



Modelo estructural al norte de la Sabana de Bogotá mediante la integración de información geológica, magnetométrica y de teledetección

GERMAN ALFONSO REYES-TORRES
INGEOMINAS, Bogotá
E-mail: greyes@ingeoimin.gov.co

REYES-TORRES, G. (2004): Modelo estructural al norte de la Sabana de Bogotá mediante la integración de información geológica, magnetométrica y de teledetección.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 29, pp. 3-9, 8 Figs., Bogotá.

RESUMEN

Se presenta en este trabajo una fusión de Imágenes de satélite Landsat, Magnetometría, Espectrometría de Rayos Gamma y Geología de superficie, en un ambiente SIG, orientada a definir el estilo estructural de un área al norte de la sabana de Bogotá. La espectrometría de rayos Gamma mostró una correspondencia con las texturas y tonalidades observadas en la imagen de satélite, pudiéndose patronar, para las unidades litoestratigráficas aflorantes en el área la concentración promedio de Uranio, Torio y Potasio. La fusión de la imagen Landsat con la magnetometría y el modelamiento de un perfil en el sector norte del área, determinó un esquema estructural con un bloque levantado en la parte central, limitado por las fallas inversas de Cucunubá y Chocontá, con vergencias al noroccidente y sureste respectivamente y dos bloques sinclinales hundidos al noroccidente y sureste. Con la cartografía geológica se verificó la interpretación de la imagen de satélite y con el modelamiento y la fusión con la magnetometría se definió, para el área una estructura "Pop Up", delimitada entre las fallas de Cucunubá (occidente) y Chocontá (oriente), volcada sobre los sinclinales de Checua y Sisga.

Palabras clave: información geológica; información magnetométrica; modelo estructural; Sabana de Bogotá; teledetección.

ABSTRACT

A fusion of Landsat images, Magnetometry, Gamma Ray Spectrometry and surface geology, in a GIS environment, was oriented to define a structural style of an area located north of Sabana de Bogotá. Gamma ray spectrometry let to see the textures and tonalities correspondence observed in the satellite image, and by this means it was possible to make a pattern for the Uranium, Thorium and Potassium concentration average in the outcropping lithostratigraphic units in surface. Fusion of Landsat image with the magnetometry and the modeling of a profile in the northern portion of the study area, determined a structural scheme for the distribution of rocks wherein a raised block in the central part, limited by the Cucunubá and Chocontá inverse faults was observed, toward northwest and southeast respectively and two sunk syncline blocks toward northwest and southeast. After geological mapping, the interpretation of the satellite image was verified, and with the modeling and the fusion with the magnetometry, a Pop Up structure was defined for the area, delimited between the Cucunubá (West) and Chocontá (East) faults, overturned on the Checua and Sisga sinclines.

Key words: geological information; magnetometric information; Sabana de Bogotá; structural model; ; teledetection.

INTRODUCCIÓN

La Sabana de Bogotá (SB), hace parte del Altiplano Cundiboyacense, situado en la zona axial de la Cordillera Oriental; se extiende desde el sur de la ciudad de Bogotá, hasta el norte de la ciudad de Villapinzón. El área de trabajo

está localizada en la parte norte de la SB y comprende un área aproximada de 500 Km² (Fig. 1).

Para la Cordillera Oriental, involucrando el área de estudio, varios autores han postulado modelos de evolución y estilos estructurales apoyados en información geofísica y estructural, que en términos generales plantean

una cuenca sedimentaria pre-Albiano y una inversión tectónica a partir del Cretácico superior aprovechando en algunos casos fallas distensivas reactivadas como inversas; entre otros trabajos se menciona a Cooper et al. (1995), Colletta et al. (1990), Dengo & Covey (1993), Villamil (1999), Rowan & Linares (2000), Sarmiento (2002), Acosta (2002), Branquet et al. (2002). Estos trabajos, sin embargo, al apoyarse en cartografía antigua, no tuvieron en cuenta fallas que se describen en este trabajo y que contribuyen al conocimiento geológico de la Sabana de Bogotá y de la Cordillera Oriental (Fig. 2).

En la presente investigación, cuyo objeto es realizar un análisis estructural, a partir de la integración de imágenes de campo de satélite Landsat TM, información geológica e información magnetométrica, se realizó una actualización cartográfica y se hizo una interpretación geológico-estructural de imágenes de satélite y un estudio de magnetometría y radiometría, con los que se determinó el modelo estructural del área.

En la zona de estudio afloran las unidades de la parte central de la Cordillera Oriental. Se utilizará para las unidades litoestratigráficas del Cretácico Superior, la siguiente nomenclatura: Formación Conejo (lodolitas), de edad Coniaciano-Santoniano; Unidad Liditica (equivalente por posición estratigráfica a Lidita Superior del Grupo Olini) del Campaniano. Formación Plaeners (liditas y lodolitas), de edad Campaniano, y las Formaciones Arenisca Labor y Tierna (areniscas), de edad Maastrichtiano. Para las unidades litoestratigráficas paleógenas y neógenas, la nomenclatura adoptada ha sido ampliamente utilizada en la Sabana de Bogotá y alrededores. Estas formaciones son: Guaduas (arcillolitas con carbones), Cacho (areniscas conglomeráticas), Bogotá (arcillolitas), Regadera (areniscas) y Tiltá (arenas y gravas). Para el Cuaternario se usan denominaciones que tienen que ver con el tipo de depósito (Montoya & Reyes 2003).

GEOLOGIA ESTRUCTURAL

El área está localizada en la zona axial de la Cordillera Oriental, con fallas de cabalgamiento de vergencias que se alternan al occidente y al oriente. Algunas fallas presentan segmentos con movimiento transcurrente, como es el caso de la Falla de Suesca.

La conformación estructural del área de estudio está dada por fallas inversas de cabalgamiento, generalmente sinuosas, que afectan a los flancos de los anticlinales (Fig. 2), los que a menudo tienen inversión de estratos. Los sinclinales, tienen una mayor amplitud y menor deformación que los anticlinales. El rumbo regional estructural es N45°-50°E. Las fallas más importantes son las de Cucunubá, Suesca y Chocontá (Fig. 3).

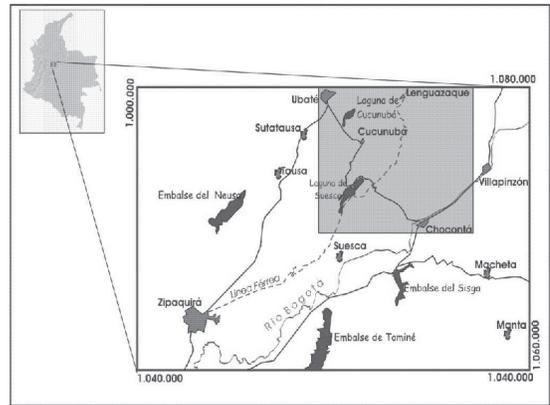


Fig. 1. Localización del área de estudio

Falla de Cucunubá

Está localizada en la parte occidental del área. Su rumbo regional es N40°E, pero localmente varía entre N25–60°E, denotando una alta sinuosidad, lo que la caracteriza como una falla de cabalgamiento con vergencia al noroccidente. Esta falla, en la mayor parte de su trazo, coloca en contacto fallado la parte superior de la Formación Arenisca Tierna con la parte media de la Formación Guaduas y al sur de Lenguazáque, la Formación Plaeners con la Formación Cacho.

Falla de Suesca

Esta falla está localizada en la parte media del área. Presenta variaciones en su dirección, pasando de N20°E en el sector sur, a N50°E al norte en la vereda Tibita de Villapinzón. Su comportamiento principal es el de una falla inversa con vergencia al noroccidente y coloca en contacto rocas de la parte media y superior de la Formación Labor-Tierna con la parte media de la Formación Guaduas; pero donde la dirección cambia hacia el noreste tiene movimiento transcurrente dextral y genera cuencas de tracción en donde se depositaron sedimentos cuaternarios fluvio-glaciares a lo largo de la Falla (Fig. 4).

Falla de Chocontá

Se extiende a lo largo del área desde Chocontá (al sur) hasta Villapinzón (al norte). Esta falla es inversa, presenta una dirección N45°E con vergencia al oriente, en donde cabalgan las Formaciones Lidita Superior, Plaeners y Labor-Tierna, sobre la Formación Guaduas, y genera inversiones en los estratos, en los dos bloques.

Aunque en este estudio no se determinó, la cartografía regional sugiere que la Falla de Chocontá podría corresponder con una de las Fallas que se desprende

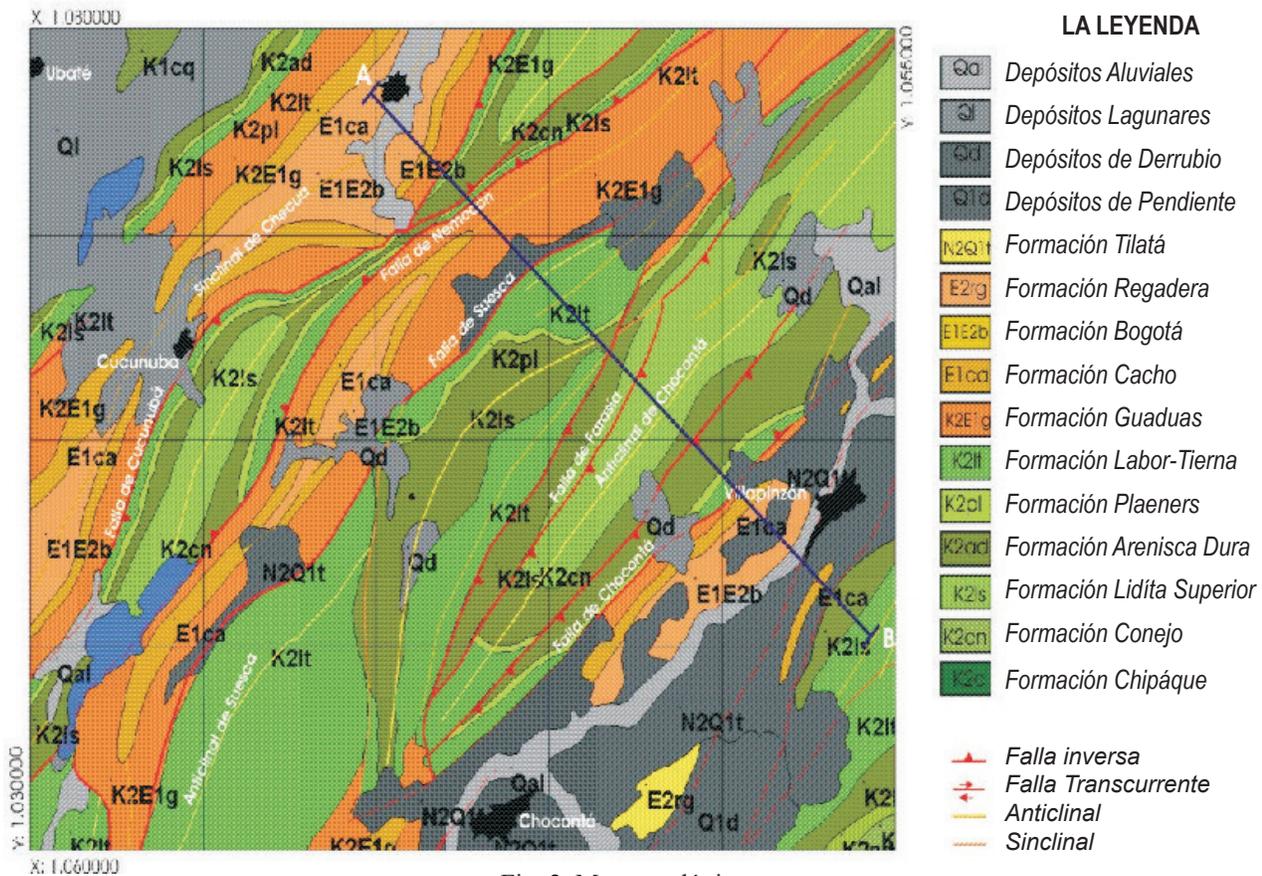


Fig. 2. Mapa geológico

del Sistema de Falla de Bucaramanga (Falla de Boyacá) consideradas fallas antiguas normales durante la fase "sinrift" del Jurásico-Cretácico inferior y reactivadas por inversión tectónica (Acosta 2002; Branquet et al. 2002) durante el Mioceno.

Otras estructuras

Dentro del área se identificaron fallas de cabalgamiento importantes como las de Nemocón y Farasia, que son retrocabalgamientos de las fallas de Cucunubá y Chocontá, respectivamente.

Pliegues anticlinales como Guachaneca, Suesca y Chocontá son estructuras asociadas a los cabalgamientos principales y a los sinclinales de Checua, Teusacá-Suesca y Sisga, menos deformados.

MAGNETOMETRÍA

La magnetometría mide el campo magnético terrestre, el cual consta de dos componentes: uno conocido como campo geomagnético principal, de periodo largo o secular y el otro de periodo corto determinado por actividad externa como la actividad solar. En la determinación

del comportamiento del campo geomagnético principal se utilizó un modelo teórico conocido como Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) (Quintero 1998).

Para el cumplimiento de los objetivos se diseñó un muestreo a lo largo de 3 líneas de aproximadamente 15 Km. de longitud transversales a las estructuras, con una separación entre líneas entre 5 y 7 Km. y un intervalo de muestreo de 50 m. Esta distribución permite detectar anomalías relacionadas a estructuras geológicas especialmente en zonas de falla, donde hay contrastes en la composición litológica o presencia de fluidos que contienen minerales magnéticos.

Mediciones de susceptibilidad magnética

Las mediciones realizadas permiten establecer las características magnéticas de las rocas superficiales y de esta manera ajustar las interpretaciones de los datos magnéticos y su relación con los materiales litológicos aflorantes. La mayor parte de las unidades litoestratigráficas muestran una baja susceptibilidad con valores inferiores a 1×10^{-5} , siendo la Formación Guaduas la que presenta valores mayores 2.1×10^{-4} . Fuera del área

de trabajo unidades como la Formación Churuvita y la Formación Simijaca presentan susceptibilidades de 3.9×10^{-5} y 1.2×10^{-5} respectivamente, debidas a costras de oxidación.

Las anomalías del campo magnético total y regional son muy parecidas, viéndose en las dos una tendencia a mostrar valores anómalos altos hacia el noroeste y disminuyendo progresivamente hacia el sureste (Fig. 4), indicando una posible profundización de la cuenca hacia el sureste, donde existe un espesor mayor de depósitos sedimentarios cuaternarios.

Al noroccidente la presencia de rocas paleógenas sugieren la presencia de un grueso espesor de secuencia sedimentaria; sin embargo, los valores de las anomalías magnéticas muestran valores elevados indicando un alto de basamento y en este caso la secuencia sedimentaria estaría incompleta o existirían cuerpos mineralizados con un comportamiento magnético importante.

ESPECTROMETRIA DE RAYOS GAMMA

La espectrometría de rayos Gamma detecta la concentración de los 3 elementos radioactivos Uranio (U), Thorio (Th) y Potasio (K). Este método ofrece datos de superficie, ya que solo penetra unas decenas de centímetros en la roca o suelo; de esta forma nos da información de la litología aflorante.

La Formación Conejo es la que presenta los valores más altos de concentración de K (1.7 %), U (5.3 Ueq.), Th (26.6 Ueq) y Total (25.2 Ueq); con concentraciones similares, está la Formación Lidita Superior, luego las Formaciones Plaeners y Guaduas. Es claro también que las que presentan menores valores son las unidades arenosas como Cacho, Regadera y Tilatá. Esta caracterización radiométrica nos ayuda a determinar cambios litológicos debidos a variaciones estratigráficas principalmente de arcillolitas a areniscas o a presencia de fallas, convirtiéndose en una herramienta importante para la cartografía geológica y para la determinación de las estructuras.

TELEDETECCION

La teledetección o percepción remota es la técnica que permite la adquisición de información de objetos, sin estar en contacto con ellos. La información se cñe a la medida de reflectancia electromagnética, que es la respuesta de un objeto a la interacción con la energía electromagnética proveniente del sol. El propósito fundamental del procesamiento digital de imágenes es dar herramientas para facilitar la identificación y extracción de información,

contenida en una imagen, para su interpretación (Crosta 1993). Dentro del procesamiento de las imágenes se realizaron combinaciones de bandas en falso color. Para la delimitación de unidades geológicas se determinaron como más adecuadas, por su riqueza textural, las combinaciones RVA: B4-B5-B7; B4-B5-B3 y B5-B4-B3.

INTEGRACION DE IMAGENES

La integración digital de datos de diferente naturaleza busca correlacionar espacialmente distintas variables para extraer información geológica, mediante el uso de tecnologías de computador. Esta combinación se convierte en una poderosa herramienta para la cartografía geológica pudiéndose discriminar tipos de roca, estructuras y procesos hidrotermales, en el caso de la gammaespectrometría (Días & Paradel1a 1997) y con la magnetometría, el poder relacionar la morfología de la superficie con cuerpos magnéticos en el subsuelo que permitan una aplicación en la exploración de recursos minerales.

En la integración de información, se utilizan las propiedades del color: Intensidad, Matiz y Saturación (IHS). Para la intensidad se toma una banda de la imagen de satélite Landsat; para el matiz los datos geofísicos (magnetometría y radiometría) y como saturación se toma un valor digital constante de 100.

En la Fig. 5, se puede observar que las variaciones de las anomalías magnéticas coinciden con el tren textural que la imagen presenta; por ende la orientación de las estructuras parece estar controlando la variación del campo magnético.

Al introducir los lineamientos que destacan mejor las anomalías del campo magnético regional, se aprecia que los cambios texturales en la imagen, coinciden con los trazos de las fallas de Cucunubá, Nemocón y Chocontá.

En la fusión con las anomalías magnéticas residuales, se observa una concordancia bastante alta entre las variaciones de las anomalías magnéticas y las variaciones texturales de la imagen Landsat (Fig. 6). Ésta concordancia es más alta en donde las variaciones texturales obedecen a fallas geológicas.

En la fusión de la imagen de satélite Landsat y la espectrometría de rayos Gamma, se encontró una coincidencia de altos radimétricos para los 3 elementos radioactivos K, U y Th (Fig. 7) en las unidades Conejo (K2cn) y Plaeners (K2pl) con composición principalmente arcillosa; mientras que para el potasio los valores bajos están en las formaciones Labor-Tierna (K2lt), Cacho (E1ca), Tilatá (N2Q1t) y en suelos arenosos. Para el Uranio y el Torio los valores bajos están en las formaciones Cacho (E1ca), Bogotá (E1b) y Tilatá (N2Q1t).

MODELAMIENTO MAGNETOMETRICO

Para el modelamiento se agruparon unidades con susceptibilidades magnéticas similares: Ki-s (Formaciones Conejo más antiguas) y Basamento) Ks (Formaciones Labor-Tierna, Plaeners y Lidita Superior), Pg (Formación Guaduas), Ng (Formaciones Regadera, Bogotá y Cacho), Q (Formación Tilatá y depósitos cuaternarios), se trabajó un modelo más simple que el presentado en el corte geológico, respondiendo a un concepto de economía de hipótesis (Reeves et al, 1990).

La solución obtenida nos permite observar la presencia de una antiforma en la parte central, formando una estructura Pop Up (Mc Clay, 1992) y dos sinformas hacia los extremos, separados entre si por las fallas de Cucunubá (al occidente) y Chocontá (al oriente) (Fig 7). Este modelo es concordante con las descripciones de las fallas y su importancia dentro de la conformación estructural actual del área.

De esta manera la Formación Guaduas (Ng, en la Fig. 7), que es la que tiene la mayor susceptibilidad magnética, es también la que aflora donde los valores del campo magnético total y regional son más altos, mientras que las unidades cretácicas, con valores bajos de susceptibilidad, no tienen mayor influencia en las variaciones del campo magnético. Igualmente, no parece tener influencia la presencia de fallas geológicas cuando repiten secuencia de la misma litología, como es el caso de la parte central del perfil, donde no hay cambios importantes a pesar de que en el mapa geológico se aprecian varias fallas afectando a las formaciones Conejo, Lidita Superior, Plaeners y Labor Tierna, con susceptibilidades parecidas.

ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente trabajo se ha podido demostrar la buena integración entre estos tipos de información y cómo con una correcta interpretación se logran resultados de interés para el conocimiento de la evolución geológica del altiplano y como con una correcta interpretación se logran resultados de interés para el conocimiento de la evolución geológica del altiplano y de la Sabana de Bogotá. Aunque la composición litológica de las unidades del área de estudio, por ser sedimentaria y de ambientes similares, no ofrece contrastes fuertes ni magnéticos, ni en la concentración de elementos radioactivos, Se pudo observar que las pequeñas variaciones medidas, permiten obtener unos resultados suficientes para plantear una metodología de trabajo, que sin duda dará excelentes resultados en zonas donde existan mineralizaciones o diferencias litológicas en las que las propiedades físicas y químicas sean más contrastantes.

Dentro de esta metodología se vio que la técnica de discriminación de las propiedades del color IHS (intensidad, matiz y Saturación), es muy útil, ya que conserva las características tanto de la imagen Landsat como de la imagen de geofísica, y las integra en una sola, dando al interprete la clara noción de los dos tipos de información involucradas (imagen de Satélite y Geofísica).

En la fusión de la imagen Landsat TM y la imagen del campo magnético regional, se encontró una correspondencia entre los cambios texturales generados por las litologías y mostrados por la imagen Landsat y los mayores contrastes en el campo magnético, que coinciden con el trazo de las fallas de Cucunubá y Chocontá, las cuales colocan en contacto las formaciones Labor-Tierna y Plaeners (baja susceptibilidad) con la Formación Guaduas (mayor susceptibilidad).

Cuando se fusiona la imagen Landsat con la imagen de campo magnético residual, se genera una buena correlación, coincidiendo muy bien los trazos de lineamientos magnéticos residuales, con los rasgos texturales y lineamientos observados en la imagen y con las fallas cartografiadas. Lo anterior hace pensar que los contrastes magnéticos generados por las fallas de cabalgamiento son someros y están determinados por cambios litológicos bruscos o por concentración de elementos magnéticos concentrados dentro de fluidos contenidos en las zonas fracturadas por las fallas.

La concentración de elementos radioactivos (U, Th y K), se constituye en una característica de las unidades litoestratigráficas, que al ser integrada a la imagen de satélite, aporta en la delimitación cartográfica de estas unidades. En el trabajo cartográfico de campo se pudo corroborar, cómo las variaciones en la concentración de elementos y la variación textural y tonal en la imagen de satélite, coincidían con los cambios en la unidad litológica.

La interpretación de las imágenes de satélite y la cartografía geológica presentan el área de trabajo como un cinturón plegado y fallado, con una dirección preferencial de las estructuras N45°E. Las fallas son de cabalgamiento, con vergencias encontradas (NW y SE) y limitan las estructuras anticlinales.

El modelamiento magnetométrico destaca como las fallas principales, la de Cucunubá (inversa con vergencia al noroeste) y Chocontá (inversa con vergencia al sureste), configuran un bloque levantado en la parte central ("pop up structure") y bloques deprimidos a los bordes. Estas dos fallas establecen para el área una tectónica de piel gruesa, en tanto que las otras fallas catalogadas como de cabalgamiento, indican una tectónica de piel delgada.

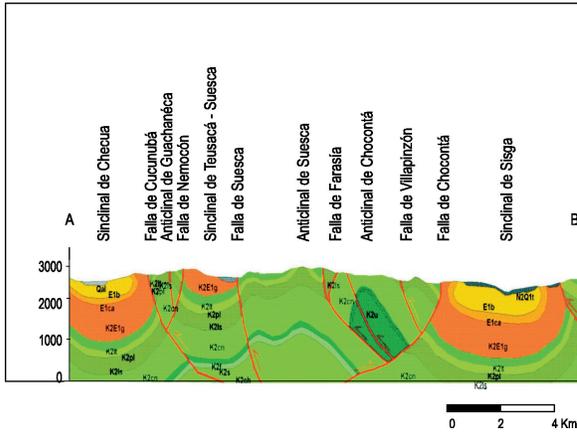


Fig. 3. Corte geológico NW-SE (A-B)

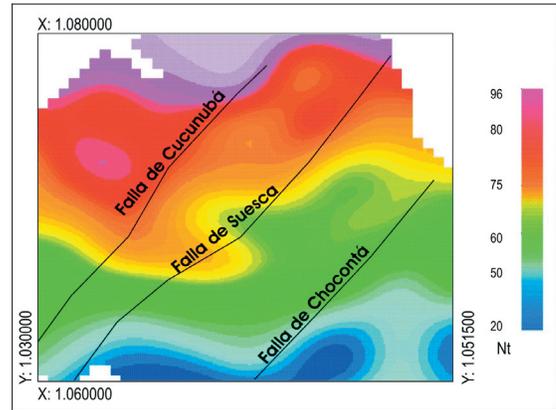


Fig. 4. Mapa de anomalía del campo magnético regional

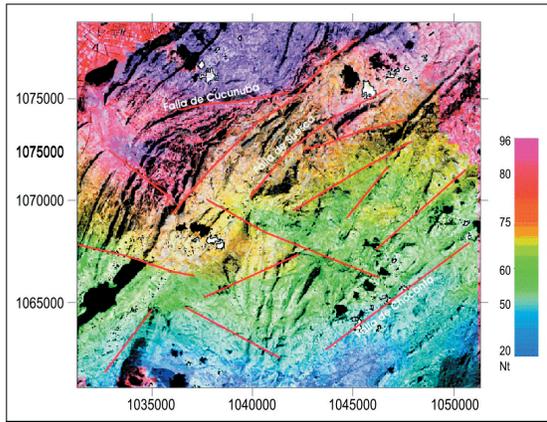


Fig. 5. Fusión de imagen de satélite y anomalías magnéticas

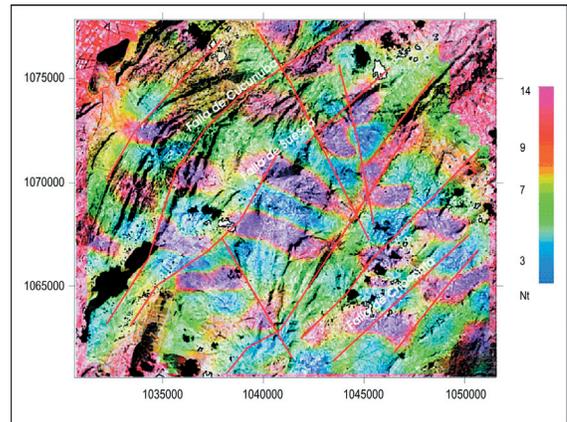


Fig. 6. Fusión de imagen de satélite y anomalía de campo magnético residual



Fig. 7. Fusión de concentración total, imagen de satélite y contactos geológicos.

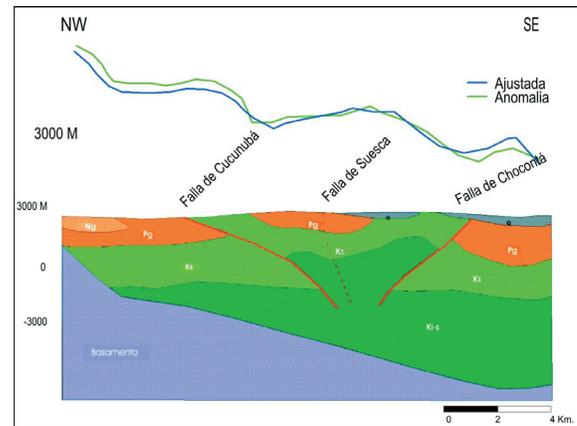


Fig. 8. Modelo de magnetometría.

REFERENCIAS

- ACOSTA, J. (2002): Structure, Tectonics and 3D Models of the western foothills of the Eastern Cordillera and Middle Magdalena valley, Colombia (Tesis de Doctorado).- Imperial College of Science Technology and Medicine, London.
- BRANQUET, Y.; CHEILLETZ, A.; COBBOLD, P.; LAUMONIER, B. & GIULIANI, G. (2002): Andean deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guateque-Medina area), Colombia.- *Journal of South American Earth Sciences*, Bol. 15: 391-407.
- COLLETTA, B.; HEBRARD, F.; LETOUZEY, J.; WERNER, P. & RUDKIEWICZ, J. (1990): Tectonic Style and Crystal Structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from a balanced cross-section.- J. Letousey, Ed., *Petroleum and Tectonics in Mobile Belts*, pp. 81-100, Paris.
- COOPER, M.; ADDISON, F.; ALVAREZ, R.; CORAL, M.; GRAHAM, R.; HAYWARD, A.; HOWE, S.; MARTINEZ, J.; NAAR, J.; PEÑAS, R.; PULHAM, A. & TABORDA, A. (1995): Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia.- *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, V. 79, No 10.
- CROSTA, A. (1993): *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*.- IG/UNICAMP, Campinas, Brasil.
- DENGO, C. & COVEY, M. (1993): Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implications for Traps and Regional Tectonics.- *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 77, pp. 1315-1337.
- DIAS, R. & PARADELLA, W. (1997): Integração de Dados Aéreos Gamaespectrométricos com Imagens TM-Landsat no Mapeamento Geológico da Área do Pojuca, Provincia Mineral de Carajás.- *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 15, No. 1.
- Mc CLAY, K. (1992): *Glossary of Thrust Tectonics Terms*.- University of London, Egham, Surrey, England.
- MONTOYA, D. & REYES, G. (2003): Geología de la plancha 209 Zipaquirá.- En preparación. INGEOMINAS, Bogotá.
- QUINTERO, W. (1998): Interpretación de la Estructura Cortical de los Andes Colombianos a partir de las Redes Magnética y Gravimétrica (Tesis de grado), UNAM, México
- REEVES, C.; ZEIL, P.; & YUNXUAN, Z. (1990): Interpretation of airborne geophysical surveys.- *ITC Journal*, 1990-2
- ROWAN, M. & LINARES, R. (2000): Fold-Evolution Matrices and Axial-Surface Analysis of Fault-Bend Folds: Application to the Medina Anticline, Eastern Cordillera, Colombia.- *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. 84, 6.
- SARMIENTO, L. F. (2002): Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. (Tesis de Doctorado); Vrije Universiteit, Amsterdam.
- VILLAMIL, T. (1999): Campanian-Miocene Tectonostratigraphy, Depocenter Evolution and Basin Development of Colombia and Western Venezuela.- *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 153, p. 239-275.
- Manuscrito recibido, Septiembre 2003; aceptado, Febrero 2004.

