo que debería observarse una

mejora en la resolución lateral en gravimetría terrestre. Entendiéndose como gravimetría terrestre al empleo de vehículos motorizados para el traslado del equipo de adquisición o mediante una cuadrilla con personal que porte el gravímetro y realice el registro sobre un mallado y por estaciones.

## Conclusiones

Datos aerogravimétricos de calidad, combinados adecuadamente con información geológica, y la utilización de algoritmos matemáticos 3D, permitieron generar un Mapa Estructural de la Base del Cretácico que muestra una muy buena correlación con la sísmica 2D existente en el área de estudio.

Se concluye que utilizando información aerogravimétrica, se puede lograr una adecuada exploración de un área de estudio, como base para la planificación de la subsiguiente adquisición sísmica 2D y/o 3D.

La interacción geofísico-geólogo se hace imprescindible para la integración de los datos, así como para la interpretación de los resultados obtenidos.

Al realizar el ejercicio de comparar secciones extraídas del modelo geológico-estructural con líneas sísmicas existentes en el área, se observa que las mayores discrepancias – morfológicamente hablando- se producen en los grábenes Pre-Cretácicos o depresiones por debajo del horizonte objetivo. Esto puede atribuirse a una pérdida del “control” geológico en estas zonas producto de una variación natural en el contraste de densidad que se había “fijado” con los registros de densidad de los pozos.

De lo anteriormente dicho, resulta inherente realizar un nuevo análisis comparativo del modelo con la nueva sísmica que se adquiera en el área, con el objetivo de precisar el alcance de esta nueva metodología.

## Referencias

- Barros Bastidas, C., & Turpo Gebera, O. (2018). Factors influencing the scientific production of university professors: a systematic review. *Factores Que Influyen En La Producción Científica de Los Docentes Universitarios: Una Revisión Sistemática.*, 11(22), 225–234. <http://10.0.85.43/pensam.v11i21-1.276%0Ahttps://ezproxy.uniandes.edu.co:8443/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=141223533&lang=es&site=ehost-live>
- Carson Aerogravity (2009). Data Acquisition & Processing Report, pp. 12-24, 36-45, EEUU.
- Criollo, A. R. T. y Kirby, E. (2007). Anomalías de gravedad de Bouguer completo del Ecuador continental. Comité Editorial, Revista Geoespacial, 1, n4. Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador.

- De La Cruz, N., Zedano, J. y Zapata, A. (1997), Geología de los Cuadrángulos de San Roque, Río Callería, San Lucas, Pucallpa, Nuevo Utiquina, Cantagallo y Divisor Yurúa Ucayali. *INGEMMET*, Boletín N°102, pp. 47-63, Lima, Perú.  
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/60>
- Hermoza, W., Baby, P., Espurt, N., Martínez, E. y Bolaños, R. (2006), The Ucayali Subandean Basin: A Complex Fold and Thrust Belt and Inverted System, IX Simposio Bolivariano, Petroleum Exploration in the Subandean Basins. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.111.08>
- León, W., Alemán, A., Chumpitaz, M., Fabián, C. y Sipion, C. (2020). Sub-Andean Project: Geological maps to promote investment opportunities in remote areas of the Peruvian Subandean. *AAPG. Virtual Research Symposium Latin America & Caribbean Region*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2827>
- Lipa, V. R., Larico, W. y Cuyubamba, V. M. (1997) Geología de los Cuadrángulos de Puerto Oriente, Ana María y Río Tapiche. *INGEMMET*, Boletín N°101, pp. 35-72, Lima, Perú.  
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/59>
- Milsom, J. (2003) Field Geophysics. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, 244 p.
- Oliveira, R., Rodrigues, S., Gonçalves, J., Pereira, G. y Miguel, M. (2019). Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(2), 271-282. <https://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019177437>
- Pérez-Segura, E., Romero-Valle, J.M., Orozco-Rivera, G., Rosales-Suárez, D. y Martínez-Peñuñuri, R. (2019). Ensayo geometalúrgico para la recuperación de oro de la zona de sulfuros primarios de la mina La Herradura, Sonora, México. *Bol. Soc. Geol. Mex vol. 71 no. 1*, <https://doi.org/10.18268/bsgm2019v71n1a8>
- Profeta, M. (2007). Carson Aerogravity, Curso de Gravimetría para Exploración Petrolera y Minera (Inédito), pp. 14-38, EEUU.
- Rao, D. B. y Babu, N.R. (1991), A Fortran-77 Computer Program for Three-Dimensional Analysis of Gravity Anomalies with variable Density Contrast, *Bol. Computers & Geosciences*, Vol. 17, No 5, pp. 655-667. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90037-E](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90037-E)
- Santacruz, A., Nicacio, E. L., De Freitas, S. y Carrión, J. (2017). Comparación de diferentes fuentes de datos gravimétricos para conexión de redes verticales. Universidad Federal de Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.  
[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/28\\_Santacruz\\_et\\_al\\_2017\\_Comparacion\\_datos\\_gravedad\\_conexion\\_vertical.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/28_Santacruz_et_al_2017_Comparacion_datos_gravedad_conexion_vertical.pdf)
- Valenzuela, G. y Zavala, B. (1998) Geología de los Cuadrángulos de Puerto Putaya, Río Shahuinto, Jacaya, Santa Rosa, Río Breu, Parantari, Breu y Río Piquiyacu.. *INGEMMET*, Boletín N°109, Lima, Perú.  
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/68>
- Velarde, P., Bustamante, C. y Reátegui, O. (1978) Evaluación Geológica Preliminar de las Sub Cuencas de Ucayali y Madre de Dios. PETROPERÚ, Lima (Informe interno), pp. 35-68, Lima, Perú.
- Wooldridge, A. (2010) EM/Potential Methods, pp. 85-92, (in [www.firstbreak.org](http://www.firstbreak.org).)

Article

---