

DETECCION DE SALTOS DE BASAMENTO DE LA CUENCA DEL VALLE DE LA RIOJA, ARGENTINA, A PARTIR DE UN MODELO HIDROSTATICO LOCAL.

*Martínez M. Patricia¹, Mario Gimenez¹, Gabriela Bustos², F. Lince Klinge³,
Martín Mallea² y T. Jordan⁴*

¹CONICET. IGSV-FCEFN - UNSJ. mpm@unsj-cuim.edu.ar

²Facultad de Cs. Exactas Físicas y Naturales. UNSJ

³IGSV-FCEFN - UNSJ- FONCYT

⁴Dpto de Geociencias. CORNELL University.

RESUMEN

Se utilizaron cartas de anomalías de Bouguer, de efectos gravimétricos del paquete sedimentario y de correcciones isostáticas, para preparar una carta de anomalías isostáticas (o de anomalía residual isostática) que comprende la cuenca del Valle de La Rioja y regiones aledañas (Provincia de La Rioja, Argentina).

El tratamiento isotático 3D en el Valle de La Rioja, es considerado en un sistema de compensación isostática del tipo Airy en corteza estirada. Se trazaron perfiles que atraviesan la cuenca en estudio, con el propósito de observar las variaciones del basamento en sentido N-S.

Las anomalías residuales isostáticas resultan negativas en todo el dominio de la cuenca, evidenciando una falta de antirraíz. No obstante a través del análisis de los perfiles es posible definir: a) los bloques estructurales que componen la cuenca, b) la posición relativa entre unos y otros, c) el futuro movimiento de estos bloques o sea ascenso diferencial entre ellos.

Palabras claves: basamento - Valle de La Rioja - Isostasia

ABSTRACT

A Bouguer anomalies' chart, gravimetric effects of the sedimentary package and isostatic corrections, were used to prepare an isostatic anomalies' chart (or residual isostatic anomalies' chart) that covers La Rioja Valley's basin and the surrounding areas (La Rioja province, Argentina).

To carry out our isostatic 3D study in La Rioja Valley, Argentina, a system of isostatic compensation in Airy's hypothesis with stretched bark was considered. Profiles across the studied basin were traced to observe the variations of the basement in N-S strike. Our results point out that isostatic anomalies are negative in the domain of the basin, with an evident deficit of antirroot. Nevertheless, through the analysis of the profiles we can define: a) structural blocks composing the basement of the basin, b) their relative positions, and c) the future movements of these blocks (or differential ascent between them).

Keywords: basement - La Rioja Valley - Isostasy

INTRODUCCION

La hipótesis isostática de Airy, consiste esencialmente en suponer que cada trozo de corteza está en equilibrio hidrostático. Cuanto

más profunda es la cuenca sedimentaria, mayor es la antirraíz ascendida desde el nivel normal de corteza (T_n). Todo pasa como si cada prisma vertical de distinto tamaño que compone a la corteza terrestre, flotara en un

material viscoso que le permitiera realizar lentos movimientos verticales en busca del equilibrio hidrostático.

Ha sido demostrado que si nos mantenemos dentro del sistema elegido, cualquier modelo asumido como compensado puede ser utilizado para estudiar el equilibrio isostático (Woollard, 1969). Así, modelos de una o de dos capas, con distintos espesores normales T_n (no demasiado diferentes unos de los otros) y con densidades diferentes pueden ser adecuadamente utilizados.

En este trabajo seguimos la metodología propuesta por Introcaso (1993), respecto del análisis isostático en cuencas sedimentarias.

Por otro lado, considerando que nos encontramos en una región deformada por compresión y cercanos a la Cordillera Andina, el modelo Hidrostático contempla una combinación de raíces (debido a los excesos topográficos) y antirraíces (ubicadas bajo la cuenca sedimentaria estudiada). Este tipo de análisis ha sido ya propuesto por Giménez *et al.* (2000, 2001) para el estudio isostático de la Cuenca del Bermejo, ubicada entre la Precordillera Sanjuanina y la Sierra Pampeana de Valle Fértil (San Juan, Argentina).

En un trabajo preliminar (Bustos *et al.*, 2005), se ha preparado un Modelo Hidrostático en el sentido teórico puro de esta cuenca, aislándola de su entorno natural geológico, o sea sin considerar el Sistema Andino ni las Sierras vecinas. Sin embargo, como veremos en este trabajo, las conclusiones respecto del moviimiento vertical no cambian.

En la Figura 1, se observa la ubicación de la cuenca del Valle de la Rioja, y se localizan los perfiles que luego son analizados.

Mediciones gravimétricas

Se relevaron nuevos datos de gravedad, estos fueron sumados a la carta gravimétrica de la provincia de La Rioja (Martínez y Gimenez, 2003) y a la base de datos

perteneciente al Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, de la Universidad Nacional de San Juan y al Instituto de Física de Rosario, de la Universidad Nacional de Rosario -CONICET.

El cálculo de anomalías respondió a las clásicas expresiones:

$$AAL = Gobs. (\delta_0 \text{ CAL}) \quad (1)$$

$$AB = Gobs. (\delta_0 \text{ CAL} + CB + CT) \quad (2)$$

Donde AAL y AB son las anomalías de Aire Libre y de Bouguer completa; Gobs: gravedad observada referida al valor de la estación fundamental de Miguelete (Buenos Aires); δ_0 : Gravedad Normal para cada estación; CAL, CB y CT: Correcciones de Aire Libre, Bouguer y Topográfica.

Para calcular la CAL se adoptó la expresión de Swick (1942):

$$CAL = (0.308555 + 0.00022 \times \cos 2 \varphi) \times H - 0.072 \times (H/1000)'' \quad (3)$$

donde

H: representa la altitud (en metros) y φ : es la latitud de la estación gravimétrica.

El valor de CB fue calculado asumiendo una densidad para la topografía de 2.67 g/cm^3 , ecuación (4).

$$CB = 0,1118 \times H \quad (4)$$

siendo

H: altura sobre el nivel medio del mar expresado en metros.

Las anomalías fueron referidas a la estación fundamental de Miguelete usando el sistema IGNS 1967. δ_0 , fue referida a la expresión del elipsoide del 67, ecuación (5):

$$\delta_0 ('67) = 978031.85(1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) \quad (5)$$

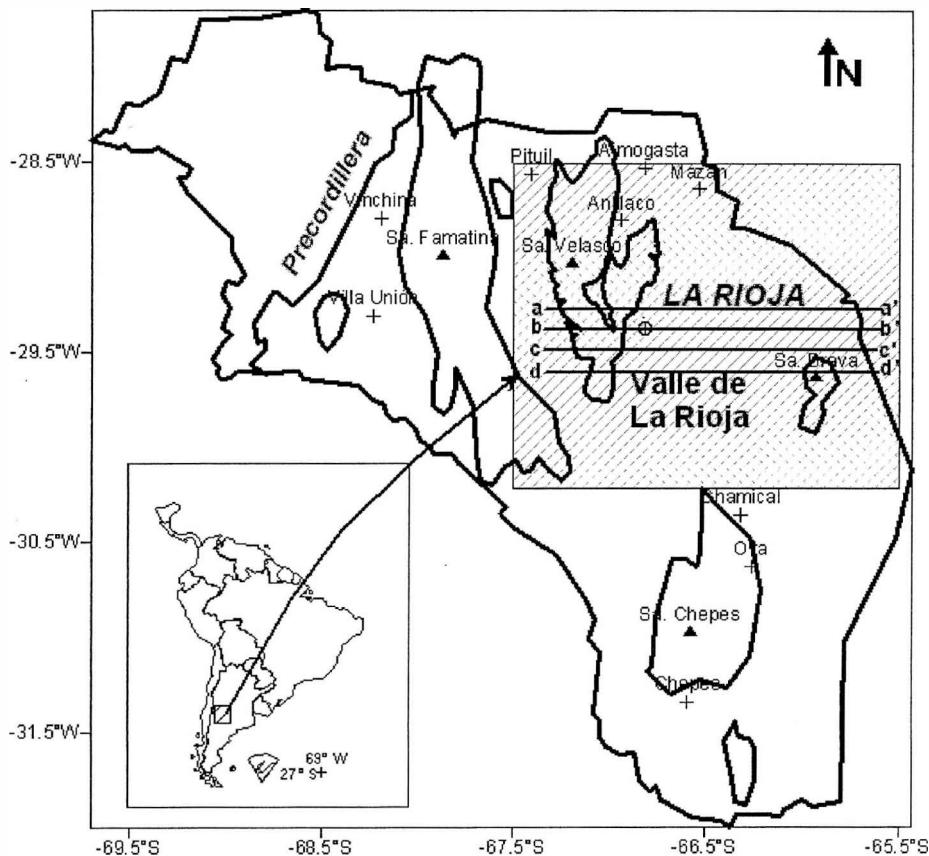


Figura 1. Ubicacion geografica de la zona de estudio. a-a', b-b', c-c', d-d': perfiles de los estudios en el texto de las latitudes 29° 18'S, 29° 24'S, 29° 30'S y 29° 36' respectivamente

En la carta de altitudes (Fig. 2) vemos un gran mínimo de 400 metros en correspondencia con la cuenca, mientras que en la carta de AB (Fig. 3), vemos ese mínimo concentrado en dos isolíneas cerradas de -160 mGal. Ubicando estas los mayores espesores sedimentarios.

ANÁLISIS ISOSTÁTICO

Siguiendo a Introcaso (1993), la carta de AB debe ser corregida por el efecto gravimétrico de los sedimentos (ES). Así:

$$ABC = AB - ES \quad (6)$$

Se dispuso de una carta inédita (perteneciente a YPF SA) de isóbatas de

basamento cristalino, determinada mediante sismica de reflexión. Asimilando las isóbatas a láminas poligonales cerradas. Mediante un número impar de ellas, para posibilitar la integración numérica (Talwani and Ewing, 1960; Guspí *et al.*, 1987), se evaluó el efecto gravimétrico del paquete sedimentario (ES), ver Figura 4. La carta de anomalías de Bouguer corregidas por efecto sedimentario (ABC) se observa en la Figura 5, que (en teoría) responde únicamente a efectos profundos.

Como punto de partida admitiremos un modelo cortical de dos capas, sometido a estiramiento uniforme. Este modelo considera que el estiramiento uniforme no altera (no deforma) la discontinuidad intermedia. A

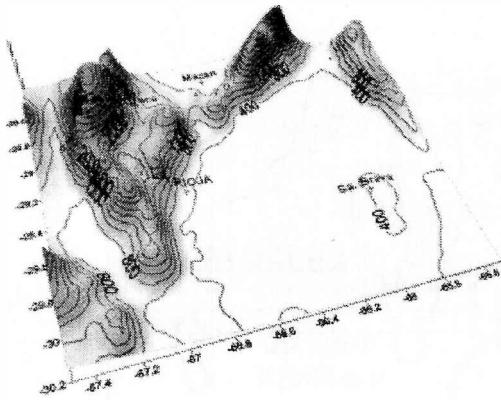


Figura 2. Diagrama 3D del área de estudio. Extraita de la base de datos EOTOPOS, del Servicio Meteorológico de USA.

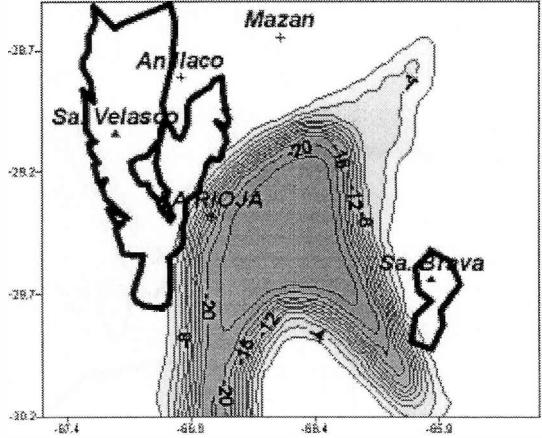


Figura 4. Efecto gravimétrico de los sedimentos (ES). Densidad de los sedimentos 2.3 g/cm³. Isoanómalas cada 2 mGal.

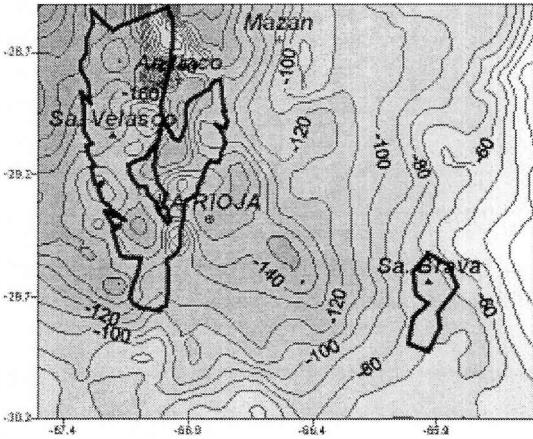


Figura 3. Carta de anomalías de Bouguer (AB). Isoanómalas cada 10 mGal.

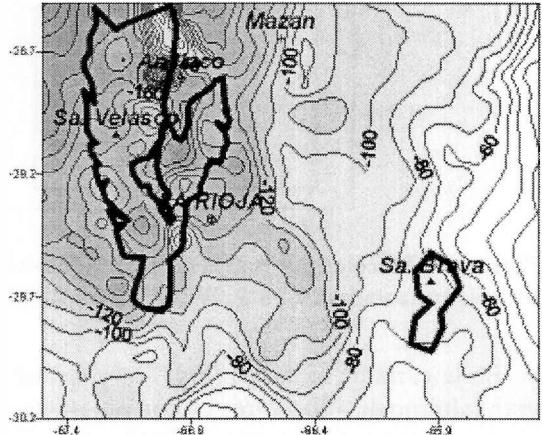


Figura 5. Carta de anomalías de Bouguer corregida por el efecto gravimétrico de los sedimentos (ABC). Isoanómalas cada 10 mGal.

partir de plantear las ecuaciones de equilibrio hidrostático, llegamos a:

$$\Delta r = \frac{\sigma_{cs} - \sigma_s}{\sigma_m - \sigma_{ci}} \times h_s \quad (7)$$

siendo

Δr : espesor de la antirraíz; σ_{cs} : densidad de la corteza superior; σ_s : densidad de los

sedimentos; σ_m : densidad del manto superior y σ_{ci} : densidad de la corteza inferior

Determinación de Densidades

A través del análisis de perfiles sísmicos de refracción realizados por Yacimientos Petrolíferos Fiscales (ahora YPF SA), se determinó la velocidad promedio para las ondas de compresión. Luego y mediante la relación propuesta de Nafe y Drake (1958) se

obtiene la densidad de los sedimentos, resultando $\sigma_s = 2.3 \text{ g/cm}^3$.

Asumimos un valor de 2.70 g/cm^3 para la corteza superior (basamento de la cuenca), extrapolando valores obtenidos a partir de estudios sismológicos por Regnier et al. (1994), para la Sierra de Pie de Palo y la Precordillera sanjuanina. Resultando el contraste de densidad ($\Delta\sigma$) entre los sedimentos y el basamento de: $\Delta\sigma = 0.4 \text{ g/cm}^3$.

La densidad de la corteza inferior (σ_{ci}) se asume de 2.9 g/cm^3 , y la del manto superior (σ_{ms}) de 3.3 g/cm^3 , basándonos en valores medios mundiales consignados por Woollard (1969); Pacino e Introcaso (1988), entre otros.

Modelo hidrostático

Reemplazando en (7), el modelo de predicción de antirraíces resulta:

$$\Delta r = h_s \quad (8)$$

En (8), la antirraíz (Δr) es simplemente el espesor sedimentario (h_s) con tal que las densidades diferenciales: corteza - sedimentos, y manto superior - corteza, sean iguales. Fuera del modelo, en la naturaleza son muy cercanas.

Al modelo de antirraíces obtenido, se lo afectó de los valores de las hipotéticas raíces pertenecientes a las sierras vecinas, incluyendo la cordillera andina. Nuevamente, a partir de plantear ecuaciones de equilibrio hidrostático:

$$\Delta R = \frac{\sigma_t}{(\sigma_{ms} - \sigma_{ci})} \times H \quad (9)$$

donde

ΔR : Raíz por debajo del espesor cortical normal; σ_t : densidad de la masa topográfica (2.67 g/cm^3) utilizada en la corrección de Bouguer; σ_{ms} : densidad del manto superior (3.3 g/cm^3); σ_{ci} : densidad de corteza inferior (2.9 g/cm^3); y H : altura promedio por sobre el nivel medio del mar (Fig. 2).

Reemplazando en (9) las densidades, tenemos que el modelo de raíces resulta:

$$\Delta R = 6.675 \times H \quad (10)$$

Asumiendo 33 km para el espesor de corteza normal (Woollard, 1969; Introcaso *et al.*, 1992; entre otros) se confeccionó la carta del Moho Hidrostático (Fig. 6), que involucra antirraíces bajo la cuenca y raíces de las áreas aledañas, incluyendo la Cordillera Andina. El efecto gravimétrico directo (EGRA) que producen las raíces y antirraíces (Fig. 7), cambiado de signo se corresponde con la corrección Isostática (CI).

Finalmente la anomalía Isostática, llamada a veces Anomalía Residual Isostática (AI), se determina a partir de (11), y su representación gráfica se puede ver en la Figura 8.

$$AI = ABC - CI \quad (11)$$

Analizando la Figura 8, observamos que toda la cuenca del Valle de la Rioja se encuentra descompensada: $AI \neq 0$. Los máximos valores ($< -80 \text{ mGal}$) los

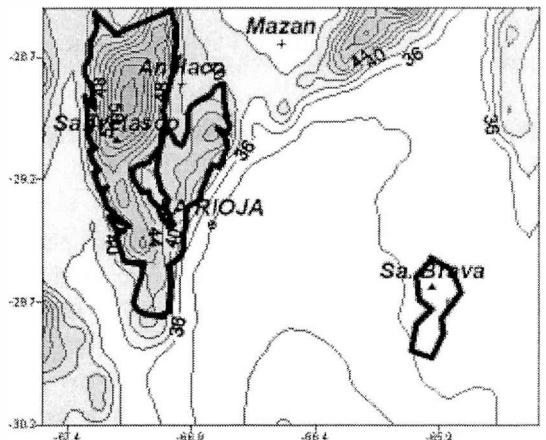


Figura 6. Carta del Moho Hidrostático que contiene antirraíces para la cuenca del valle de la Rioja y raíces para las sierras vecinas. El espesor de corteza normal considerado (T_n) es de 33 km. Isonómalas cada 2 km.

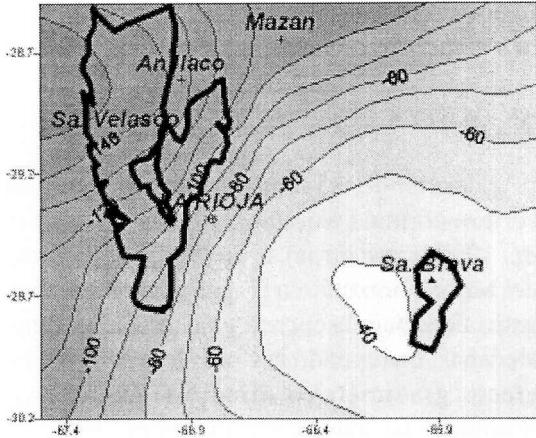


Figura 7. Efecto gravimétrico del Moho Hidrostático. Contraste de densidad corteza inferior - manto superior: $-0,4 \text{ g/cm}^3$. Isonómalas cada 10mGal.

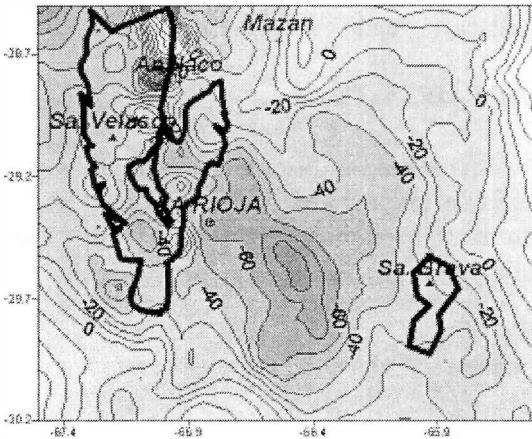


Figura 8. Carta de anomalías Isostáticas (o Residual Isostáticas, AI). Isonómalas cada 10 mGal.

encontramos en el centro del valle. El signo de esta anomalía (-) nos indica que el Moho del Modelo Hidrostático propuesto es menor que el actual. Por consiguiente el comportamiento esperado para los bloques del basamento que componen la cuenca es en sentido ascendente.

Análisis en perfiles

Con el propósito de interpretar con más detalles el comportamiento isostático de esta

cuenca se analizan 4 perfiles, en la Figura 1 señalados como: a-a', b-b', c-c' y d-d'. Ubicados estos consecutivamente a las latitudes: $29^{\circ}18'S$, $29^{\circ}24'S$, $29^{\circ}30'S$ y $29^{\circ}36'S$.

En estos perfiles (Fig. 9 a Fig. 12) se han graficado: arriba, la topografía y abajo, la AB (anomalía de Bouguer), la ABC (anomalía de Bouguer corregida por el efecto sedimentario), el EGRA (efecto gravimétrico del Moho hidrostático), y la AI (anomalía Isostática).

El hecho más significativo, es el hallazgo de un notable salto en la porción de la anomalía bajo la cuenca del Valle de La Rioja (Fig. 9). Separamos estos tramos en dos porciones A y B. Nótese en esta figura la diferencia en magnitud en las anomalías que encontramos entre el bloque A y el B, aproximadamente 20 mGal en AI y 40 mGal en la ABC.

Dado que la corrección de Bouguer elimina las elevaciones topográficas en exceso, luego,

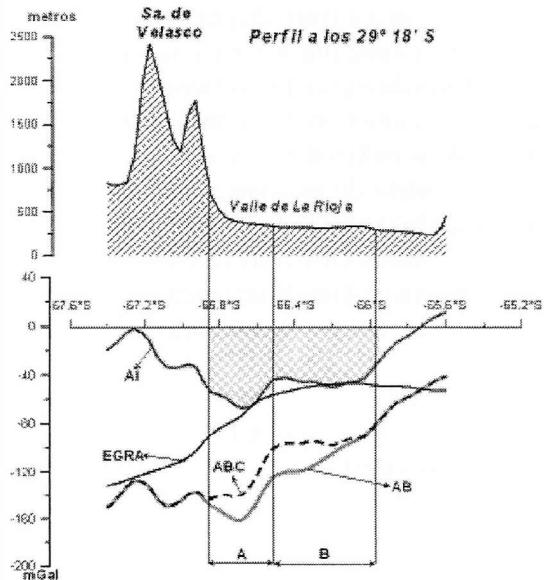


Figura 9. Arriba, perfil topográfico a los $29^{\circ} 18'$ Sur. Abajo: AB, anomalía de Bouguer; ABC: anomalía de Bouguer corregida por el efecto de los sedimentos; EGRA: efecto gravimétrico de los sedimentos; y AI: anomalía residual Isostática. A y B: bloques de basamento inferidos

Detección de saltos de basamento de la cuenca del valle de La Rioja, Argentina ...

se normaliza la corteza a través de la corrección por el efecto sedimentario, la anomalía de Bouguer corregida respondería al efecto de los bloques profundos. Estamos así interpretando cualitativamente las pequeñas longitudes de onda, enmarcadas dentro de la que le corresponde al Valle de La Rioja (A y B en Fig. 9). Este salto estructural se corresponde con los determinados por Fisher *et al.* (2002) a partir de la interpretación de perfiles sísmicos y también concuerda con los hallados por Mamani *et al.* (2002) a través de prospección magnetoteléfica.

Luego seguimos estos tramos A y B en secciones hacia el Sur. En la Figura 10, estos bloques parecen nivelarse en profundidad, mientras que en la Figuras 11 y 12 parecería que hubieran sufrido una mayor compresión y se hundieran formando una pirámide invertida (esquema ilustrativo, Fig. 13).

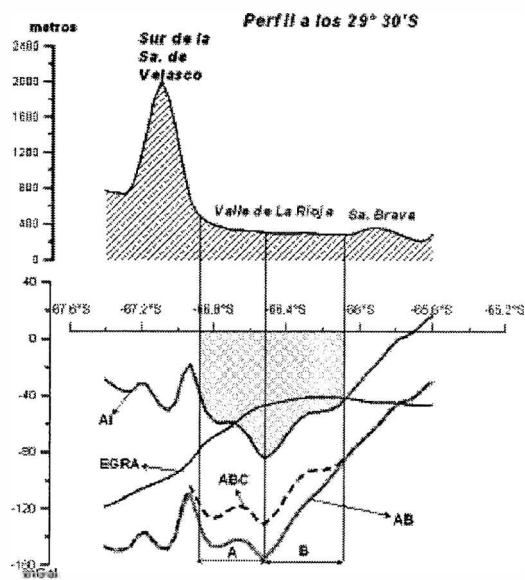


Figura 11. Arriba, perfil topográfico a los 29° 30' Sur. Abajo: AB, anomalía de Bouguer; ABC: anomalía de Bouguer corregida por el efecto de los sedimentos; EGRA: efecto gravimétrico de los sedimentos; y AI: anomalía residual Isostática. A y B: bloques de basamento inferidos.

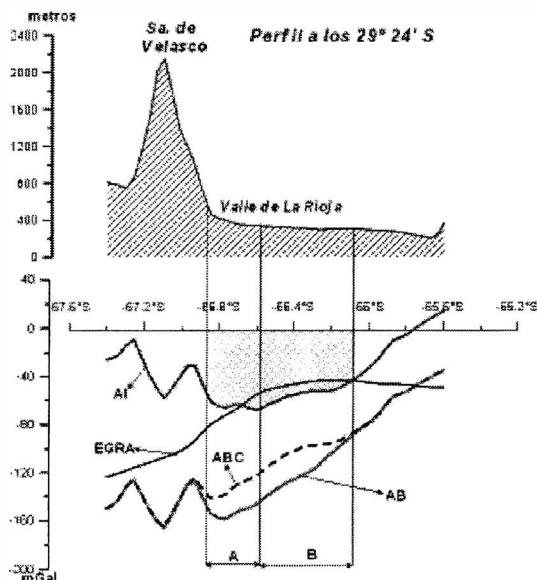


Figura 10. Figura 10: Arriba, perfil topográfico a los 29° 24' Sur. Abajo: AB, anomalía de Bouguer; ABC: anomalía de Bouguer corregida por el efecto de los sedimentos; EGRA: efecto gravimétrico de los sedimentos; y AI: anomalía residual Isostática. A y B: bloques de basamento inferidos.

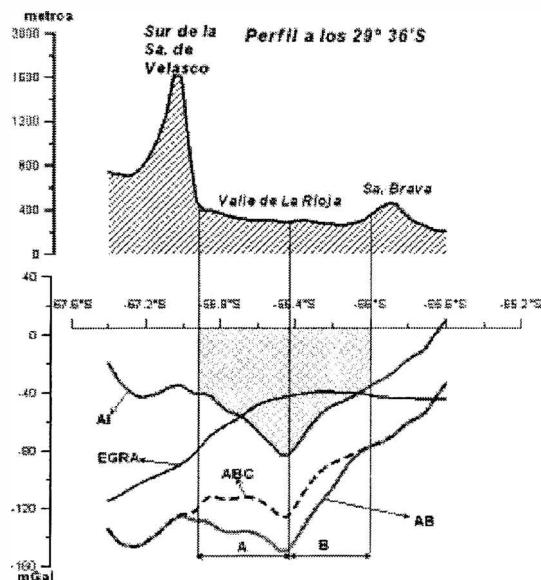


Figura 12. Arriba, perfil topográfico a los 29° 36' Sur. Abajo: AB, anomalía de Bouguer; ABC: anomalía de Bouguer corregida por el efecto de los sedimentos; EGRA: efecto gravimétrico de los sedimentos; y AI: anomalía residual Isostática. A y B: bloques de basamento inferidos.

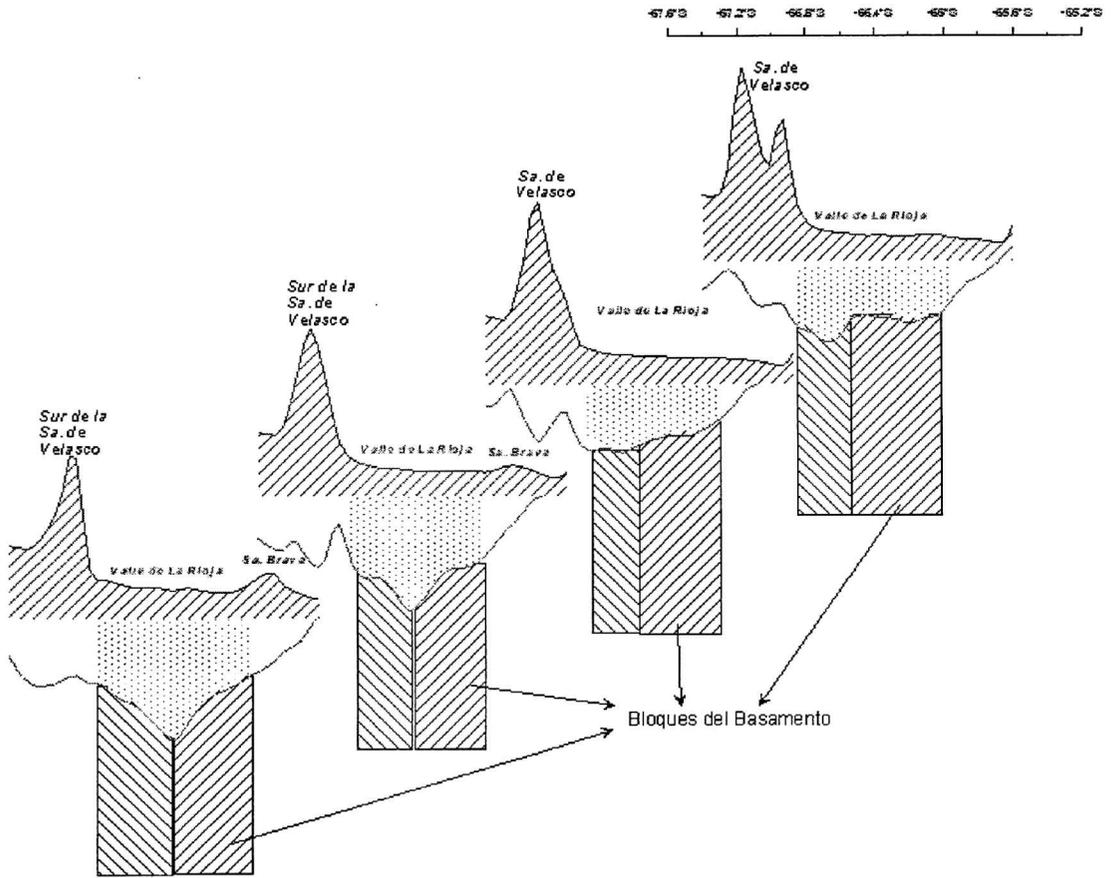


Figura 13. Esquema ilustrativo de las variaciones de profundidad de los bloques del Basamento que contiene a la cuenca del Valle de La Rioja. Secciones (de Norte a Sur). Perfil a los 29° 18' S, Perfil a los 29° 24' S, Perfil a los 29° 30' S y Perfil a los 29° 36' S.

Estos hallazgos indican esfuerzos diferenciales dentro de la cuenca. Hacia el Norte existieron esfuerzos compresivos combinados con esfuerzos verticales. Mientras que hacia el Sur predominan los esfuerzos compresivos Este-Oeste.

Esta interpretación cualitativa de los perfiles es complementaria de la anterior y no invalida el ascenso futuro previsto para los bloques del basamento. No obstante se está trabajando con modelos de inversión gravimétrica, con el doble propósito de encontrar la geofirma gravimétrica de la cubeta sedimentaria, y por otro lado cuantificar estos ascensos diferenciales para cada bloque.

CONCLUSIONES

A partir de la carta topográfica del Valle de la Rioja y regiones aledañas (provincia de La Rioja- Argentina) y de la carta de isóbatas de basamento de la región se confeccionó un modelo de Moho Hidrostático. Se comparó la carta de anomalías de Bouguer corregida por efecto de los sedimentos con la que produce este Moho hidrostáticamente compensado, para determinar la Anomalia Residual Isostática.

Determinamos descompensación Isostática en todo el dominio de la cuenca del Valle de La Rioja. Para mantener equilibrio isostático

es necesario que: $AI = 0$. En este caso encontramos $AI < 0$, indicando que para alcanzar el equilibrio hidrostático, la cuenca en el futuro sufrirá movimientos ascendentes. Estos movimientos serán diferenciales, debido a la compleja estructura de bloques bajo la cuenca. Cuando cesen los esfuerzos compresionales reinantes en la zona, estos bloques buscarán alcanzar el equilibrio isostático mediante una disminución de la raíz compensadora o mediante un ascenso de la masa cortical por encima del nivel medio del mar.

Se encuentran en preparación modelos de inversión gravimétrica, a partir de los cuales se podrían cuantificar los futuros movimientos.

Agradecimientos: Este trabajo a sido posible gracias a los aportes provenientes de los proyectos: PEI ° 6189 CONICET. RESOL. N° 1201/03, PIP N° 02804. CONICET y, PICT REDES 2003 N° 283.FONCYT.

REFERENCIAS

- Bustos, Gabriela; Gimenez, Mario; Martínez P. ; Introcaso, A.; Jordan, T. Evaluación del estado isostático del valle de La Rioja, La Rioja – Argentina. Enviado al Congreso 2005 de la Sociedad Brasileira de Geofísica.
- Fisher, N. D.; Jordan, T.E. y Brown, L. 2002. The structural and stratigraphic evolution of the La Rioja basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 15. pp.141-156.
- Gimenez, M.E., Introcaso, A, Martínez, M.P. 2000. *Estudio Genético y Evolutivo de la Cuenca Del Bermejo. San Juan - Argentina*. UNR Editora. Temas de Geociencia. N°6, 80 pp.
- Gimenez, M.; Martínez, M. P.; Introcaso, A. 2001. Análisis Hidrostático de la Cuenca del Bermejo (Provincia de San Juan- Argentina). RAGA. Vol 56 N° 4, 2001, 419-424.
- Guspi, F.; A. Introcaso y E. Huerta. 1987. Calculation of gravity effects of tridimensional structures by analytical integration of a polyedric approximation and application to the inverse problem. *Geofis. Int.*, 26, 3: 407-428.
- Introcaso, A.; M. C., Pacino and H. and Fraga. 1992. Gravity, isostasy and Andean crustal shortening between latitudes 30° S and 35°S. *Tectonophysics*, 205: 31-48.
- Introcaso, A. 1993. Predicción del Movimiento vertical de una cuenca sedimentaria utilizando el Método gravimétrico. XII Cong. Geol. Argentino y II Cong. de Exploración de Hidrocarburos. Geología y Recursos Naturales de Mendoza. Actas T I : 1-4.
- Mamani, M.; Castiglione, B.; Buk, E. y Degiuseppe, O. 2002. Determinación del espesor sedimentario en la cuenca al este de la Ciudad de La Rioja. XXI Reunión Científica AAGG. pp. 202-207.
- Martínez, M. Patricia y Gimenez, Mario E. 2003. Fuerte Anomalia Gravimétrica Residual Positiva En El Sistema De Famatina Y Su Relación Con Paleosuturas. Explicaciones Alternativas. RAGA. N° 58.
- Nafe and Drake, 1958. In Grant West 1965. "Interpretation Theory of Applied Geophysics". Fig. 7. 200 pp. Mc Graw Hill Book Company.
- Pacino, M. C. y A. Introcaso. 1988. Modelo gravimétrico sobre el sistema de subducción Placa de Nazca Sudamericana en la latitud 33° Sur. V Congreso Geol. Chileno. T2: 77-89.
- Regnier, M.; J. M. Chiu; R. Smalley; B. L. Isacks and M. Araujo. 1994. Crustal Thickness Variation in the Andean Foreland, Argentina, from Converted Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V.84, 4:1097-1111.
- Swick, C.H., 1942. Pendulum Gravity Measurements and Isostatic Reductions. U.S. Coast and Geodetic Survey. Special Publications N°232.
- Talwani, M. and M. Ewing. 1960. Rapid computation of gravitational attraction of three dimensional bodies of arbitrary shape. *Geophysics* XXV, 1: 203-225.
- Woollard, G. P. 1969. Regional variations in gravity. The earth's crust and upper mantle. Ed. Pembroke J. Hart.: 320-341.