

MODELO GRAVIMÉTRICO DE LOS DIAPIROS DE ESTELLA Y ALLOZ, Y LOCALIZACIÓN DE NUEVOS DIAPIROS NO AFLORANTES EN LA ZONA SUR DE ATAURI, CUBETA ALAVESA

V. Pinto, L. Rivero y A. Casas

Dpto. de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès s/n, 08028-Barcelona, (victor@natura.geo.ub.es).

Resumen: En el presente trabajo se proponen modelos gravimétricos 3D de los diapiros salinos de Estella y Alloz en la Cubeta Alavesa. Desde el punto de vista gravimétrico, los diapiros de Estella y Alloz se muestran como tres estructuras dispuestas perpendicularmente al frente de cabalgamiento de la cubeta sobre la Cuenca del Ebro. En superficie, las estructuras aparecen individualizadas, pero en profundidad están conectadas, dando lugar a una única masa diapírica. En la modelización se ha considerado un basamento inclinado que proporciona, después del proceso de inversión, un modelo gravimétrico bastante satisfactorio para explicar la geometría de los diapiros. Además, a partir del mapa de anomalías residuales, se han localizado dos estructuras diapíricas no aflorantes en la zona sur de Aauri.

Palabras clave : Diapiros, anomalía gravimétrica, modelos 3D, Cubeta Alavesa

Abstract : In this paper 3D gravity models of the Estella and Alloz diapiric salt bodies are presented. These structures are placed perpendicularly to the thrusting front between the Alava Basin and the Ebro Basin. From surface data only, the Estella and Alloz diapirs seems to be three well individualised structures, but our interpretation of the gravity anomalies argues that at depth are connected in only one salt body. For the construction of the 3D-gravity model a regular dipping basement has been considered that allow us, after the inversion process, obtain a fairly satisfactory model to explain the geometry of the diapirs. Besides, from the residual anomaly map, two non-outcropping diapiric structures have been detected at the south of the Aauri area.

Key words: Diapirs, gravity anomalies, 3D models, Alava Basin

Pinto, V., Rivero, L. y Casas, A. (2000) : Modelo gravimétrico de los diapiros de Estella y Alloz, y localización de nuevos diapiros no aflorantes en la zona sur de Aauri, Cubeta Alavesa. *Rev. Soc. Geol. España*, 13 (3-4): 529-538

El estudio de los diapiros salinos a partir de la interpretación de las anomalías gravimétricas ha sido objeto de continuo interés desde la década de los veinte, cuando se iniciaron las primeras campañas de prospección con balanza de torsión en la zona del Golfo de México. En particular, este interés se acrecentó después del éxito conseguido en la cartografía del diapiro Nash en 1924, que puede considerarse el primer descubrimiento geofísico de una estructura petrolífera.

Además de su importancia como estructuras trampa de acumulación de hidrocarburos en sus flancos, el estudio de la geometría de los diapiros salinos presenta un considerable interés para comprender la evolución geodinámica de las cuencas evaporíticas dada la facilidad de las masas salinas a adaptarse a los esfuerzos tectónicos. Recientemente, el estudio de los diapiros salinos ha recobrado su interés a causa de su utilización como reservorio geológico para el almacenamiento estratégico de recursos (gas y petróleo) o bien de residuos industriales o radiactivos.

El objetivo de este estudio es aportar información acerca de la geometría de los diapiros de Estella y Alloz en la Cubeta Alavesa, a partir de la interpretación de las anomalías gravimétricas.

Situación geográfica y contexto geológico

Geológicamente, el área de estudio se encuentra en la zona sur de la Cuenca Cantábrica, en el Dominio Cantabro-Navarro. En este dominio se distinguen dos unidades: la Plataforma Burgalesa, situada al sur, y la Cubeta Alavesa, más al norte. Es en esta última donde se concentra la mayoría de los diapiros Triásicos de origen halocinético y en donde se ha realizado este estudio. Ambas unidades son frontalmente cabalgantes entre sí (Montes de Tesla y Obarenes). El límite sur-oriental de la Cubeta lo constituye otro frente de cabalgamiento, pero esta vez sobre la Cuenca del Ebro (Montes de Cantabria). Al norte de la cubeta, limitado

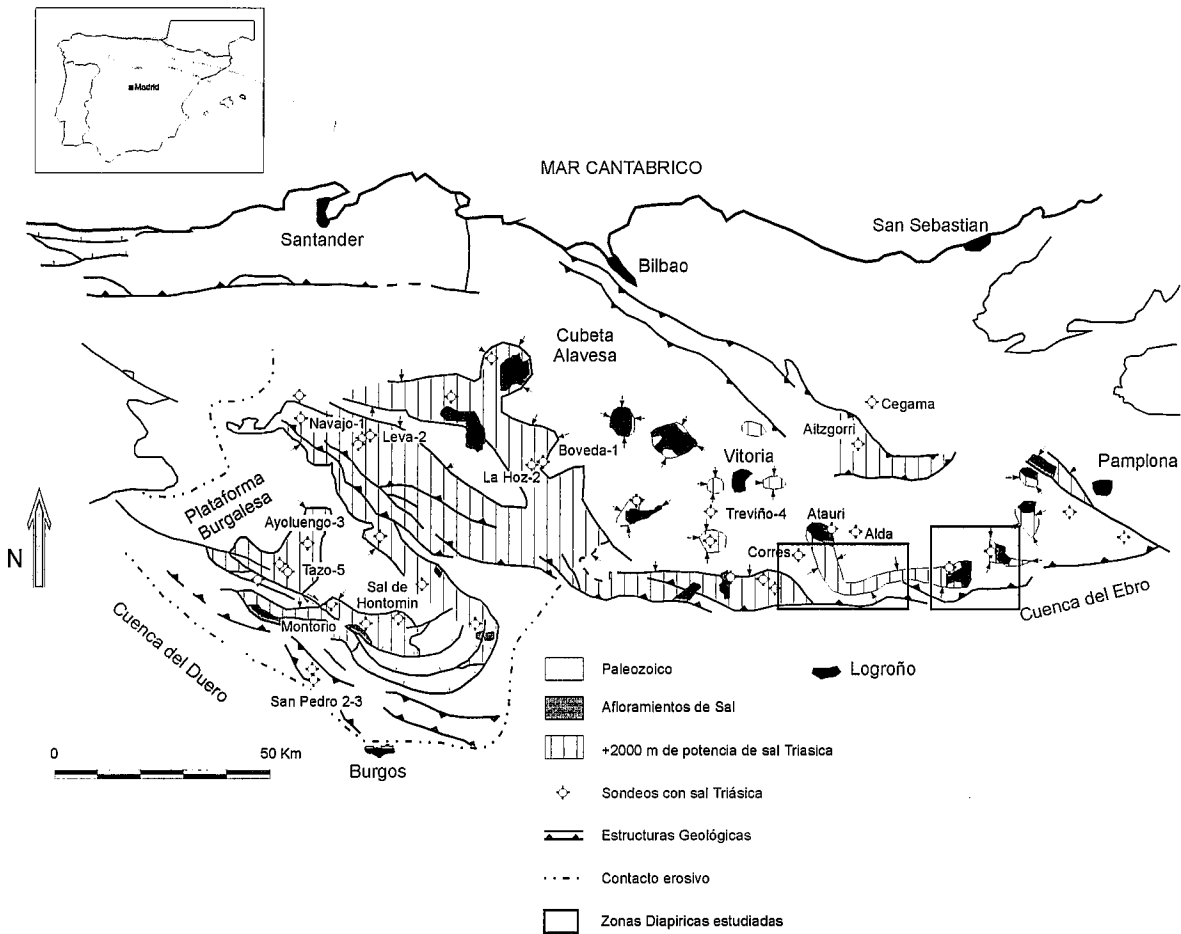


Figura 1.- Esquema estructural de la Cubeta Alavesa con indicación de los principales diapiros aflorantes y delimitación del área estudiada.

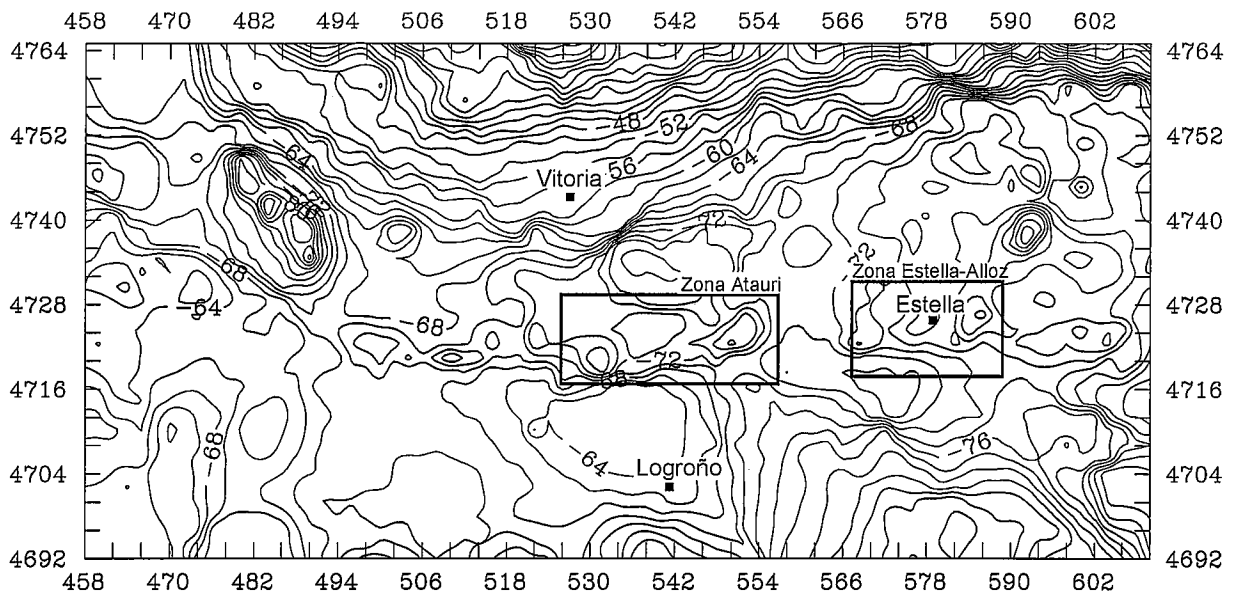
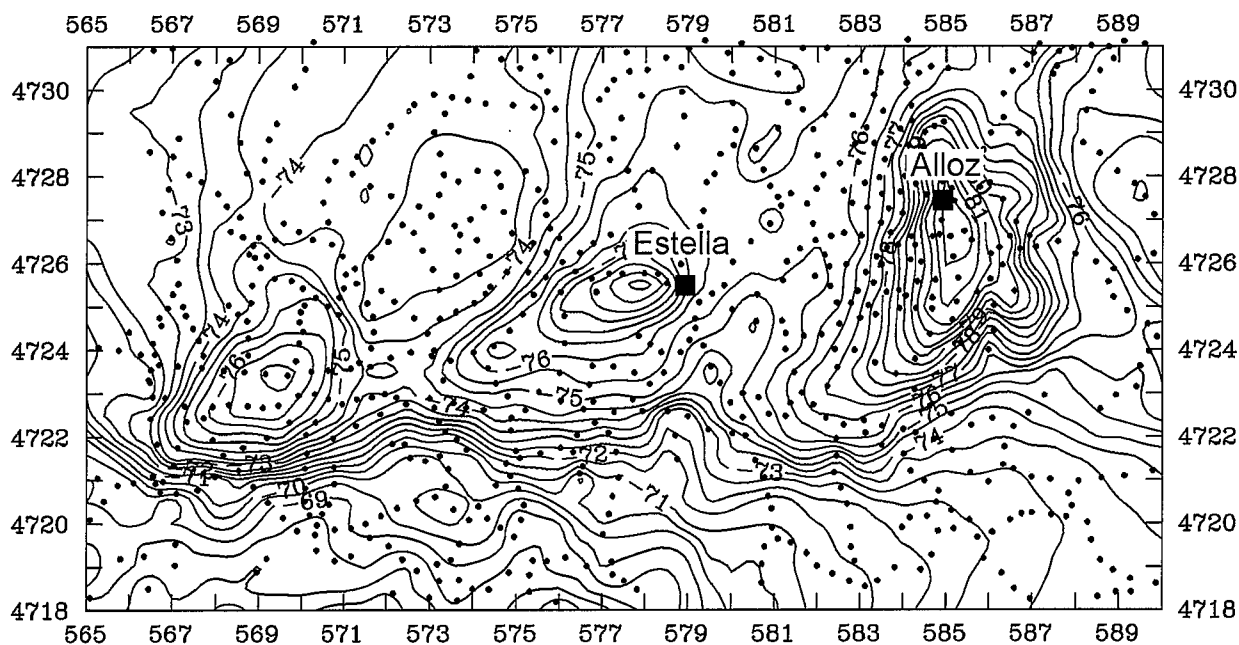


Figura 2.- Mapa de anomalía de Bouguer de la Cubeta Alavesa y situación de los diapiros de Estella, Alloz y zona sur de Atauri. Las coordenadas del mapa corresponden al sistema UTM (huso 30) y están expresadas en kilómetros. La unidad de las aislíneas es el miliGal.

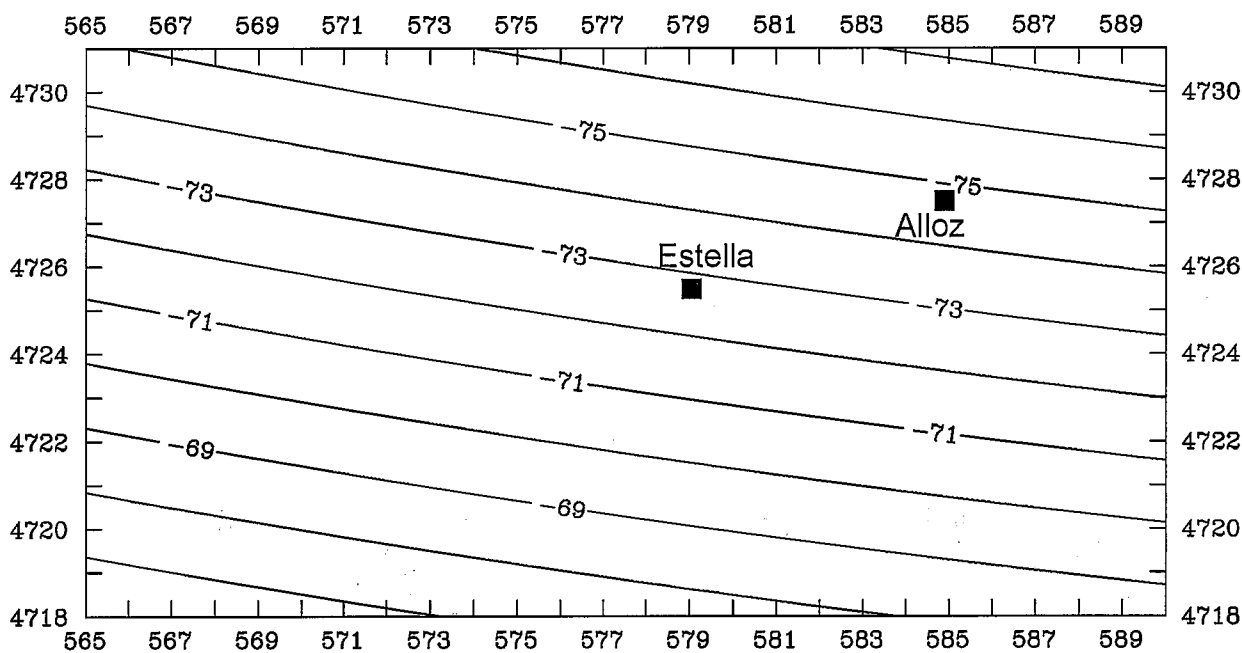
por otro frente de cabalgamiento (Anticlinorio de Bilbao), está situado el denominado Arco Vasco (Fig. 1).

El diapiro de Estella se encuentra situado en las proximidades de la población del mismo nombre, al SO de Pamplona. Forma un diapiro aflorante constituido en superficie principalmente por yeso y brechas salíferas, aun-

que incluye bloques de tamaño variable y composición variada, siendo los más abundantes de ofitas, gneis, pizarras y cuarcitas (Pflug, 1973). El contacto con los materiales encajantes es de tipo mecánico, destacándose en su extremo sur una falla inversa de unos 80° de inclinación bu- zando hacia el norte. En su sector noroccidental, el



(A)



(B)

Figura 3.- Mapa de anomalías de Bouguer (A) y regional (B) de los diapiros de Estella y de Alloz.

contacto se realiza mediante una falla normal, y al oeste los materiales del Keuper cabalgan sobre las margas arenosas del Cretácico.

El diapiro de Alloz está situado en las poblaciones de Alloz y Lácar, algo más al NE del diapiro de Estella. Constituye una intrusión de forma alargada y muy compleja, con una serie de fracturas que provocan la aparición dentro del diapiro de materiales calizos del Jurásico.

Evolución de las acumulaciones salinas en la Cubeta

Siguiendo los estudios realizados por Serrano y Martínez del Olmo (1990), la tectónica en el Dominio Cántabro comenzó con un régimen extensivo que se prolongó desde el Triásico hasta el Cretácico superior. En esta etapa se produjo una intensa diferenciación ha-

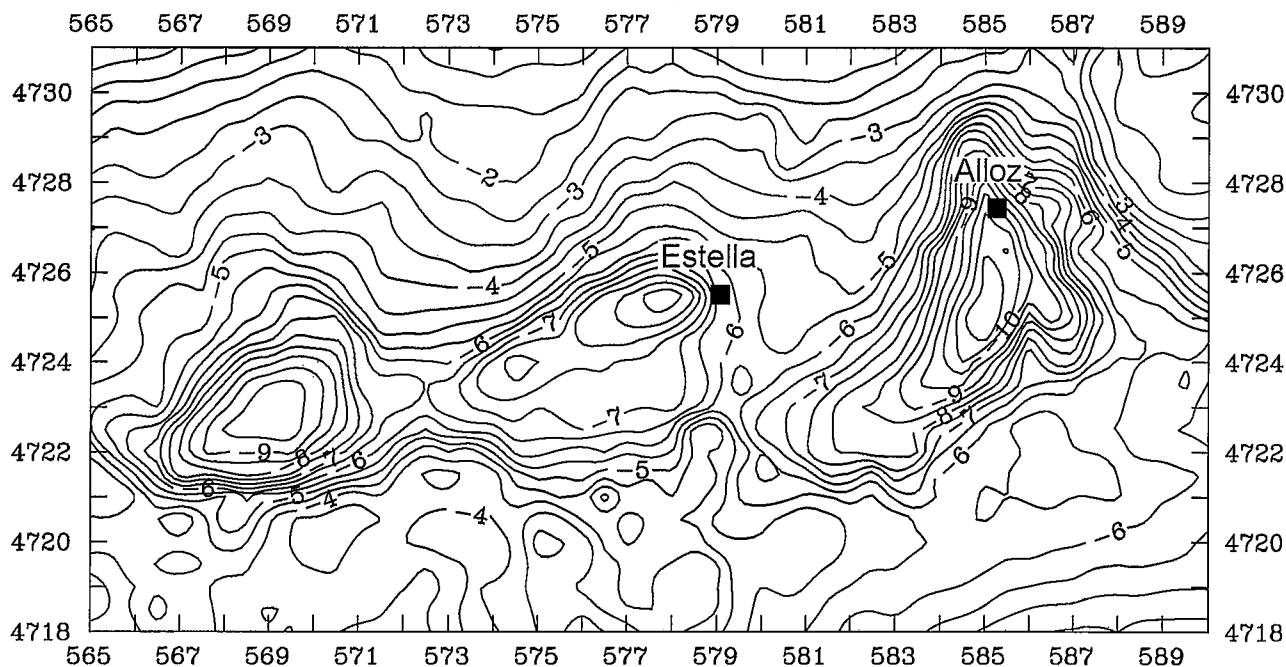


Figura 4.- Mapa de anomalía residual de los diapiros de Estella y de Alloz.

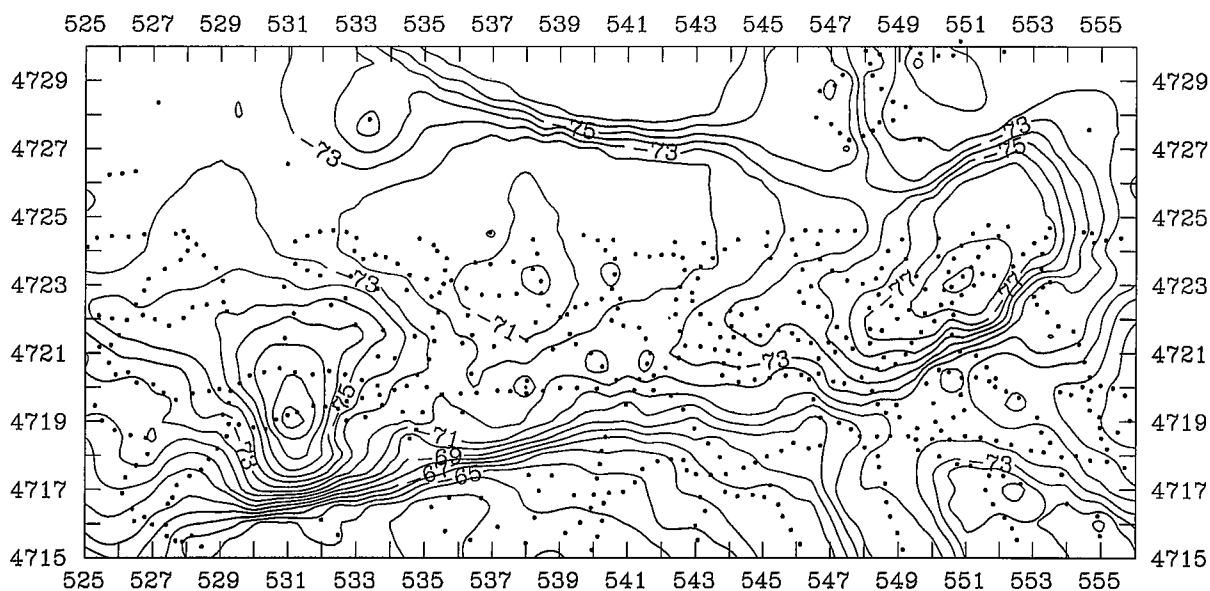


Figura 5.- Mapa de anomalía de Bouguer de los diapiros de la zona sur de Auri.

locinética relacionada con accidentes de zócalo. El movimiento halocinético provocó la aparición de pequeñas cubetas que condicionaron la sedimentación mesozoica en el área. Después de esta fase extensiva tuvieron lugar las deformaciones alpinas.

En conjunto, la profundidad del techo del Trías salino aumenta hacia el nordeste, en relación con la progresiva profundización de la cuenca. No obstante, en varios puntos de la zona de estudio se puede encontrar la sal aflorante o a poca profundidad. Esto es debido a que la sal, inicialmente muy profunda, ha sido afectada por halocinesis llegando a extruir en forma de domos salinos o diapiros.

El Trías salino en la Cubeta Alavesa está formado por el Muschelkalk y el Keuper. El Muschelkalk está constituido por tres miembros: una unidad basal formada por dolomías y calizas, una unidad media constituida por calizas laminadas y, por último, una superior compuesta de calizas y margas dolomíticas. El Keuper está constituido por una serie salina con intercalaciones arcillosas, anhidriticas, dolomíticas y ofíticas. El techo del Trías lo constituye una alternancia de anhidrita y dolomías del Lias Inferior (carniolas). La deposición de estos materiales estuvo fuertemente condicionada por la halocinesis, llegando muchas veces a estar erosionados y/o no depositados encima de las estructuras salinas.

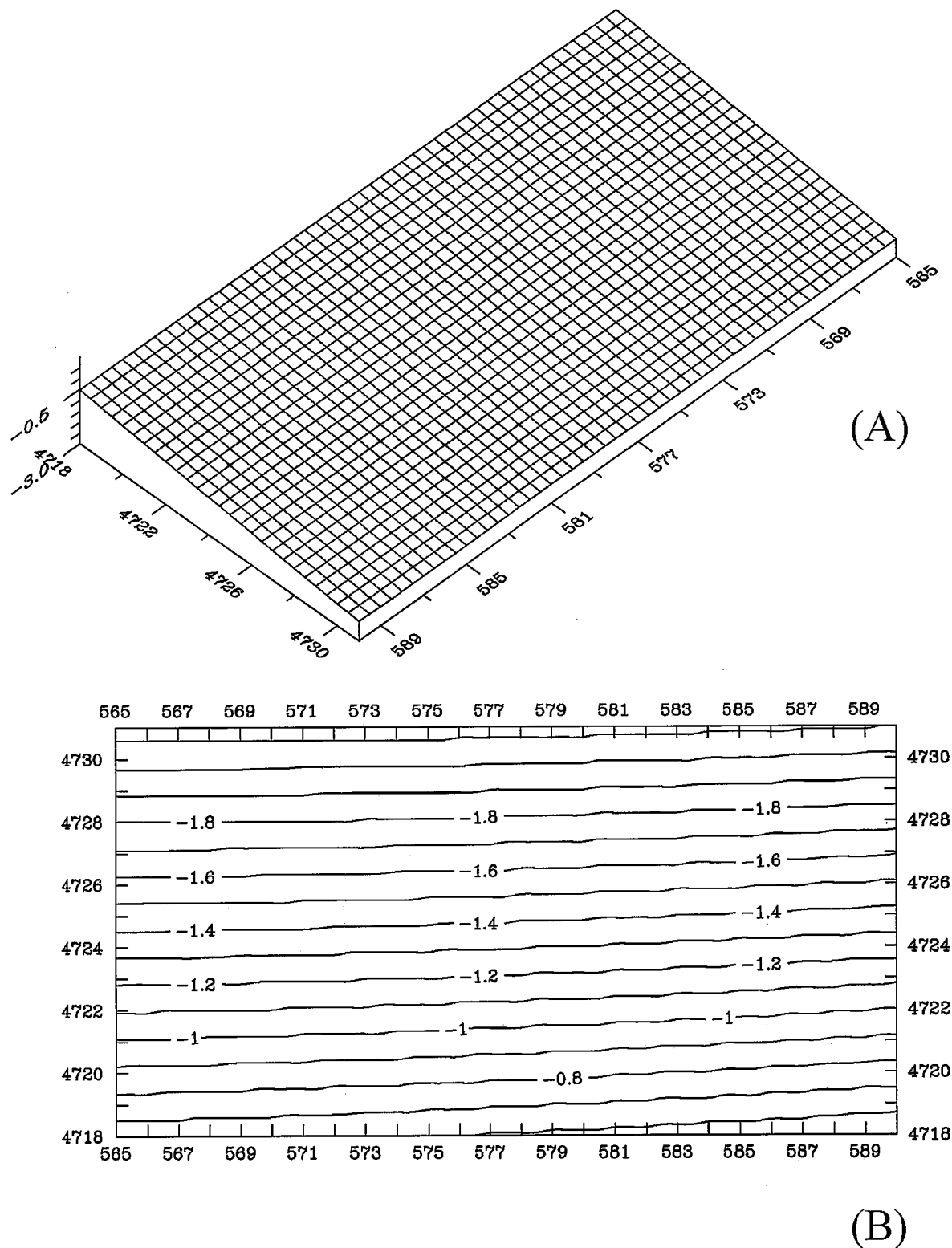


Figura 6.- Superficie base del modelo de los diapiros de Estella y de Alloz (referido al nivel del mar en kilómetros). Vista 3D (A) y planta (B).

El movimiento de la sal está relacionado con fallas de sustrato que pueden afectar también al Triásico y Jurásico. La reactivación de estas fallas durante la sedimentación de estos materiales favoreció la diferenciación halocinética, generándose fallas de colapso que permitieron el desarrollo de altos salinos, de estructura muy compleja, que locamente dieron lugar a extrusiones diapíricas. La evolución de los altos salinos condicionó zonas de gran sedimentación (Cretácico Inferior),

creando a su alrededor potentes cubetas sedimentarias (Villarcayo, Treviño, etc.).

Campaña gravimétrica. Mapa de Anomalías de Bouguer

El primer levantamiento gravimétrico a escala regional de la provincia de Navarra, que incluye la zona estudiada, fue llevado a cabo por Lozano (1963). Sin

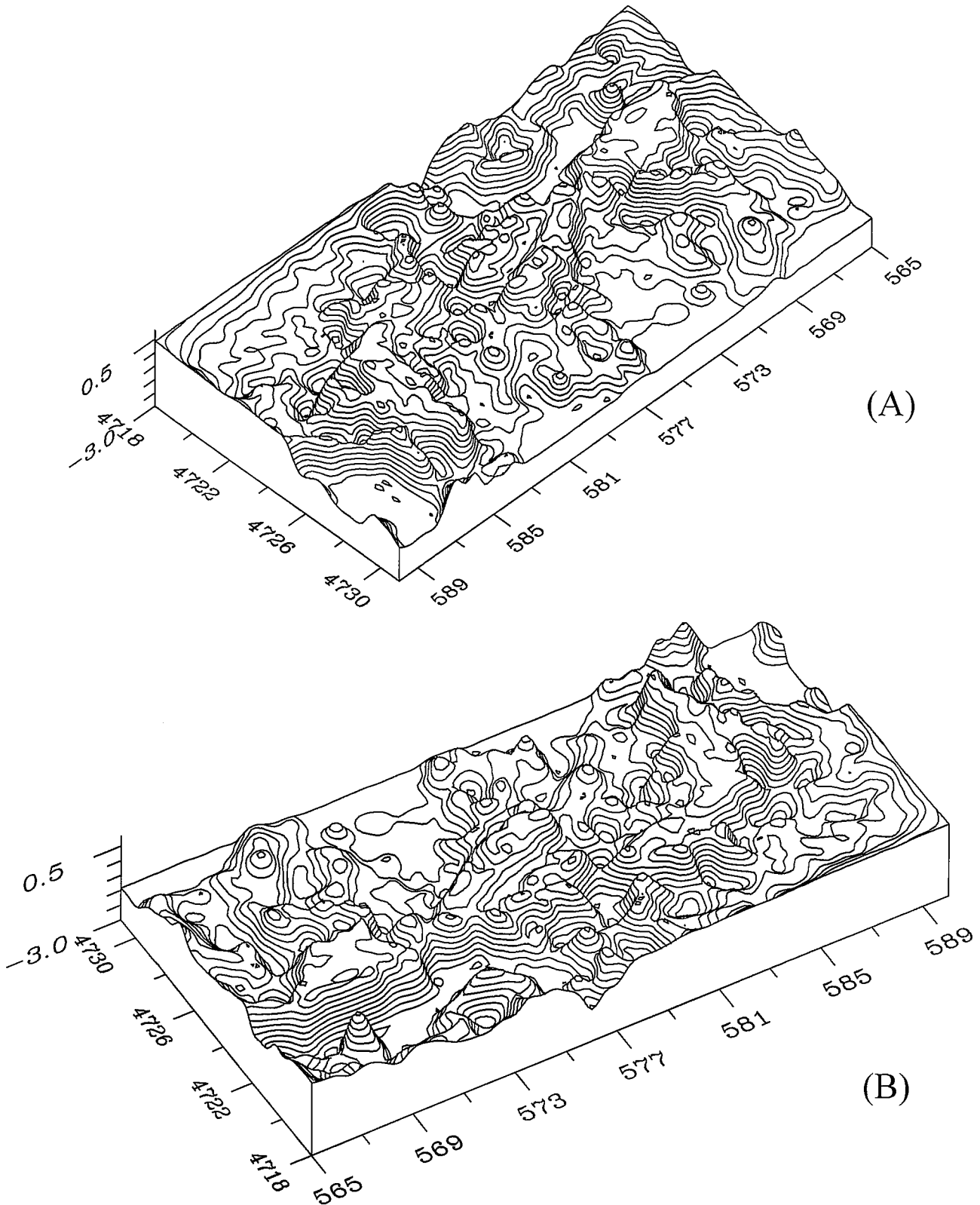


Figura 7.- Modelo sintético del diapiro de Salinas de Estella y Alolz (referido al nivel del mar en kilómetros). Perspectivas 3D (A y B).

embargo, las anomalías locales producidas por las estructuras geológicas no quedaban en general reflejadas en el mapa de anomalías de Bouguer a causa de la escasa densidad de muestreo. Posteriormente, Nettleton (1968) elaboró una interpretación preliminar de las detalladas campañas de prospección geofísica que se rea-

lizaron en la zona durante la década de los 60, teniendo como objetivo la exploración de hidrocarburos. Estos estudios, ya de cierta envergadura, comprendieron una cartografía gravimétrica y el registro de algunos perfiles de sismica de reflexión. La modelización gravimétrica de los diapiros la obtuvo mediante perfiles 2D,

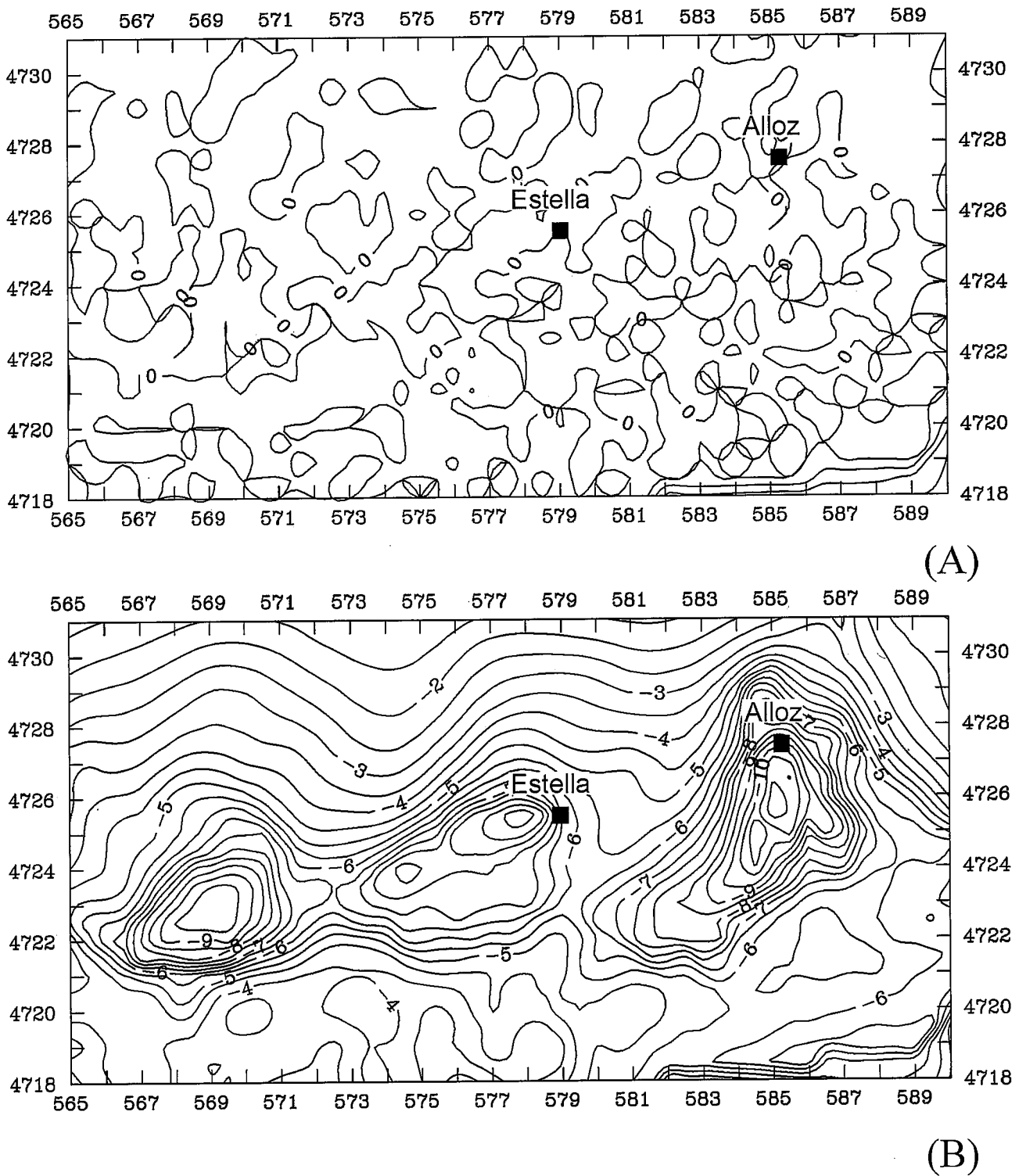


Figura 8.- Mapa de anomalía teóricas después de 30 iteraciones y mapa de errores de los diapiros de Estella y de Alloz.

asimilando las masas anómalas a volúmenes esféricos de halita con enclaves prismáticos más densos (ofitas).

Para el estudio que aquí se presenta se han utilizado más de 10.000 estaciones gravimétricas distribuidas casi uniformemente por toda la cubeta. Los valores de gravedad observada están referidos al IGSN'71, con corrección topográfica hasta 22 km y densidad de reducción de $2,67 \text{ g/cm}^3$. Para el cálculo de la gravedad normal sobre el elipsoide se ha tomado el *Geodetic Reference System* de 1967. El mapa de anomalías de

Bouguer de conjunto (Fig. 2) muestra la existencia de anomalías locales bien individualizadas sobre una marcada tendencia regional que varía desde valores mínimos de -88 mGal en el sur a valores de -26 mGal al norte. Este gradiente positivo hacia el norte se considera producido por el adelgazamiento cortical en esta dirección y por la presencia de corteza oceánica más densa bajo el Mar Cantábrico como consecuencia de la abertura del Golfo de Vizcaya (Sibuet y Le Pichon, 1970).

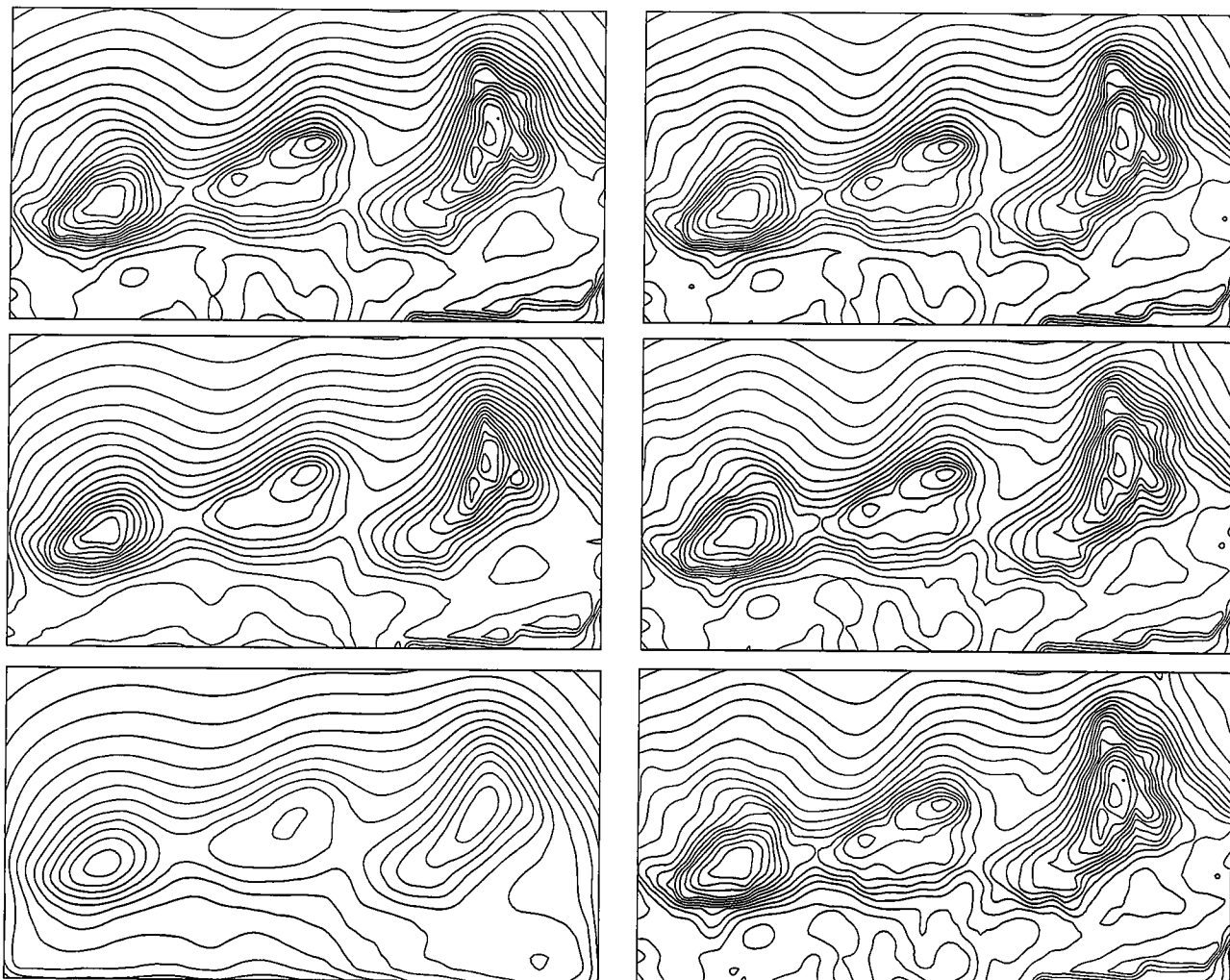


Figura 9.- Evolución de las anomalías teóricas, empezando en el extremo inferior izquierdo y en el sentido de las agujas del reloj (iteraciones 1, 3, 7, 12, 20 y 30).

Mapas de anomalía de Bouguer y residual de los diapiros de Estella y Alloz y de los diapiros de la zona sur de Aauri

El mapa de anomalías de Bouguer de la zona de Estella y Alloz (Fig.3) diferencia dos zonas, una zona sur y una zona norte, separadas por un frente que presenta un fuerte gradiente. Es en la zona norte donde se localizan tres estructuras, que se disponen más o menos perpendicularmente al frente, y que corresponden a los diapiros aflorantes de Estella y de Alloz.

La interpretación cuantitativa se ha realizado a partir del mapa de anomalías residuales obtenido sustrayendo a los valores de anomalía de Bouguer la tendencia regional, asimilada a la superficie obtenida mediante un ajuste polinómico iterativo de grado 2 que elimina las posibles pseudoanomalías (Pinto, 1992) (Fig. 4).

Se han localizado dos estructuras diapíricas no aflorantes al Sur de Aauri, en el contacto de la cubeta con la Depresión del Ebro. Parecen disponerse de forma análoga y central respecto a las estructuras salinas situadas al oeste, diapiros de Ocio y Peñacerrada, y los situados al este (diapiros de Estella y Alloz). Su morfo-

logía es alargada, disponiéndose su eje mayor perpendicularmente al frente de cabalgamiento. La ausencia de información geológica para elaborar un modelo inicial ha condicionado que no presentemos aquí una interpretación cuantitativa ya que hubiera resultado demasiado especulativa (Fig. 5).

Modelización gravimétrica

La interpretación cuantitativa de las anomalías gravimétricas residuales se ha realizado utilizando métodos sintéticos. Estos métodos se basan fundamentalmente en simular la forma del modelo geológico mediante un conjunto de cuerpos geométricos sencillos. Generalmente, se trata de métodos de inversión muy bien adaptados para su resolución por ordenador de forma prácticamente automática. Estos métodos, ampliamente utilizados desde hace años (Bott, 1960) consisten, una vez establecido el contraste de densidad entre la estructura y el encajante, en modificar sucesivamente la geometría de los prismas verticales, mediante un procedimiento iterativo de prueba y error. De este modo, a partir de un modelo inicial, se obtiene un mo-

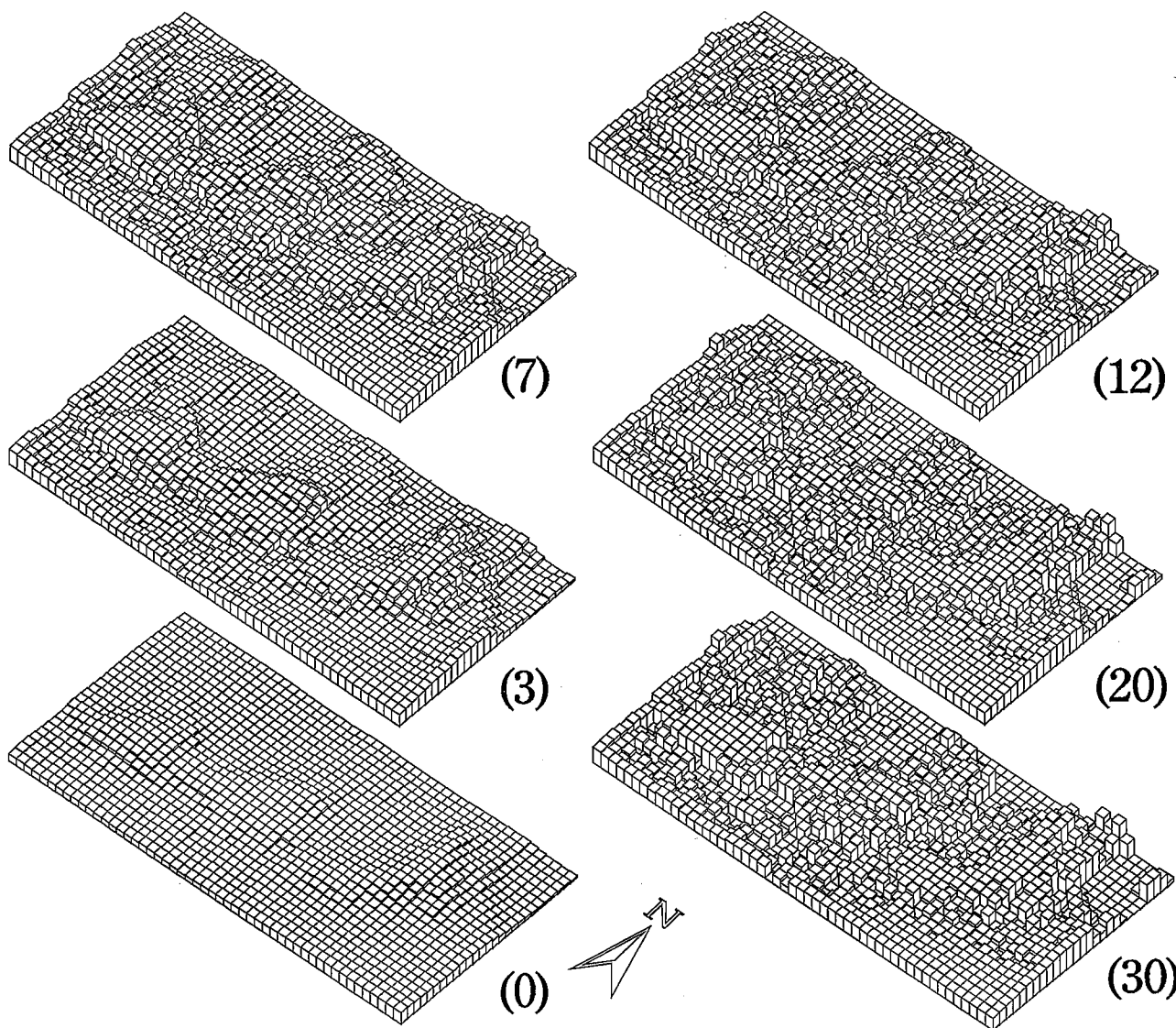


Figura 10.- Evolución del modelo prismático en el proceso iterativo de los diapiros de Estella y de Allos. Se indica entre paréntesis el número de la iteración durante el proceso de inversión.

delo geométrico teórico, cuya anomalía difiere poco con la anomalía experimental. En cada iteración la altura de cada uno de los prismas varía, según determinado criterio, ajustándose así al final las anomalías teóricas a las experimentales.

El método utilizado se basa en los trabajos de Bott (1960), Cordell y Henderson (1968), Bhaskara y Ramesh (1991) y Pinto y Casas (1996) que consiste llevar a cabo la modelización por inversión automática de una matriz de anomalías residuales con un intervalo de malla regular. El procedimiento adoptado ha consistido en mantener constante la base de los prismas y aumentar la altura de los mismos mientras la anomalía teórica no satisfaga el valor de la anomalía experimental. Durante el proceso de variación de altura de los prismas se tiene en cuenta el relieve topográfico, de tal forma que lógicamente los prismas no pueden sobrepasarlo. El criterio de convergencia utilizado en cada iteración ha sido el de Bott (1960), cuya expresión matemática es la siguiente:

$$h(i, j)_n = h(i, j)_{n-1} + (Ae(i, j) - At(i, j)_{n-1}) / (\pi 40/3)$$

donde, n es la iteración considerada, h(i, j) es la altura del prisma en la posición i, j de la malla, Ae(i, j) es la anomalía gravimétrica experimental en la celda (i, j), At(i, j) es la anomalía teórica del modelo en la iteración n-1.

Las estructuras salinas en esta zona están fuertemente relacionadas con el proceso de cabalgamiento de la Cubeta sobre la Depresión del Ebro. Estudios realizados por Pflug (1973) y Serrano y Martínez del Olmo (1989) ponen en evidencia que la base de estas estructuras salinas es el plano de cabalgamiento. A partir de los trabajos de Serrano y Martínez del Olmo (1989), se ha concebido una base inclinada para los prismas. Después de varios ensayos y pruebas, se ha considerado como más adecuada una base plana inclinada hacia el norte unos 25 grados y con una suave pendiente hacia el NO (Fig. 6). Se ha realizado un proceso de inversión que ha permitido obtener un modelo resultante bastante satisfactorio (Fig. 7).

Se ha confirmado, tal como indicaba Pflug (1973), que a pesar de la composición superficial pobre en sales, éstas son mucho más abundantes en profundidad. El contraste de densidad entre el material diapírico y el encajante se ha estimado en $-0,2 \text{ g/cm}^3$ y el intervalo de malla de 500 m.

El ajuste de las anomalías teóricas generadas por el modelo con las anomalías observadas es bastante bueno, dando lugar a unos errores mínimos que carecen de distribución ordenada, excepto en la esquina SE del mapa, donde son mayores. Sin embargo, estos errores se relacionan con efectos de borde de mapa (Figs. 8, 9 y 10).

Conclusiones

La modelización gravimétrica 3D aplicada a los diapiros de Estella y Alloz ha permitido obtener una buena representación espacial de estas estructuras, tanto en superficie como en profundidad. Los diapiros de Estella y Alloz constituyen tres estructuras que, aunque afloran en superficie de forma individual, en profundidad se encuentran interconectados entre sí. El diapiro de Estella se resuelve en dos estructuras alargadas en sentido E-W disponiéndose paralelamente al frente de cabalgamiento de la Cubeta Alavesa sobre la Cuenca del Ebro. El diapiro de Alloz se caracteriza por su extensión no aflorante hacia el suroeste.

No nos consta que existiese ninguna referencia en la bibliografía precedente sobre la presencia de dos estructuras diapíricas no aflorantes situadas en la zona sur de Atauri. No obstante, en este estudio se ha localizado claramente su posición a partir de la interpretación cualitativa de las anomalías gravimétricas residuales. La escasez de datos geológicos profundos de esta zona ha aconsejado no abordar todavía la realización de un modelo 3D gravimétrico de estas anomalías, aunque parece probable una disposición en profundidad análoga a la de las estructuras de Estella y Alloz.

Debemos expresar nuestro agradecimiento a A. Serrano y W. Martínez del Olmo, quienes animaron al primer firmante de este trabajo a realizar la modelización gravimétrica de la Cubeta Alavesa durante el curso "Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y zona de Levante" organizado por los Dres. F. Ortí y J.M. Salvany con la colaboración de ENRESA y el Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica de la Universidad de Barcelona.

Asimismo, queremos agradecer a María Gil López su colaboración en muchos de los procesos de cálculo numérico implicados en la metodología de interpretación 3D mediante modelos sintéticos.

Bibliografía

- Bhaskra Rao, D. y Ramseh Babu, N. (1991): A FORTRAN-77 computer program for three-dimensional analysis of gravity anomalies with variable density contrast. *Computers y Geosci.*, 17: 665-667.
- Bott, M.P.H. (1960): The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. *Geophys. Jour. Roy. Astr. Soc.*, 3: 63-67.
- Cordell, L. y Henderson R.G. (1968): Iterative three-dimensional solution of gravity data using a digital computer. *Geophysics*, 33: 596-601.
- Lozano, L. (1963): Red de observaciones con gravímetro de la provincia de Navarra. *Instituto Geográfico y Catastral*, 22 p.
- Nettleton, L.L. (1968): Gravity anomalies over salt diapirs. Northern Spain. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 88. 75-82.
- Pflug, R. (1973): El diapiro de Estella. *Munibe*, 25: 171-202.
- Pinto, V. (1992): *Modelización gravimétrica interactiva 2D y 3D de estructuras geológicas. Su aplicación a los diapiros salinos*. Tesis doctoral, Univ. de Barcelona, 506 p.
- Pinto, V. y Casas, A. (1996): An interactive 2D and 3D gravity modeling program for IBM-compatible personal computers. *Computers y Geosci.*, 22(5): 535-546.
- Serrano, A. y Martínez del Olmo, W. (1990): Tectónica salina en el Dominio Cántabro-Navarro: evolución, edad y origen de las estructuras salinas. En: *Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la zona de Levante*. (F.Ortí y J.M.Salvany, Eds). ENRESA-GPPG, 39-53.
- Sibuet, J.C. y Le Pichon, X. (1970): Structure gravimétrique du golfe de Gascogne à partir des profils de sismique. En: *Symposium sur l'histoire structurale du Golfe de Gascogne*. Ed. Technip, París.

Manuscrito recibido el 8 de Julio de 2000
Aceptado el manuscrito revisado el 20 de Octubre de 2000