

Estudio gravimétrico preliminar sobre una zona afectada por problemas de subsidencia en la proximidad de El Timbó (Tucumán, Argentina)

María Inés Pastorino*
Guillermo Odstrcil*
Albert Casas**

Abstract

Ground subsidence and collapse are major problems associated with subsurface mining, causing damage to the existing surface structures. This problem is of particular concern around salt mines due to the high plasticity and solubility of salty sediments. For this reason, non destructive methods are crucial for the prevention, early detection and control of this kind of processes.

At the El Timbó (Tucumán, Argentina) salt is exploited by a set of wells where freshwater is first injected and then, the salt brine originated by dissolution pumped up to produce halite, mainly for domestic consumption. The mining process has given a result a regional subsidence and some episodes of local collapse. In this paper the interpretation of a detailed gravity survey over a highway crossing the El Timbó salt mine is presented.

Keywords: *subsidence, collapse, salt mining, gravity survey.*

Resumen

Los procesos de subsidencia y colapso del terreno son graves problemas, que a menudo están asociados con la minería subterránea de escasa profundidad, causando

* Laboratorio de Geofísica Aplicada y Ambiental (LAGAMA), Departamento de Geodesia y Topografía, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, República Argentina, correo electrónico: maines@unt.edu.ar

** Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, Barcelona, España, correo electrónico: albert.casas@ub.edu

daños a las estructuras construidas en la superficie. Este problema es de particular interés entorno a las minas de sal debido a la elevada plasticidad y solubilidad de los sedimentos salinos. Por este motivo, los métodos no destructivos son clave para la prevención, detección precoz y control de este tipo de fenómenos.

En la localidad de El Timbó (Tucumán, Argentina) se viene explotando la sal a través de un conjunto de pozos por los cuales primero se inyecta agua dulce y luego se bombea hasta la superficie la salmuera generada por disolución para producir halita, principalmente para consumo doméstico. El proceso de minado ha dado como resultado una subsidencia regional y algunos episodios de colapso local. En este trabajo se presenta la interpretación de un perfil gravimétrico de detalle sobre la carretera regional que cruza parte de la explotación minera de El Timbó.

Palabras clave: *subsidencia, minería de sal, prospección gravimétrica.*

Introducción

Los fenómenos de subsidencia y colapso de la superficie del terreno pueden causar un fuerte impacto ambiental con el correspondiente daño en la estabilidad de las edificaciones y obras viales construidas sobre las zonas afectadas. Estos procesos pueden asociarse con diferentes fenómenos geológicos como son la compactación de sedimentos de elevada porosidad, la deformación tectónica, la extracción de grandes volúmenes de agua subterránea y las explotaciones mineras. Algunos de estos factores son naturales y tienen un largo periodo de evolución, pero la acción antrópica puede acelerar fuertemente el proceso.

El problema es particularmente significativo en las minas de sal debido a la elevada plasticidad de las formaciones salinas y sobre todo a su gran solubilidad. Por este motivo es esencial disponer de métodos que nos permitan la predicción y control del proceso, y de esta forma prevenir sus impactos negativos. Estudios de este tipo sobre minas de sal en diversas partes del mundo han sido realizados por Barla y Jarre (1991), Bell (1992), Marino (1999) y Casas *et al.* (2002).

En la localidad de El Timbó (provincia de Tucumán, Argentina) se vienen explotando desde hace varias décadas las formaciones salinas existentes en su subsuelo para la obtención de sal común elaborada, mediante el procedimiento de inyección de agua por pozos y extracción de las salmueras generadas (Figura 1 y Figura 1b). Esta actividad minera ha causado problemas de subsidencia e inestabilidad del terreno, afectando la ruta provincial 305 de San Miguel de Tucumán a Los Chorrillos (Figura 2). En el presente trabajo se presentan los resultados preliminares del reconocimiento geofísico mediante prospección gravimétrica en dicha zona.

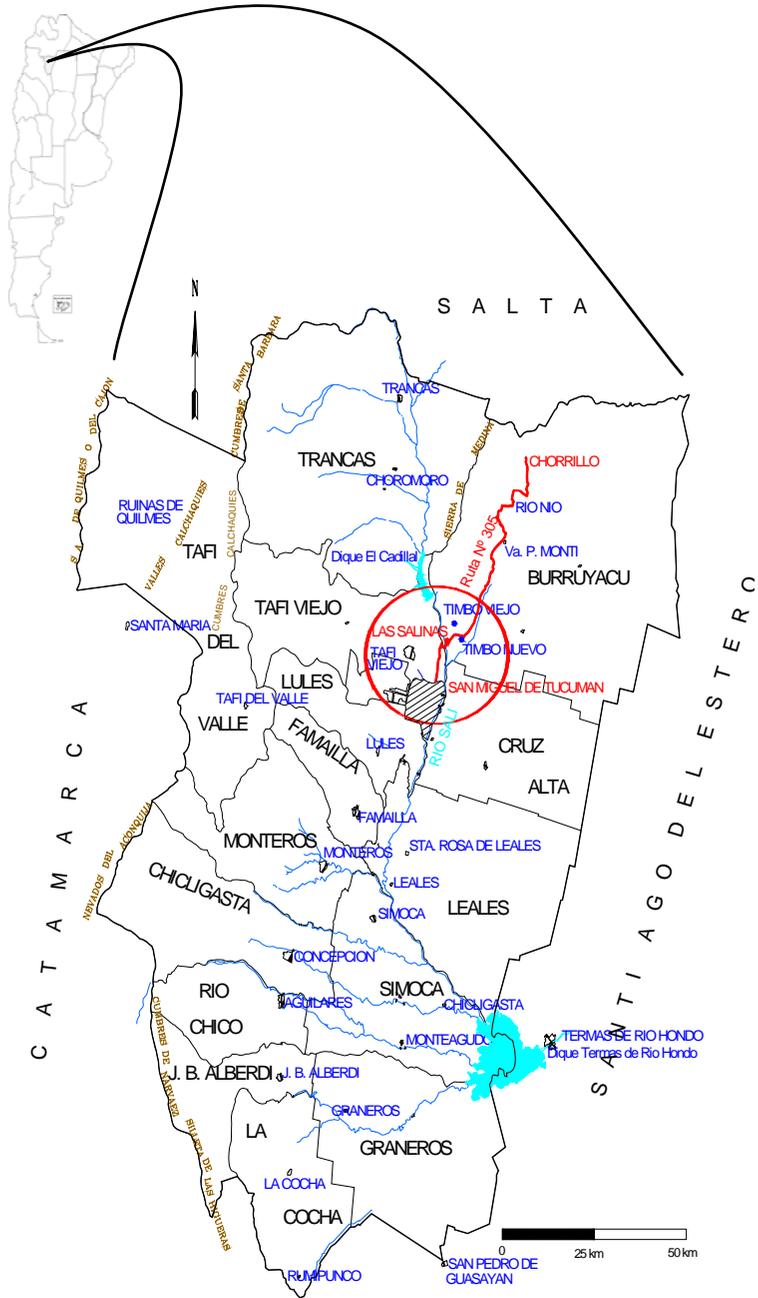


Figura 1a. Situación general del área de estudio.

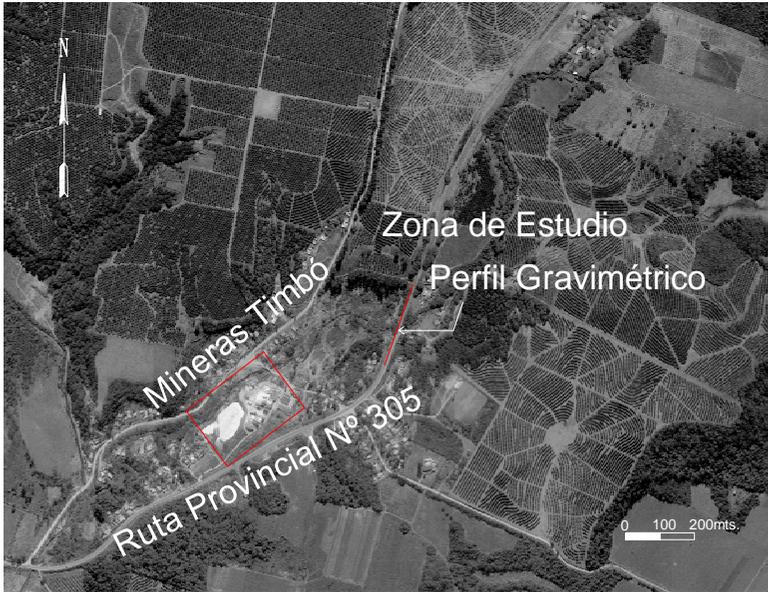


Figura 1b. Foto aérea de la zona El Timbó, donde se detalla el emplazamiento de la explotación minera y la ruta provincial N 305 afectada por los fenómenos de subsidencia y colapso.



Figura 2. Colapso originado en la ruta provincial 305 como consecuencia de la disolución de las formaciones salinas existentes en el subsuelo.

Contexto geológico y actividad minera

El área de estudio corresponde al extremo sur de la unidad morfoestructural de las Sierras Subandinas que se caracteriza por lomas suaves, alternando con valles de fondo plano, las cuales reflejan los rasgos de una estructura profunda. Desde el punto de vista geomorfológico la zona presenta un valle elongado con rumbo general Norte-Sur, donde se genera la Cuenca del Río Calera. Las mayores alturas se ubican en las cabeceras descendiendo suavemente la pendiente general hacia el sur hasta su confluencia con el río Salí. En la zona central se ubica el río Calera y hacia el oeste, formando una pequeña cuenca, el arroyo de Las Salinas o Perdiz, cuyo valle es muy estrecho en contraposición con el anterior.

Los sedimentos que constituyen el subsuelo de esta zona corresponden a la Formación India Muerta del Grupo Tucumán (Bossi, 1969) y está constituida por una alternancia de areniscas grises conglomeráticas que alternan con limonitas pardas y que, según Porto y Danieli (1974), estaría ubicada entre las Formaciones Chulca y Acequiones.

La localidad de El Timbó en el departamento Burreuyacú (Tucumán, Argentina) constituye el centro de explotación de las salmueras. Los pozos de explotación cortan varias unidades acuíferas. La unidad superior, que corresponde a la freática es de agua dulce. Los niveles más profundos almacenan aguas subterráneas con salinidades totales que oscilan entre 195 y 1200 g/L.

Los sondeos mecánicos perforados en la zona (Figura 3) cortan a una profundidad entre 40 y 110 m dos niveles discontinuos de halita interestratificada en arcillas verdes y pardas. El grosor total de ambos niveles de sal es de alrededor de 10 m. En base al estudio de los testigos y datos de perforación se puede observar que el complejo está constituido por una serie de intercalaciones de limo, arena y arcilla, con presencia de capas de sal, ya sea en forma individual, intercalada entre los estratos o formando una mezcla entre ambos. Existe dentro de su mineralogía una gran cantidad de elementos como yeso, calcita, anhidrita, entre otros.

Respecto al origen de las salineras se considera que existe una lixiviación natural *in situ* de los bancos de halita y de la sal contenida en las pelitas, y además hay un aporte de niveles más profundos o distantes. Sin embargo, la explotación minera se realiza por medio de una batería de pozos distribuidos irregularmente. La explotación se realiza mediante una serie de perforaciones a una profundidad promedio de 70 metros, con equipos de bombeo electro-sumergibles. Las salmueras se bombean a la planta donde son tratadas para obtener sal de mesa de excelente calidad. La producción real de los pozos durante un mes de trabajo regular está entre 18 y 19 millones de litros de salmuera. La producción durante el año 1996, después de 10 meses de trabajo, fue de 32,744.00 toneladas, lo que significa una producción mensual de 3,274.40 toneladas, con un promedio diario de 109.15 toneladas de sal fina.

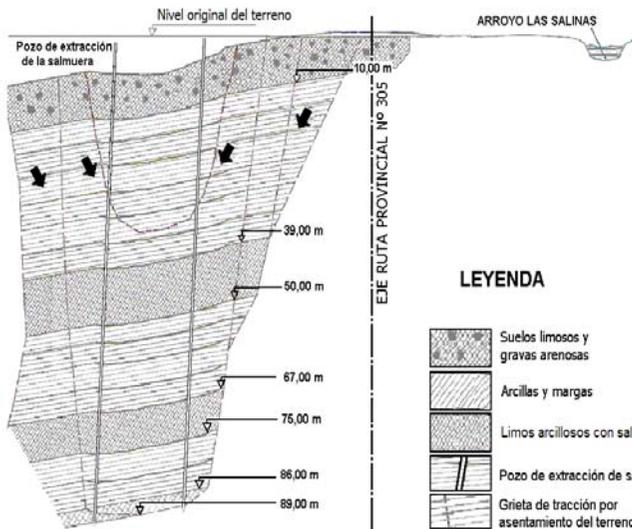


Figura 3. Perfil geológico de la Salinera en el que aprecia la alternancia de niveles de limos con sal y arcillas y margas.

Las reservas probadas en el año 1996 eran de $377,755 \text{ m}^3$, mientras que las supuestas alcanzaban los $3,568,631 \text{ m}^3$.

Material y métodos

Con la finalidad de caracterizar el alcance actual del problema y estimar el riesgo potencial en un próximo futuro se ha llevado a cabo un reconocimiento geofísico preliminar en la ruta provincial 305 que cruza la explotación minera de El Timbó. Dicho estudio ha consistido en una campaña de nivelación topográfica de precisión y en un levantamiento gravimétrico detallado a lo largo de la ruta y su entorno más inmediato. La finalidad de estas mediciones era reconocer el efecto de subsidencia y también la modificación del régimen de masas del subsuelo como consecuencia de la extracción de la sal.

La campaña de nivelación topográfica se efectuó sobre una red de 70 puntos con una estación total Pentax modelo PCS-215, mientras que las medidas gravimétricas se obtuvieron a lo largo de un perfil de 40 puntos con un gravímetro Lacoste & Romberg modelo G.

Teniendo en cuenta que las dos determinaciones son relativas, las medidas se han referenciado asumiendo el mejor compromiso coste/rendimiento, aunque tratando de garantizar una referencia objetiva que permita futuras campañas de control periódico. Así, las coordenadas planimétricas aproximadas de la estación considera-

da como base se han determinado mediante posicionamiento satelital GPS con un instrumento Garmin modelo etrex, mientras que la altura se ha fijado arbitrariamente en 500 metros sobre el nivel de mar, por no disponer de ningún punto próximo perteneciente a la red de nivelación nacional. El valor de la gravedad para la misma base fue referenciado con respecto al sistema BA.CA.RA (Base de Calibración de la República Argentina) a partir de la base existente en el viejo aeropuerto de Tucumán.

Las medidas gravimétricas se procesaron según el procedimiento habitual, de forma que las lecturas fueron corregidas de los efectos de deriva y marea terrestre, y posteriormente calculadas las diferencias de gravedad mediante la aplicación de las constantes de calibración del instrumento. Finalmente, se calculó el valor de la anomalía de Bouguer, como la diferencia entre el valor de la gravedad observado y el teórico de un modelo basado en la gravedad normal sobre el elipsoide según el sistema de referencia del World Geodetic System (WGS'84) y la aplicación de las reducciones de aire libre y de lámina Bouguer, tomando una densidad de reducción de 2.40 g/cm^3 , considerada como densidad media de los sedimentos neógenos aflorantes en la zona de estudio. La corrección topográfica no se ha considerado necesaria debido al bajo relieve morfológico de la zona.

Resultados y discusión

El perfil topográfico a lo largo de la ruta 305 muestra la existencia de un desnivel del terreno de entre 4 y 6 metros en la zona central del perfil, sin coincidir plenamente con el arroyo de Las Salinas o Perdiz (Figura 4). Es difícil precisar, por falta de referencias históricas la subsidencia originada por la disolución de los sedimentos salinos existentes en el subsuelo, pero puede estimarse en torno a los dos metros según los datos facilitados por la Dirección Provincial de Vialidad, que ha debido efectuar obras de relleno periódico. Otras zonas al Oeste de la carretera, más próximas al enjambre de pozos de explotación de las salmueras deben estar con toda probabilidad afectadas por hundimientos de mayor amplitud que los observados sobre la ruta.

Al contrario que el perfil topográfico, las anomalías de gravedad muestran una distribución con irregularidades, que podrían suponer la presencia de ruido en el procesado de los datos. Por este motivo se decidió realizar una repetición del conjunto de las medidas como control de calidad de las mismas. El resultado de este proceso nos permitió corroborar los datos anteriores, ya que el error máximo en la determinación del valor de la anomalía de Bouguer fue de $\pm 0,03 \text{ mGal}$.

Por tanto, corresponde interpretar el significado geológico del perfil en función de las características morfológicas y estructurales de la zona. En este sentido destaca la presencia de un fuerte gradiente a los 100 metros del origen del perfil, que

puede interpretarse como debido a la presencia de una falla siguiendo el trazado del arroyo. Por otro lado, se pone en evidencia el mínimo gravimétrico relativo a la altura del punto situado a 125 m del origen del perfil, coincidiendo con el mínimo relieve topográfico, a parte de otras pequeñas anomalías locales.

Para tratar de interpretar las relaciones entre la subsidencia regional, los colapsos locales y las anomalías gravimétricas, se ha llevado a cabo un tratamiento estadístico simple consistente en correlacionar las variables altura sobre el nivel del mar y anomalía de Bouguer para el conjunto de los datos del perfil. Este proceso ha dado como resultado el gráfico de distribución de los puntos de la Figura 5a, que muestra una apreciable dispersión de los datos. Sin embargo, analizando con detalle la asociación de los datos por sectores, puede apreciarse que se definen tres tendencias poblacionales que corresponden a situaciones morfoestructurales distintas. Así, se distingue un primer tramo que se inicia con el primer punto del perfil, en el cual la correlación entre ambas variables es negativa de muy baja pendiente, sigue un segundo tramo con correlación positiva de alta pendiente entre ambas variables que se interpreta como el resultado de la coincidencia de la máxima subsidencia sobre zonas con déficit de masa en el subsuelo debido a la generación de cavidades por disolución de la sal. Finalmente, el tercer tramo muestra una tendencia similar al primero, es decir de correlación mínima negativa entre las variables (Figura 5b).

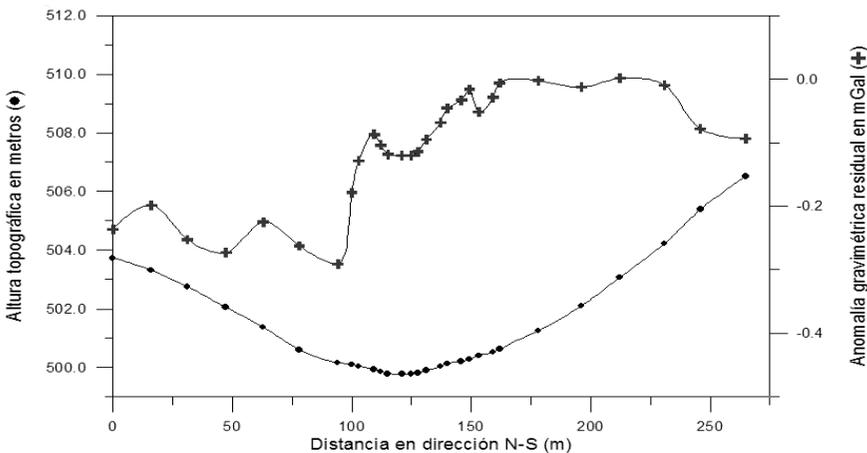


Figura 4. Perfil topográfico mostrando la variación de nivel en metros (●) sobre la zona de colapso, en parte debido a la existencia de una depresión morfológica en torno al arroyo, aunque también por el efecto de la subsidencia. Perfil de anomalía de Bouguer (+) para una densidad de reducción de 2.40 g/cm^3 .

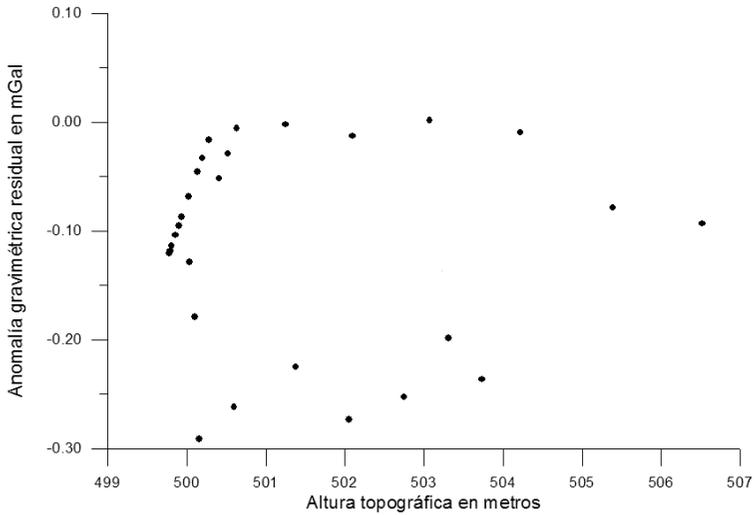


Figura 5a. Distribución de los datos del perfil en el gráfico de correlación de las variables altura sobre nivel del mar *versus* anomalía gravimétrica de Bouguer.

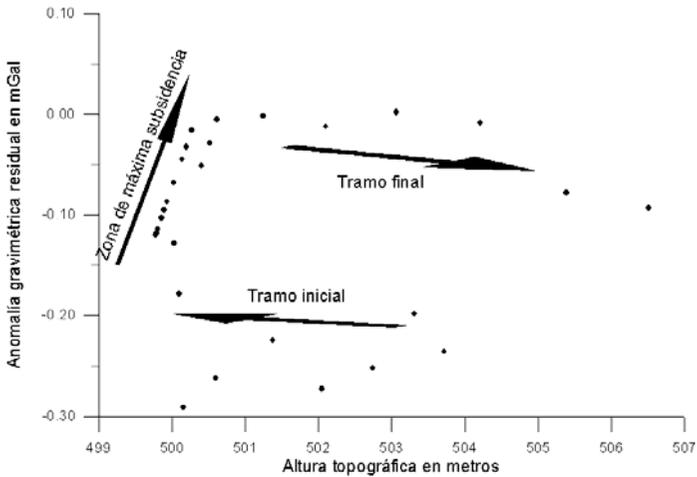


Figura 5b. Agrupación de los puntos según tres poblaciones con tendencia diferenciada en función de la corrección entre altura sobre el nivel del mar *versus* anomalía gravimétrica de Bouguer.

Conclusiones

El reconocimiento gravimétrico preliminar llevado a cabo a lo largo de un perfil sobre la ruta provincial 305 al cruzar sobre la zona minera del El Timbó, ha permitido detectar la presencia de una zona de máxima subsidencia asociada con un mínimo gravimétrico local en el lugar donde recientemente se han producido colapsos locales. El análisis de correlación entre las variables altura sobre el nivel del mar y anomalía gravimétrica han permitido definir tres tramos del perfil con un comportamiento diferenciado, de forma que, la zona central que muestra una marcada correlación en ambas variables implica que, a pesar de la subsidencia ya producida, existe en el subsuelo un déficit de masa que seguirá generando en el próximo futuro nuevos asentamientos diferenciales del terreno con los consecuentes problemas de estabilidad sobre la infraestructura vial.

La metodología aplicada en este estudio ha mostrado su utilidad como técnica no destructiva de análisis de los procesos que tienen lugar bajo la zona de estudio y por tanto se plantea la conveniencia de extenderlos a otras zonas próximas afectadas por la extracción minera. Así mismo, se contempla la posibilidad de complementar las medidas gravimétricas con otros métodos geofísicos, como por ejemplo el método de las resistividades eléctricas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al geólogo Juan Carlos Valoy de la Dirección Provincial de Vialidad de Tucumán, su interés por la realización de este estudio y por toda la información y facilidades ofrecidas durante las fases de adquisición e interpretación de los datos. Asimismo, ha sido de gran utilidad para la interpretación de los datos la información facilitada por P. Bortolotti, geólogo asesor de Industria Químicas y Mineras Timbó S. A.

También debemos manifestar nuestro reconocimiento a la ingeniera Elena Kuchudis de la Dirección Provincial del Agua por participación desinteresada en determinación topográfica de los puntos de medida en la primera fase de este estudio. También queremos agradecer al Agr. Carlos Giobellina por su desinteresada gestión ante el Catastro de la Provincia para obtener la fotografía aérea de la zona. Finalmente, queremos destacar la colaboración de los alumnos Mauricio Diamante y Luciano Saavedra en los trabajos de campo.

Referencias

- Barla, G. y Jarre, P., 1991, Subsidence over an abandoned dissolving salt mine. In: Rock mechanics as a multidisciplinary science. J. C. Roegiers (editor). *Proceedings of the 32nd U.S. Symposium on Rock Mechanics*, 32: 871-880.

- Bell, F. G., 1992, Salt mining and associated subsidence in mid-Cheshire, England, and its influence on planning. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 29 (4):371-386, 1-Gerardo E.
- Bossi, G. E., 1969, Geología y Estratigrafía del Sector Sur del Valle de Choromoro. *Acta Geológica Lilloana*, tomo X:2.
- Casas, A.; Deiana, D., Gili, J.; Rivero L. y Pinto, V., 2002, Geophysical surveys for detecting subsidence and collapse areas at Cardona salt diapir (Catalonia, Spain), *Proceedings of the 9th Environmental and Engineering Geophysics*.
- Marino, G. G., 1999, Salt mine subsidence and associated damage; a case history. In: Proceedings of the 16th annual National meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation; Mining and reclamation for the next millennium. S. A. Bengson and D. M. Bland (editors) *Proceedings of the Annual National Meeting* 16 (2): 453-461.
- Porto J. C. y Danieli, C. A., 1974, Geología del sector NW de Trancas (Provincia de Tucumán - Argentina) *Acta Geológica Lilloana*, tomo XII:12.
- Whittaker B. N. y Reddish D. J., 1989, Subsidence: occurrence, prediction and control, Elsevier.