

## INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA Y ANÁLISIS DE IMÁGENES THEMATIC MAPPER Y PARES ESTEREOSCÓPICOS SPOT DE LA CORDILLERA ORIENTAL Y ZONA SUBANDINA DE BOLIVIA

S.E. MARTINEZ<sup>1</sup> Y T.L. GUBBELS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera". Barcelona

<sup>2</sup> Department of Geological Sciences. Cornell University. USA

### RESUMEN

Este estudio se centró en la zona S de Bolivia, en los dominios tectonoestratigráficos denominados Faja Subandina y Cordillera Oriental. El objetivo fue la caracterización geomorfológica, estructural y estratigráfica de este área utilizando imágenes TM, pares SPOT estereoscópicos e información de campo. Los datos obtenidos así como otros recopilados de la bibliografía se integraron utilizando un S.I.G.. Como representación gráfica de la síntesis de datos realizada se ha construido un diagrama 3D en el que se propone una nueva interpretación para la evolución de la zona andina oriental de Bolivia.

### ABSTRACT

*The Southern part of Bolivia (the Faja Subandina and the Cordillera Oriental tectono-stratigraphic domains) was studied in order to characterize geomorphic, structural and stratigraphically this area using TM imagery, SPOT stereo pairs and ground truth information. The data obtained and some other compiled from the existing literature were integrated using a GIS. The graphic representation of the data synthesis is a 3D diagram, in which a new interpretation for the evolution of the oriental zone of the Bolivian Andes is proposed.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La evolución tectónica de la Cordillera Oriental y de la zona Subandina se halla estrechamente relacionada con el levantamiento de la Puna durante el Cenozoico superior. Se ha seleccionado un transecto situado a latitud 20°S a fin de realizar un análisis detallado de la expresión geomorfológica de las estructuras tectónicas presentes, así como de llevar a cabo la caracterización estructural del dominio tectonoestratigráfico de la Faja Subandina Centro y Sur de la Cordillera Oriental (Sempere, et al., 1988) bolivianas.

Las razones por las cuales se seleccionó esta área son tres:

- Los Andes bolivianos se encuentran en un margen continental activo. En esta zona se puede observar la importancia relativa de los procesos de engrosamiento cortical que contribuyen a la construcción de cadenas montañosas en este medio: acortamiento cortical y magmatismo. La importancia relativa de estos dos procesos está sujeta a grandes debates.
- De esta zona sólo existen publicadas cartografías geológicas a escala 1:1.000.000. Debido a la gran extensión de la zona y a la falta de infraestructura que favorezca la realización de una campaña geológica exhaustiva, la teledetección es a priori un instrumento adecuado para la revisión y mejora de la información existente.
- La importancia de este área de cara a la prospección

petrolera y de gas. Se ha revelado como la zona más fructífera de Bolivia, con más de 50% de los campos petrolíferos descubiertos hasta la fecha en el país (Campo de Camiri, Guairuy, Itapirenda, Cambeiti, Monteagudo, etc) (Quevedo Velasco, 1977), por lo cual resulta primordial para la realización de nuevas campañas de exploración el conocer la estructura geológica de la zona.

A lo largo de este transecto se han compilado las imágenes Landsat Thematic Mapper correspondientes así como tres pares estereoscópicos SPOT. Se generaron diversas combinaciones TM espectralmente realizadas y anaglifos digitales a partir de cada par estereoscópico SPOT, los cuales se han sometido a las transformaciones geométricas necesarias para superponerlos con las imágenes Landsat TM. Los tratamientos digitales llevados a cabo a fin de corregir las imágenes SPOT (nivel de corrección 1A) muestran que éstas presentan distorsiones (debidas a la rotación terrestre y al desplazamiento causado por el relieve) que hacen que sea imposible corregirlas con precisión sin la ayuda de un MDT (Modelo Digital del Terreno) de alta resolución. Sin embargo, el grado de precisión conseguido es el adecuado para la interpretación geológica objeto de este estudio.

El análisis de los anaglifos SPOT se ha realizado en un monitor color convencional, usando gafas estereoscópicas, lo cual ha permitido un análisis detallado en estéreo. Se ha puesto de relieve la utilidad de la visualización con desplazamientos interactivo a lo largo de las imágenes Landsat TM

realizadas y de los análogos SPOT en 3D. Este tipo de análisis maximiza las ventajas de los dos tipos de imágenes: las Landsat TM proporcionan importante información espectral y las SPOT información relativa a su alta resolución espacial en 3D.

La interpretación de estos datos ha permitido delinear con precisión la estructura que separa la Zona Subandina de la Cordillera Oriental (Figura 1). Esta estructura, llamada Cabalgamiento Frontal Principal (CFP), presenta un buzamiento de  $20^{\circ}\text{W}$ . Al este del CFP, los anticlinales y sinclinales de la Zona Subandina resultan ser un importante control estructural de la topografía y de las redes de drenaje. Al oeste del CFP, el relieve local y las pendientes son más abruptas y la expresión topográfica de las estructuras individuales es menos pronunciada. En este estudio se propone que la Zona Subandina es más activa tectónicamente que la Cordillera Oriental, pero, proporcionalmente, la importancia de la erosión en la Cordillera Oriental es mayor.

Los sistemas de análisis digital de imágenes utilizados en este estudio han sido los existentes en el INSTOC (Institute for the Study of the Continents, Cornell University). Se trata de dos sistemas de International Imaging System (I2S) conectados a sendos ordenadores MicroVax 3200 y II-GPX de Digital Equipment Co. El primero de dichos analizadores es el modelo System 600, conectado a un monitor con capacidad para mostrar imágenes de  $1024 \times 1024$  píxeles. El segundo de los sistemas de análisis de imágenes es el Model 75 con capacidad para mostrar imágenes de  $512 \times 512$  píxeles. Posee un procesador matricial que agiliza notablemente la ejecución de ciertas funciones que requieren mucho tiempo de uso de CPU.

Además de los dos sistemas de análisis de imágenes descritos, el laboratorio de Teledetección del INSTOC posee un Sistema de Información Geográfica (G.I.S.) ARC/INFO, conectado a otro ordenador Micro Vax 3200 que ha permitido la digitalización y superposición de información espacial procedente de fuentes diversas y su representación gráfica.

Las imágenes del área de interés fueron seleccionadas de entre la colección de imágenes del INSTOC (una colección muy completa de imágenes TM, SPOT, SIR-A y SIR-B correspondientes a la zona andina).

## 2. ANÁLISIS DE IMÁGENES DIGITALES

Una vez escogidas las tres imágenes SPOT necesarias para cubrir la zona situada entre las longitudes  $65^{\circ}\text{W}$  y  $63^{\circ}\text{W}$ , latitud  $20^{\circ}\text{S}$  se procedió a la realización de tres mosaicos con las imágenes Landsat TM correspondientes cada uno de ellos, a una de las tres imágenes SPOT. Estas, cada una de las cuales cubre aproximadamente  $3.600 \text{ km}^2$ , corresponden a tres zonas adyacentes situadas en la misma latitud y denominadas en este trabajo zonas A, B y C (de este a oeste). Tras la obtención de dichos mosaicos y previamente a la corrección geométrica imprescindible para poder realizar combinaciones entre los canales TM y SPOT fue necesario hacer un remuestreo de los canales TM. Esto significa que cada píxel de las imágenes TM originales (resolución espacial

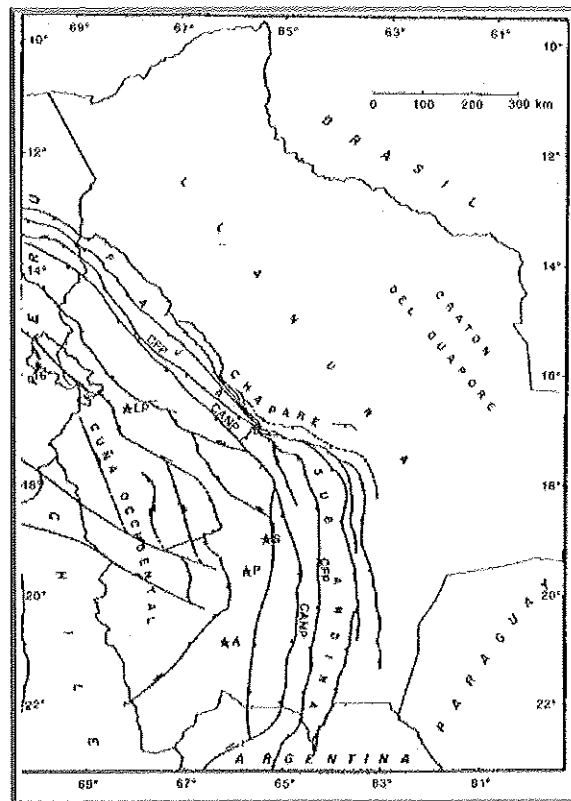


Figura 1.- Mapa estructural de Bolivia. CANP: Cabalgamiento Andino Principal. CFP: Cabalgamiento Frontal Principal. LP: La Paz. S: Sucre. P: Potosí. A: Atocha. Sempere et al. (1988), modificado.

de  $28,5 \text{ m}$ ) se desdobló en nueve píxeles, cada uno de ellos con el nivel de gris del píxel original, para simular una resolución espacial similar a la de la imagen SPOT pancromática ( $10 \text{ m}$ ).

Posteriormente se realizó la corrección geométrica del canal SPOT a fin de conseguir la misma resolución espacial que en las imágenes TM remuestreadas y de restaurar las distorsiones del canal SPOT (debidas al ángulo de perspectiva con que fue captada la imagen, al efecto de cizallamiento por rotación de la Tierra y a los desplazamientos producidos por el relieve). Para ello se siguió el siguiente procedimiento.

- Selección de puntos de control, análogos en las imágenes TM y SPOT.
- Selección del polinomio de transformación que minimizase los desajustes espaciales entre dichas imágenes.
- Transformación geométrica de la imagen SPOT. Para ello se utilizó un algoritmo de convolución cúbica.

Durante la corrección geométrica de las imágenes SPOT se observó que si bien para las zonas A y B (oriental y central) con un polinomio de transformación de orden 2 era suficiente para superponer satisfactoriamente el canal SPOT

con los TM, no ocurría otro tanto para la zona C (la más occidental y por lo tanto correspondiente a un área de relieves abruptos próxima a la Cordillera Oriental Andina). En este caso el error correspondiente a la diferencia entre las coordenadas teóricas obtenidas al aplicar el polinomio de transformación de orden 2 y de las coordenadas observadas de los puntos de control era tres veces mayor que el error correspondiente a las zonas A y B (de relieves menos acusados o nulos). Por ello se optó por tomar un total de 110 pares de puntos de control en la zona C (frente a los aproximadamente 50 pares tomados en cada una de las otras dos zonas) con lo que fue posible calcular un polinomio de transformación de orden más alto posible permitido por el sistema (5) y el error fue minimizado hasta alcanzar valores similares a los aceptados para las otras zonas.

Para obtener a partir de las imágenes TM los cocientes de bandas y realizar el análisis de componentes principales fue necesario corregir radiométricamente las mismas. El método utilizado para ello fue el de la sustracción del objeto negro, modificado por Chávez (Chávez, 1988).

Una vez procesados los 7 canales TM y el canal SPOT pancromático correspondientes a las zonas A, B y C se procedió a la construcción de pseudocanales a base de división de canales (TM3/TM1, TM5/TM4, TM5/TM7), análisis de componentes principales y transformación IHS (intensity, hue, saturation). Asimismo se pasó a experimentar diversas combinaciones utilizadas posteriormente en la interpretación geológica llevada a cabo.

A partir de imágenes SPOT pancromáticas correspondientes a una misma zona pero captadas bajo diferentes ángulos de observación se han construido tres pares SPOT estereoscópicos, correspondientes a las zonas A, B y C. Para ello se procedió a aplicar un polinomio de transformación de orden 2 (zonas A y B) y 3 (zona C) a una de las dos imágenes de cada par SPOT (Imágenes 1 y 2).

### 3. INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA

Los Andes comprende de W a E: la Cordillera Occidental, el Altiplano, la Cordillera Oriental y la Zona Subandina. Al E de ésta última se encuentra el Escudo Brasileño. El sector estudiado comprende las estructuras más orientales de los Andes (Cordillera Oriental y Zona Subandina). El límite entre la Cordillera Oriental y la Zona Subandina viene dado por una importante estructura denominada Cabalgamiento Frontal Principal (CFP).

La zona Subandina presenta una estructura simple:

- Cabalgamientos responsables de varias repeticiones de la serie estratigráfica.
- Pliegues estrechos (unos 15 km de longitud de onda) cuyos ejes siguen la dirección N-S y que representan un importante control estructural de la topografía y la red de drenaje.
- La edad de los materiales presentes es Carbonífera, Triásica, Cretácica y Terciaria.
- El acortamiento calculado por Baby et al. (1989) es del 38% (unos 90 km).

La Cordillera Oriental presenta las siguientes características:

- No existe la misma estrecha relación entre estructura y topografía.
- Los materiales presentes son Ordovícicos, Silúricos y Devónicos.

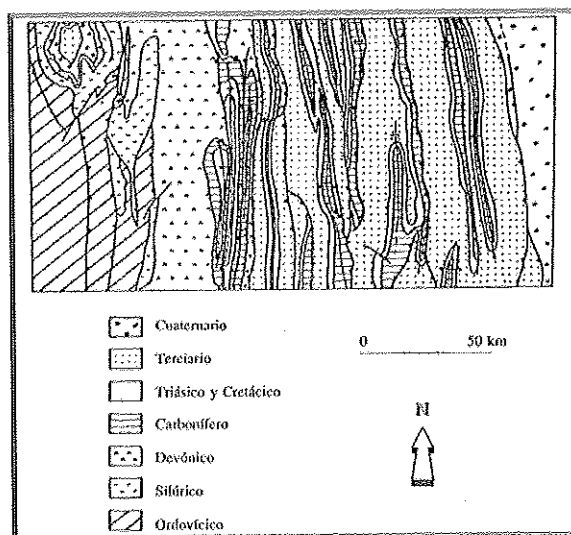


Figura 2.- Mapa geológico del área de estudio. (Mapa de YPFB, 1978, modificado). Ch: Charagua. C: Camiri. M: Monteagudo.

A partir de combinaciones en falso color de los canales originales y de los pseudocanales correspondientes a la zona C (la más occidental) ha sido posible realizar una cartografía estructural que pone de relieve contactos litológicos y diversas estructuras tectónicas. Se han utilizado además de las imágenes digitales copias cartográficas de escenas TM completas a escalas 1:250.000 (proporcionadas por el Jet Propulsion Laboratory) de la combinación en falso color TM5, TM4, TM2. Así mismo se obtuvieron ampliaciones a escala 1:250.000 de la cartografía geológica preexistente (Figura 2) (Mapa Geológico de Bolivia E. 1:1.000.000, 1978) y de la cartografía estructural de Sempere et al. (1988) a fin de superponer esta información a la obtenida a partir de las imágenes de satélite y localizar sobre éstas las estructuras principales.

Por último, se ha construido una columna estratigráfica realizando una síntesis de la información publicada hasta el momento, con estimación de las potencias correspondientes a cada formación así como de aspectos tales como coloración, textura, resistencia, etc, gracias a los cuales ha sido factible identificar sobre las imágenes dichas formaciones.

El remuestreo de los canales TM y la posterior corrección geométrica del canal SPOT ha permitido hacer combinaciones en falso color de imágenes de estos dos sensores que han resultado de gran utilidad en los siguientes aspectos:

- Preservación de la resolución espacial de las imágenes

SPOT sin perder la resolución espectral de las TM.

- Visualización de los rasgos topográficos de zonas que en las imágenes TM quedaban cubiertas por nubes, lo que ha sido de gran utilidad en la cartografía estructural realizada, ya que en esta área la morfología del terreno va íntimamente relacionada a las estructuras de plegamiento y cabalgamiento.
- Ha permitido observar la dinámica de los cursos fluviales, en la zona oriental, donde los lechos de los ríos son muy amplios, el cauce presenta cambios de localización importantes en las imágenes TM y SPOT, separadas por un período de 5 años (las imágenes TM fueron captadas en 1985 y las SPOT en 1990).
- Así mismo, ha sido posible observar el acusado desarrollo de ciertas poblaciones situadas en la zona oriental, cercanas a campos petrolíferos: carreteras, brechas de exploración, aeropuertos, núcleos urbanos, que indican claramente la importancia de la expansión experimentada a raíz de la explotación de estos campos.
- Se ha puesto de relieve la dificultad de la corrección geométrica de las imágenes SPOT en zonas de grandes contrastes topográficos, debido a las distorsiones provocadas por el efecto del relieve.

Ha resultado de gran utilidad en el análisis estructural realizado la utilización de pares SPOT estereoscópicos, a partir de los cuales se puede (utilizando técnicas de fotogrametría) calcular buzamientos reales. La utilización de pares SPOT con este fin constituye una técnica experimental que se ha implementado por primera vez en INSTOC dentro del marco de este estudio, habiendo resultado ser de importancia vital para la comprensión de la estructura regional del Subandino Boliviano.

Para la denominada zona C se ha realizado una cartografía estructural detallada a escala 1:250.000 que pone de relieve una dirección estructural N-S, a la cual son paralelos los ejes de los anticlinales y sinclinales estrechos (de unos 15 Km de diámetro) y los frentes de cabalgamiento que producen varias repeticiones de la serie sedimentaria, con un acortamiento estimado por Baby et al. (1989) en un 38% (90 Km). Así mismo se ha conseguido localizar sobre las imágenes las principales estructuras tectónicas (Cabalgamiento Andino Principal, Cabalgamiento Frontal Principal, Frente de Deformación Andina, y los principales anticlinales y sinclinales), lo cual ha permitido comprender mejor las características regionales estructurales de este área.

Tal como se ha apuntado antes, la estructura denominada Cabalgamiento Andino Principal separa dos áreas de litologías y rasgos geomorfológicos bien diferenciados. No ocurre así con el Cabalgamiento Andino Principal. Este, según las cartografías estructurales existentes, pone en contacto materiales Silúricos y Ordovícicos perfectamente diferenciables en las combinaciones de las tres primeras componentes resultantes del análisis de Componentes Principales realizado. Al observar detenidamente diversas combinaciones de canales originales TM se hizo patente que la estructura que ponía en contacto dichos materiales buzaba hacia el E. Del estudio del anaglifo SPOT correspondiente se dedujo el buzamiento de

la misma, alrededor de los 40° E. De todo ello se infiere que la estructura identificada sobre las imágenes y que coincide especialmente con la estructura denominada Cabalgamiento Andino Principal es una fractura normal.

La información que se derivó del estudio de las imágenes TM y SPOT así como datos de campo y bibliográficos se sintetizaron e integraron utilizando las posibilidades del sistema de información geográfica ARC/INFO. El resultado final ha sido un diagrama tridimensional en el que se representan las tres zonas de estudio (A, B y C) y que integran información estructural, estratigráfica, geología del subsuelo (inferida a partir de cortes compensados), red de drenaje y un modelo digital de terreno. La resolución de este MDT obtenido a partir de la digitalización de mapas topográficos 1.250.000 es de 1 Km.

En este bloque diagrama (Figura 3) se ha delineado con precisión la situación de la estructura que separa la Zona Subandina de la Cordillera Oriental (el Cabalgamiento Frontal Principal). Se trata posiblemente de una estructura de escala cortical.

Al W del Cabalgamiento Frontal Principal la Cordillera Oriental se ha desplazado en bloque, solidariamente con una losa de Precámbrico empujando a su avance materiales de la zona Subandina y produciendo su plegamiento.

Por otra parte, tras la recopilación de todos los cortes compensados publicados correspondientes a la Cordillera Oriental y Zona Subandina de Bolivia, se procedió a su restitución y al cálculo de la erosión implicada en cada corte. De este estudio se deduce que, si bien la Zona Subandina ha sido más activa tectónicamente que la Cordillera Oriental, es en esta donde la importancia de la erosión ha sido mayor.

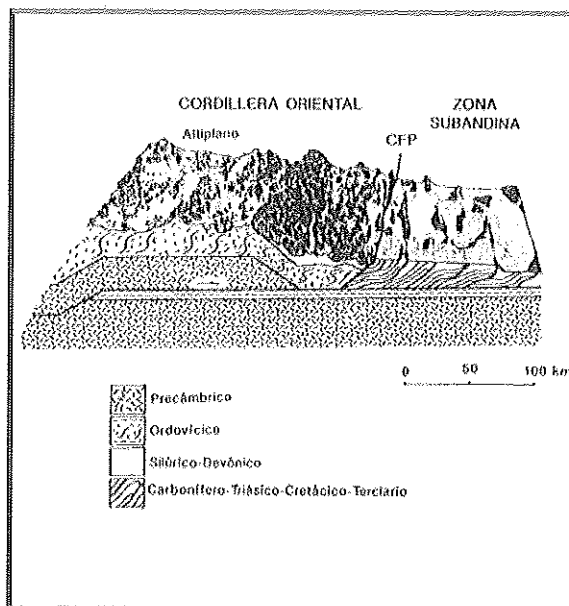


Figura 3.- Representación de la síntesis de información realizada.

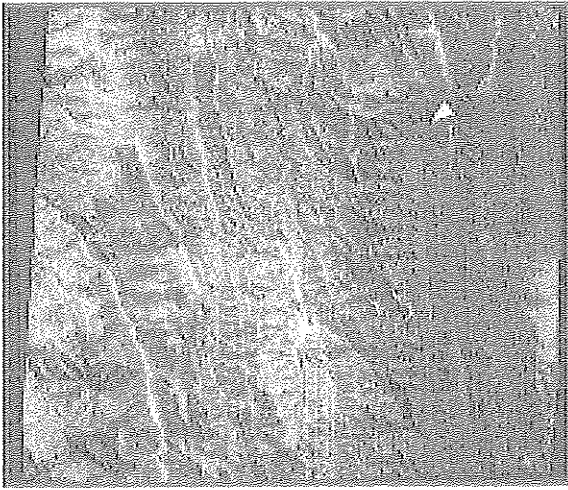


Imagen 1.- Representación del anaglifo SPOT correspondiente a la zona C (60 x 60 Km). Se ha señalado con una flecha la situación del Cabalgamiento Frontal Principal. Véase Anexo de color.

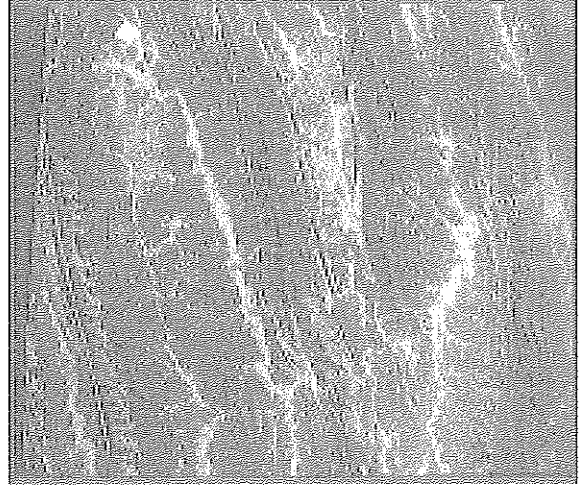


Imagen 2.- Representación del anaglifo SPOT correspondiente a la zona B (60 x 60 Km). Se ha señalado la situación de la ciudad de Monteagudo, en las cercanías de una terminación periclineal. Véase Anexo de color.

#### 4. AGRADECIMIENTOS.

Gracias a todo el personal del INSTOC por su apoyo técnico y en especial al Profesor Byran L. Isacks, Dr. Eric J. Fielding, Tim Gubbels y Guillermo Re Kühl por su ayuda y

su amistad. Este trabajo fue realizado gracias a una Beca para Doctores y Tecnólogos del Ministerio de Educación y Ciencia, y se realizó dentro del marco del proyecto EOS (Earth Observing System) - NASA.

#### 8. BIBLIOGRAFIA

- ✓ BABY, P. et al. (1989): Structure de la Zone Subandine de Bolivie: influence de la geometrie des series sedimentaires anteoroginiques sur la propagation des chevauchements. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 309: 1717-1722.
- ✓ CHAVEZ, P.S. (1988): An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 254 459-480.
- ✓ ISACKS, B. (1988): Uplift of the Central Andean Plateau and Bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, vol. 93: 3211-3231.
- ✓ QUEVEDO VELASCO, J. (1977): Geología de los yacimientos de hidrocarburos en Bolivia. *Revista Técnica YPFB*, VI, 47-121.
- ✓ SEMPERE, T. et al. (1988): Los aspectos estructurales y sedimentarios del orocline boliviano. En *V Congreso Geológico Chileno*, pp A127-A142. Soc. Geol. Chilena. Santiago de Chile.
- ✓ YPFB, Servicio Geológico de Bolivia. (1978): *Mapa Geológico de Bolivia a escala 1:1.000.000 y memoria explicativa*. YPFB (eds). La Paz.