

GEOLOGIA ESTRUCTURAL DE LAS REGIONES SUB-ANDINA Y PIEDEMONTE ENTRE LOS 18 Y 22°30'S, BOLIVIA. UN NUEVO MODELO DE DEFORMACION.

Raúl Giraudo, Rodrigo Limachi, Edgar Requena, Hugo Guerra

Andina S.A.

ABSTRACT

The Southern Sub-Andean zone of Bolivia is a thin-skinned fold-and-thrust belt, generally in-sequence system. Regional balanced cross-sections were prepared by integrating both surface and sub-surface geological data, supported by satellite imagery and regional seismic lines. Restoration of cross-sections indicates about 100 km (55 %) of shortening.

As a result of this analysis, a new structural model was developed. Main detachment levels are located in the Silurian Kirusillas Formation and in the Devonian Los Monos Formation.

Two deformational mechanisms related to the Los Monos behavior were identified. In the Eastern Foothills and Chaco Plain, faults from the basal Kirusillas detachment, ramping up through the entire section, predominate. A more complicated style develops in the Sub-Andean belt and Western Foothills. Duplex stacking between both lower and upper detachments, occurs in the lower section. Shortening is accommodated as a double triangle zone, with blind points located both at the base and top of the Los Monos Formation; as a result, passive-roof duplexes develop within the Devonian shales. This stacking acts, in its turn, as a wedge for the overlying layers, causing them to accommodate to its random shape. South of 19°S, close to the Andean zone, out-of-sequence thrusting originates in response to younger structures arising to the foreland. North of 19°S, this mechanism migrates forward because new structural trends develop to the East.

Around 18°S minor strike-slip deformation is evidenced by joint sets scarring competent rocks.

INTRODUCCION

La región Sub-Andina de Bolivia es parte de la faja plegada y fallada de antepaís que, con rumbo NW-SE, comienza en el Norte de Perú y se extiende hasta el Norte Argentino (Sheffels, 1990; Moretti et al, 1994; Roeder et al, 1995). A la latitud de Santa Cruz, cambia su rumbo aproximadamente a N-S y lo mantiene a lo largo de toda la zona de estudio (Figura 1).

El objetivo de este trabajo es lograr, mediante el análisis de toda la información disponible y la confección de cortes estructurales balanceables, un modelo que explique de forma coherente la geología estructural del Sub-Andino y Piedemonte al Sur de los 18° latitud Sur, enfocado a la exploración de petróleo y gas a corto plazo. Los cortes fueron restituidos con el programa Geosec; el balanceo se realizó por el método de igualdad de longitudes estratales para los horizontes ubicados por encima y por debajo de la Formación Los Monos la cual fue considerada, a los fines prácticos de la restitución, como plástica y por ende, balanceada por área.

La exploración de hidrocarburos en el área comienza en el año 1909. El primer descubrimiento comercial fue hecho en el pozo Bermejo x-2, perforado en 1924. A partir de entonces, más de 65 campos de petróleo, condensado y gas fueron descubiertos. Según Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB), la empresa estatal de hidrocarburos, las reservas totales estimadas para esta región ascienden a 9.3 TCF de gas y 210 MMB de petróleo.

Los campos tienen control estructural, con trampas ubicadas en anticlinales apretados, elongados, cuasi-simétricos.

Los reservorios se encuentran principalmente en rocas del Paleozoico (Devónico, Carbonífero y Pérmico) y en menor escala, en el Mesozoico (Jurásico).

La columna sedimentaria casi completa, abarcando desde sedimentos Precámbricos hasta Terciarios, está expuesta en el sector Sub-Andino del Sur de Bolivia (Dunn et al, 1995).

Cuatro ciclos tecto-sedimentarios fueron identificados en el área: Tacsariano, Cordillerano, Sub-Andino y Andino (Lohmann, 1970). Otros autores, identifican a su vez seis supersecuencias en el mismo intervalo de tiempo: Tacsariana, Cordillerana, Villamontes, Cuevo, Tacurú y Puca (Moretti et al, 1994) (Figura 2). En el presente trabajo se utilizan los ciclos de Lohmann, los cuales fueron renombrados de acuerdo al intervalo en el que se desarrollaron para evitar que los ciclos Sub-Andino y Andino fueran confundidos con ciclos originados por la orogenia Andina. Quedarían así los siguientes ciclos tecto-sedimentarios:

Ciclo Cámbrico -Ordovícico: Está conformado por sedimentos marinos depositados en un contexto extensional que progresivamente evoluciona a una cuenca compresiva de antepaís. Puede alcanzar un espesor de hasta 5 km y sus rocas afloran en la Cordillera Oriental y en el Sub-Andino Central (Moretti et al, 1994).

Ciclo Ordovícico - Devónico: Este ciclo comienza con depósitos clásticos gruesos de ambiente glacio-marino (Formación Cancañiri), en respuesta a una rápida profundización de la cuenca (Crowell et al, 1981). Esta formación actúa como una viga rígida sobre la cual, aprovechando las pelitas de Kirusillas, se propaga el despegue basal (Dunn et al, 1995).

Luego, cuatro secuencias siliciclásticas de ambiente marino marginal a deltaico son depositadas siempre en un contexto de cuenca de antepaís (Isaacson and Sablock, 1987; Montemurro, 1994; Fernández Seveso et al, 1997). Este es el ciclo más importante, no solo desde el punto de vista estructural, ya que aquí se encuentran los principales niveles de despegue, sino desde el punto de vista económico ya que varios de los reservorios y rocas generadoras más importantes se ubican en este intervalo.

Ciclo Carbonífero - Pérmico: El intervalo Carbonífero de este ciclo se caracteriza por la extensa erosión, canalización, rápidos cambios laterales de facies y depósitos glacio-marinos y glacio-continentales (Helwig, 1972). Arenas masivas bien desarrolladas (Formaciones Tupambi, Tarija, Chorro y Escarpment) alternan con diamictitas (Formaciones Itacuami, Tarija, Taiguati y San Telmo).

Este ciclo termina con la sucesión Pérmica de las Formaciones Cangapi, Vitiacua e Ipaguezu. Las limpias arenas eólicas de Cangapi suprayacen a las pelitas Carboníferas de San Telmo. Las calizas transgresivas de la Formación Vitiacua y las evaporitas basales de la Formación Ipaguezu marcan el fin de este ciclo. El espesor total de esta secuencia es de 2-2.5 km (Dunn et al, 1995).

Ciclo Triásico - Paleoceno: Una extensión generalizada, relacionada con la apertura del Atlántico Sur y la separación de Sudamérica de África, tiene lugar a partir del Triásico y se extiende hasta que comienza la compresión causada por la orogenia Andina en el Oligoceno. Facies eólicas y fluvio-eólicas son depositadas en este ciclo (Formaciones Tapehua, Castellón, Ichoa, Cajones; esta última formación desaparece al Sur de Santa Cruz).

Depósitos Sinorogénicos Terciarios: El desarrollo de la cuenca de antepaís Neógena comienza en el Oligoceno Superior (27 Ma) debido al efecto de carga producido por el levantamiento de la Cordillera Oriental (Sempere, 1989).

Todas las formaciones son continentales con excepción de la Formación Yecua, que muestra influencia marina. Los depósitos sinorogénicos comienzan con la Formación Petaca, del Oligoceno al Mioceno (11 Ma) y continúan, sin mayores complicaciones, con las Formaciones Yecua y Tariquí.

En el Mioceno Superior-Plioceno Inferior, la actual zona Sub-Andina es afectada por esfuerzos compresivos cuando el frente de deformación migra hacia el Este desde el actual Altiplano (Gubbels et al, 1993). Dos discordancias regionales se registran en la base de las Formaciones Guandacay (6 Ma) y Emborozú (3.3 Ma). Estas discordancias son conocidas a lo largo de todo el Sub-Andino; sin embargo, quedan dudas acerca de la edad de estos eventos ya que, al ser facies continentales, es muy difícil datarlos y probar que son sincrónicos (Moretti et al, 1994).

La faja fallada y plegada del Sub-Andino al Sur de los 18° latitud Sur es interpretada como un sistema originado en secuencia normal de fallamiento (Dahlstrom, 1969, 1970; Hossak, 1979; Elliott, 1982; DePaor, 1988;) por una tectónica de cobertura, sin basamento involucrado (Roeder et al, 1988; Baby et al, 1995; Welsink et al, 1995; Dunn et al, 1995).

La superficie basal de despegue está inclinada unos 3° hacia el Oeste y se encuentra ubicada en la base de la Formación Kirusillas. La ubicación y profundidad de este nivel está controlada por líneas sísmicas en el Piedemonte.

Los esfuerzos compresivos que originaron el levantamiento de la Cordillera Oriental son transmitidos hacia el antepaís sólo por los niveles plásticos de la base de la Formación Kirusillas, distribuyéndose parcialmente en cada una de las estructuras generadas.

El comportamiento mecánico de la Formación Los Monos controla los modelos de deformación. En el Sub-Andino, la geometría de las fallas es plano-rampa, cortando secuencia arriba desde la superficie basal de despegue hasta la base de la Formación Los Monos, segundo nivel de despegue regional. Entre los dos niveles se generan estructuras duplex (Boyer et al, 1982; Suppe, 1983; Mitra et al, 1989; Liu et al, 1990; Mitra, 1990, 1992) involucrando reservorios fracturados en las crestas de los anticlinales. La Formación Los Monos no transmite el acortamiento hacia adelante sino que lo resuelve en una doble zona triangular (Jones, 1991; Medwedeff, 1992; Mc Klay, 1996) con puntos ciegos ubicados en la base y techo de esta formación (Figura 3) originando un apilamiento de techo pasivo (Banks et al, 1986). Fallas con vergencia al Este nacen del punto ciego superior generando estructuras cuyo eje anticlinal en superficie se encuentra algunas veces desplazado con respecto a la cresta en el subsuelo.

La figura 4 muestra que el acortamiento es resuelto en forma similar, dentro de la Formación Los Monos, según cortes realizados en el Sub-Andino del Norte Argentino (Belotti et al, 1995).

En el Piedemonte externo y Llanura Chaqueña, las fallas cortan en rampa desde la base de la Formación Kirusillas hasta la superficie. Esto genera estructuras que antes eran interpretadas como originadas por propagación de falla (Mitra, 1990, 1992); sin embargo, la geometría de los pliegues (bloques colgantes con amplias crestas de pendiente igual a la regional, falta de ante-inclinaciones de alto ángulo) responde a un mecanismo de flexión de falla.

A diferencia de modelos anteriores (Baby et al, 1995; Roeder et al, 1995), todas las estructuras, aún las más complicadas, son explicadas con este mecanismo de doble zona triangular.

En el sector Norte del área de estudio hay evidencias de una tectónica de desplazamiento lateral (Tchalenko, 1970; Wilcox et al, 1973; Sylvester et al, 1976; Biddle et al, 1985; Christie-Blick et al, 1985; Harding, 1990) sobreimpuesta al modelo de doble zona triangular. Las formaciones competentes se encuentran surcadas por diaclasas y fallas, agrupadas en juegos conjugados que son bisectados por la componente compresiva del elipsoide de esfuerzos (Thomas, 1974; Zolnai, 1988).

Como resultado de la integración de los datos de subsuelo y superficie, apoyados por líneas sísmicas e imágenes satelitales, se efectuaron una serie de cortes regionales balanceados (Figuras 5 y 6).

Corte San Alberto (Figura 7):

Seis lineamientos de rumbo NNE-SSW son intersectados por este corte regional. El control de subsuelo está dado por los pozos IÑG x-4 (Iñiguazu), SAL x-9 (San Alberto) y ASL x-2 (Agua Salada); los dos primeros producen de reservorios fracturados Siluro-Devónicos ubicados en la cresta del apilamiento de duplexes. La estructura de Castellón ha sido originada por mecanismo fuera de secuencia, el mismo que estructuró del lado argentino, la serranía del Pescado (ver Figura 4, corte Belotti, 1995). Esto fue recientemente comprobado por líneas sísmicas registradas por Andina S.A., en donde se aprecia, por debajo de la falla, la columna prácticamente indeformada. Si esta estructura hubiese sido generada por el mecanismo de doble zona triangular, se verían las formaciones por encima de Los Monos en una posición casi vertical. La última estructura hacia el antepaís, Agua Salada, fue originada por flexión de falla, generando un pliegue típico de este mecanismo.

Corte Caigua (ver Figura 7):

Dos lineamientos en el dominio Sub-Andino y otros cuatro en el Piedemonte son intersectados a esta latitud. La estructura de Caigua es la continuación meridional de la serranía de Aguaragüe. El pozo Caigua-11 produce de la Formación Huamampampa ubicada en la cresta del apilamiento de duplexes.

En el Piedemonte, las estructuras de La Vertiente, Villamontes y Ñupuco fueron también generadas como una doble zona triangular; el apilamiento no es tan notorio como en el Sub-Andino debido a que el acortamiento es mínimo. La figura 8 muestra una línea sísmica donde puede observarse estructuración en las Formaciones Huamampampa y Los Monos; esto, junto con la falla que corta secuencia arriba desde la base del Carbonífero, es la prueba que apoya el mecanismo de doble zona triangular aún en estructuras del Piedemonte. En la misma sección sísmica se pueden ver las tres secuencias del Terciario, separadas por dos discordancias regionales datadas 6 y 3.3 Ma. La Formación Tariquí (7.5-6 Ma), al no mostrar ninguna variación en el espesor, debe haber sido depositada antes de los eventos compresivos que afectaron la región. La Formación Guandacay (6-3.3 Ma) se apoya, discordancia mediante, en contacto angular sobre la Formación Tariquí y progresivamente cubre la estructura de La Vertiente (Moretti et al, 1994). Esto indica que la estructura creció (Hardy et al, 1996) durante el período de tiempo comprendido entre ambas discontinuidades. La segunda discordancia, ubicada en la base de la Formación Emborozú (3.3 Ma), erosiona las crestas de los anticlinales Villamontes y La Vertiente; asimismo, se observa reactivación de las fallas afectando ligeramente a la Formación Emborozú. La estructura de Ñupuco fue replegada por la falla de Mandeyapecua, quedando colgada a la espalda del bloque alto. Esta falla sufre un quiebre en el ángulo de corte, originando el lineamiento estructural Ibibobo-Igüitinti-Capirenda.

Corte Cuevo (ver Figura 7):

A esta latitud, las serranías de Aguaragüe y San Antonio pierden altura estructural y las fallas que las generaron transfieren sus rechazos (Dahlstrom, 1970) originando al Norte las serranías de Charagua, Caipipendi y Carohuaycho. La figura 9 muestra una sección sísmica paralela al corte estructural. Si bien las complicadas estructuras de Cuevo, San Antonio y Aguaragüe no son resueltas en su interior por el método sísmico, sí puede verse claramente como la columna sedimentaria por encima de la Formación Los Monos se adapta al apilamiento infrayacente.

El control de subsuelo está dado por los sondeos CVOW x-1 (Cuevo Oeste), CVO x-1 (Cuevo) (ambos terminaron dentro del apilamiento, en la formación Los Monos), BYB x-2 (Boyube), MTG x-1 (Mitaigua) y MYP x-3 (Mandeyapecua). Esta última estructura fue generada por un cambio en el ángulo de corte de la falla homónima.

Corte Guairuy (Figura 10):

A esta latitud se realizó uno de los dos cortes regionales que llegan hasta el dominio Andino. El acortamiento es de 99 km (55 %); de este total, 83 km son resueltos en secuencia normal de fallamiento utilizando el mecanismo de doble cuña y 16 km corresponden a fallamiento fuera de secuencia. La figura 11 muestra los estadios previo a este fallamiento y actual. La zona Andina se caracteriza por afloramientos del Paleozoico Inferior (Ordovícico-Devónico, inclusive Cámbrico en el lado argentino), transportados a la espalda de un gran anticlinal de rampa que despega unos 15 km por debajo de la base de la Formación Kirusillas. El contraste con el Sub-Andino es marcado. En este último dominio, los afloramientos son (excepto si existe fallamiento fuera de secuencia) de edad Carbonífero hasta Terciario Superior. Las estructuras son contorsionadas, imitando el apilamiento que sufren las formaciones infrayacentes. Varios sondeos fueron perforados a esta latitud. De Oeste a Este, SJP x-1 (San Juan del Piray, que no pudo salir del Cretácico, con capas fuertemente inclinadas), PRR x-2 (Pirarenda), BRL x-2 (Barrial), GRY x-24 (Guairuy) (este pozo, junto al primero, terminó dentro del apilamiento en la Formación Los Monos) y Charagua (produce de las arenas de la Formación Iquiri, en un anticlinal originado por apilamiento infrayacente).

Corte Camiri (ver Figura 10):

En este corte se puede observar la continuación de las serranías de Sararenda, Carohuaycho, Caipipendi y Charagua. La última estructura hacia el antepaís, Itaguazurenda, también fue generada por quiebre en el ángulo de corte de la falla Mandeyapecua. El control de subsuelo está dado por los pozos CAM-201 (Camiri, con producción en Iquiri, por encima del apilamiento) e ITG x-1 (Itaguazurenda); en esta estructura se encuentra el pozo más profundo de Bolivia, con 5340 mbbp, que terminó en el autóctono no deformado.

Corte Lagunillas (ver Figura 10):

A esta latitud se realizó el segundo corte regional que llega hasta el dominio Andino.

El acortamiento es de 99 km (55 %), coincidente con el corte Guairuy. De este total, 71 km son resueltos en secuencia normal de fallamiento de acuerdo al mecanismo de doble zona triangular y 28 km, con fallas fuera de secuencia.

De Este a Oeste se observan los mismos lineamientos de rumbo NNW-SSE intersectados por otros cortes hacia el Sur: Itaguazurenda, Charagua, Caipipendi, Carohuaycho y Sararenda. Desde esta última estructura y hacia el Oeste, los lineamientos comienzan a transferir rechazos, generándose anticlinales en echelon. La similitud vuelve a darse en las fallas fuera de secuencia que dan origen a las serranías de Yanguilo y Coscotoro, primera estructura en la zona Andina.

Los sondeos LGN x-1 (Lagunillas), CYQ x-1 (Curuyuqui), LHS x-1 (Los Huesos) y SPR x-2 (Saipurú) han sido usados como control de subsuelo. Todos fueron ubicados en anticlinales aflorados buscando un objetivo somero. Dos de ellos, Lagunillas y Los Huesos, se abandonaron luego de pasar al bloque bajo de la falla y encontrar sedimentos Cretácicos casi verticales. Saipurú terminó dentro del apilamiento, en la Formación Los Monos.

Corte Tatarenda (Figura 12):

Lo mismo que en el corte anterior, a esta latitud se observan las serranías de Itaguazurenda, Charagua, Caipipendi, Carohuaycho, Incahuasi y Morteros en su prolongación meridional a lo largo del rumbo. La falla que originó la estructura de Carohuaycho comienza a transferir parte del rechazo, dando origen a la serranía de Tatarenda. Los pozos de este campo fueron ubicados en el núcleo de un anticlinal desventrado en el Carbonífero; luego de atravesar espesores normales de la Formación Los Monos, producen de unas arenas que, según el reporte original, pertenecerían a la Formación Huamampampa. La única solución geométrica para explicar la falta de apilamiento en la cresta de la estructura, sería considerarla como originada en dos estadios: primero, con repetición dentro de la Formación Los Monos, de acuerdo al mecanismo de doble zona triangular y luego, con fallamiento fuera de secuencia, quedando el apilamiento inmediatamente al Este, por debajo del sinclinal.

En el mismo corte, la serranía de Morteros es originada también por este mecanismo de doble etapa. Desde esta latitud y hacia el Norte predomina el fallamiento fuera de secuencia. De acuerdo al modelo de la cuña crítica de Coulomb (Davis et al, 1983), esto sería la respuesta del prisma sedimentario a nuevos lineamientos que se están gestando hacia el antepaís (Carandaigua-Naranjillos y, más al Este, Río Grande-La Peña). El ángulo formado por la horizontal y la línea topográfica ha sido modificado debido a estas nuevas estructuras en el Este; el prisma no puede seguir desplazándose por la superficie basal de despegue y la única forma de volver al estadio original es generando retrocorrimientos o fallamiento fuera de secuencia.

El control de subsuelo está dado por los sondeos TTR x-27 (Tatarenda), MRI x-1 (Muchirí, terminó en el intervalo Iquiri-Los Monos, en la cresta del anticlinal formado por el apilamiento infrayacente), SID x-1 (San Isidro, terminó dentro del Carbonífero, por debajo de la falla Mandeyapeca y CDG x-1 (Carandaigua, finalizó en la Formación Iquiri, en el bloque alto de la falla Carandaigua).

La falla Mandeyapeca transfiere, a esta latitud, gran parte de su rechazo, dando origen a los lineamientos de Río Seco-Terebinto y Carandaigua-Naranjillos.

Corte Parabanón (ver Figura 12):

Tres lineamientos de rumbo NNW-SSE son intersectados por este corte regional. Al Oeste, las serranías de Alto del Inca y Parabanón fueron generadas por el mismo mecanismo de doble etapa que originó la estructura de Tatarenda.

La estructura de Río Seco es el resultado de un quiebre en el ángulo de corte de la falla homónima. Esta falla es equivalente a la falla Mandeyapeca, produciéndose una transferencia de rechazos entre ambas.

Al Este de Río Seco se encuentra la falla que, despegando en la base de la Formación Kirusillas y cortando toda la columna secuencia arriba, da origen a la estructura de El Dorado.

Más al Este, ya fuera del corte, se encuentra el lineamiento Río Grande-La Peña, siendo esta la última estructura originada en secuencia normal de fallamiento por los esfuerzos compresivos provenientes del Oeste.

Corte Espejos (ver Figura 12):

A la latitud de Santa Cruz de la Sierra se realizó la última sección estructural que, pese a ser la menos extensa de todas en longitud es la que explicaría el aparente cambio en el estilo estructural

aproximadamente a los 18° S. Al observar el mapa geológico del sector Norte del área en estudio (Figura 13) se aprecia un cambio en la vergencia de las fallas. Al Sur, las fallas tienen una vergencia oriental, cambiando su vergencia a occidental, al Norte de esta latitud.

El mecanismo sigue siendo el mismo: duplexes entre los principales niveles de despegue ubicados en las bases de las Formaciones Kirusillas y Los Monos, apilamiento en duplexes de techo pasivo dentro de esta última formación y por último, generación de estructuras en la columna suprayacente resolviendo el acortamiento.

Este aparente cambio de estilo no es más que la interacción de varios factores: el basamento se encuentra ligeramente más alto a medida que nos acercamos al borde de cuenca; para la estructura de Espejos, el acortamiento y la erosión tuvieron un papel importante al dejar en superficie el apilamiento producido en la Formación Los Monos. Las fallas de vergencia occidental dentro de esta formación fueron generadas en doble etapa; primero, como duplexes de techo pasivo de acuerdo al modelo y luego, como fuera de secuencia. Los sondeos del campo Espejos encontraron la Formación Huamampampa a 500 mbbp, brindando un excelente control para el modelo.

Al Este, la estructura de Terebinto se encuentra estructuralmente un poco más baja que la anterior. Dos pozos fueron perforados en este anticlinal, el más profundo terminó dentro de la Formación Los Monos, con buenas evidencias de hidrocarburos en la Formación Iquiri. La falla fuera de secuencia ubicada al Oeste de estos sondeos, que al Sur pone en contacto sedimentos Cretácicos (Formación Cajones) con Terciarios (Formación Petaca), pierde rechazo a la latitud de este corte.

La última falla hacia el antepaís gana, más al Norte, rechazo y genera la estructura de Caranda.

CONCLUSIONES

- 1- La faja fallada y plegada del Sub-Andino y adyacente Piedemonte, al Sur de los 18°S es un sistema originado en secuencia normal de fallamiento por una tectónica de cobertura, sin basamento involucrado, a diferencia de la región Andina.
- 2- El acortamiento proveniente del Oeste es transmitido hacia el antepaís sólo por los niveles plásticos de la base de la Formación Kirusillas, distribuyéndose en cada una de las estructuras del Sub-Andino y Piedemonte. La intercalación de niveles arenosos dentro de la Formación Los Monos impide que los esfuerzos recibidos sean transmitidos hacia adelante por la base de esta formación. Cada estructura resuelve el acortamiento parcial en una doble zona triangular con puntos ciegos ubicados, respectivamente, en la base y techo de la Formación Los Monos.
- 3- El comportamiento mecánico de la Formación Los Monos controla los modelos de deformación. En el Sub-Andino y Piedemonte interno, las estructuras generadas son la respuesta al mecanismo de doble zona triangular; hacia el Este, en el Piedemonte externo y Llanura Chaqueña las fallas cortan en rampa secuencia arriba, desde la base de la Formación Kirusillas hasta la superficie, originando pliegues típicos de un mecanismo de flexión de falla.
- 4- En el Sub-Andino, los ejes de los anticlinales en superficie no siempre coinciden con el apilamiento de reservorios fracturados ubicados en las crestas de estructuras duplex, principal trampa de hidrocarburos en la región. Estos lineamientos superficiales dependen de la geometría, a veces errática, de las fallas que cortan secuencia arriba desde el punto ciego ubicado en el techo de la Formación Los Monos. En el Piedemonte externo, debido a la geometría más simple de las fallas, los ejes de los anticlinales en superficie sí son un indicador directo de estructuras que involucran reservorios del Paleozoico superior (Carbonífero y Pérmico) y Mesozoico (Jurásico). Los reservorios más profundos (Huamampampa, Santa Rosa) se encuentran desplazados hacia el Oeste con respecto al eje de la estructura en superficie. En el Piedemonte interno, pese a que el mecanismo de doble zona triangular es el que predomina, los acortamientos son mínimos y no se produce el apilamiento que caracteriza a la zona Sub-Andina. Los lineamientos superficiales reflejan en forma directa la estructuración que se produce en subsuelo, incluso para niveles profundos.
- 5- Existe transferencia de rechazos entre las fallas que generan estos lineamientos.
- 6- El mecanismo fuera de secuencia es la respuesta mecánica del prisma sedimentario a estructuras más jóvenes que se generan en el Piedemonte.
- 7- Al Sur de los 19°S, este tipo de fallamiento se produce cerca del límite con la región Andina. Al Norte de esta latitud, y debido a la generación de nuevos lineamientos hacia el antepaís (Carandaigua - Naranjillos y Río Grande - La Peña), las fallas fuera de secuencia se desplazan hacia el Este.

- 8- El aparente cambio de estilo estructural, aproximadamente a los 18°S, se debe a la interacción entre el nivel de erosión y el apilamiento producido dentro de la Formación Los Monos, dando como resultado fallas con vergencia opuesta al Norte y al Sur de esta latitud.
- 9- Antiguas zonas de debilidad dentro del basamento fueron reactivadas por los movimientos compresivos en el Terciario, originando una tectónica de desplazamiento lateral sobreimpuesta al modelo de doble zona triangular.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la Gerencia de Exploración de Andina S.A., sin cuya autorización no hubiera sido posible publicar este trabajo; Víctor Ploszkiewicz, Gustavo Vergani, Gustavo Rebay y Carlos Barcat por la revisión técnica; Daniel Demuro por sus útiles sugerencias; Gaby Moya, Tonya Claire y Gonzalo Loayza dibujaron las figuras.

REFERENCIAS

- Baby, P., Moretti, I., Guillier, B., Limachi, R., Méndez, E., Oller, J. and Specht, M., 1995. Petroleum system of the Northern and Central Bolivian Sub-Andean Zone. En "Petroleum basins of South America, AAPG Memoir 62".
- Banks, C.J. and Warburton, J., 1986. Passive- roof duplexes geometry in the frontal structures of the Kirthar and Sulaiman Mountain Belts, Pakistan. *Journal of Structural Geology*, vol. 8, p. 229-237.
- Belotti, H.J., Saccavino, L.L. and Schachner, G.A., 1995. Structural styles and petroleum occurrence in the Sub-Andean Fold and Thrust Belt of Northern Argentina. En "Petroleum basins of South America, AAPG Memoir 62".
- Biddle, K. and Christie-Blick, N., 1985: Glossary of strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. SEPM Special Publication 37.
- Boyer, S.E. and Elliott, D., 1982. Thrust systems. *The AAPG Bulletin*, vol. 66, p. 1196-1230.
- Christie-Blick, N. and Biddle, K., 1985. Deformation and basin formation along strike-slip faults. En "Structural concepts and techniques II. AAPG Treatise of Petroleum Geology".
- Crowell, J.C., Suárez Soruco, R. and Rocha Campos, A.C., 1981. The Silurian Cancañiri Formation of Bolivia, Peru and Argentina. En "The earth's pre-Pleistocene glacial record. Cambridge University Press, p. 902-907".
- Dahlstrom, C.D.A., 1969. Balanced cross-sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 6, p. 743-757.
- Dahlstrom, C.D.A., 1970. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 18, n. 3.
- Davis, D., Suppe, J. And Dahlen, A., 1983. Mechanics of fold thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, vol. 88, p. 1153-1172.
- De Paor, D., 1988. Balanced sections in thrust belts. *The AAPG Bulletin*, vol. 72, n. 1.
- Dunn, J., Hartshorn, K. and Hartshorn, P., 1995. Structural styles and hydrocarbon potential of the Sub-Andean thrust belt of Southern Bolivia. En "Petroleum basins of South America, AAPG Memoir 62".
- Elliott, D., 1982. The construction of balanced cross-sections. En "Structural concepts and techniques I. AAPG Treatise of Petroleum Geology".
- Fernández Seveso, F., Vitalli, M.C. and Viñes, R., 1997. The Silurian-Devonian Project. YPF SA internal report.
- Gubbels, T.L., Isacks, B.L. and Farrar, E., 1993. High-level surfaces, plateau uplift, and foreland development, Bolivian Central Andes. *Geology*, vol. 20, p. 695-698.
- Harding, T.P., 1990. Identification of wrench faults using sub-surface structural data: criteria and pitfalls. *The AAPG Bulletin*, vol. 74, p.1590-1609.
- Hardy, S., Poblet, J., Mc Klay, K. and Waltham, D., 1996. Mathematical modelling of growth strata associated with fault-related fold structures. En "Modern developments in structural interpretation, validation and modelling. Geological Society Special Publication 99".
- Helwig, J., 1972. Stratigraphy, sedimentation, paleogeography, and paleoclimates of Carboniferous and Permian of Bolivia. *The AAPG Bulletin*, vol. 56, p. 1008-1033.
- Hossak, J.R., 1979. The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: a review. *Journal of the Geological Society*, vol. 136, p. 705-711.

- Isaacson, P.E. and Sablock, P.E., 1987. Devonian system in Bolivia, Peru and northern Chile. Second Canadian Society of Petroleum Geologists, Devonian system international symposium, vol. 1, p. 719-728.
- Jones, P., 1991. Quantitative geometry of thrust and fold belt structures. The AAPG Bulletin, vol. 68, p. 493.
- Liu, S. and Dixon, J., 1990. Centrifuge modelling of thrust faulting: strain partitioning and sequence of thrusting in duplex structures. En "Deformation mechanics, rheology and tectonics. Geological Society".
- Lohmann, H.H., 1970. Outline of tectonic history of Bolivian Andes. The AAPG Bulletin, vol. 54, p. 735-757.
- Mc Klay, K.R., 1996. Glossary of thrust tectonics terms. Geological Society of London Special Publication 9.
- Medwedeff, D., 1992. Geometry and kinematics of an active, laterally propagating wedge thrust, Wheeler Ridge, California. En "Structural geology of fold and thrust belts", p. 3-28.
- Mitra, S. and Namson, J., 1989. Equal-area balancing. American Journal of Science, vol. 289, p. 563-599.
- Mitra, S., 1990. Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. The AAPG Bulletin, vol. 74, n. 6, p. 921-945.
- Mitra, S., 1992. Balanced structural interpretation in fold and thrust belts. En "Structural geology of fold and thrust belts, p. 53-77".
- Montemurro, G., 1994. Estratigrafía y ambiente sedimentario del Silúrico y Devónico en la cuenca del Chaco Boliviano. En "Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia, p. 151-160.
- Moretti, I., Baby, P., Méndez, E. and Zubieta, D., 1994. Hydrocarbon generation in relation to thrusting in the Sub-Andean zone from 18 to 22° S, Bolivia. Petroleum Geoscience, vol. 2, p. 17-28.
- Roeder, D. and Chamberlain, R.L., 1995. Structural geology of Sub-Andean fold and thrust belt in Northwestern Bolivia. En "Petroleum basins of South America. AAPG Memoir 62".
- Sempere, T., 1989. Phanerozoic evolution of Bolivia and adjacent regions. International geological congress, Washington. Extended abstracts.
- Sheffels, B., 1990. Lower bound on the amount of crustal shortening in the Central Bolivian Andes. Geology, n. 18, p. 812-815.
- Suppe, J., 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science, vol. 283, N. 7.
- Sylvester, A. and Smith, R., 1976. Tectonic transpression and basement-controlled deformation in San Andreas fault zone, California. The AAPG Bulletin, vol. 60, N. 12.
- Tchalenko, J.S., 1970. Similarities between shear zones of different magnitudes. Geological Society of America Bulletin, vol. 81, p. 1625-1640.
- Thomas, G., 1974. Lineament-block tectonics: Williston-Blood Creek Basin. The AAPG Bulletin, vol. 58, n. 7, p. 1305-1322.
- Welsink, H.J., Franco, A. and Oviedo, C., 1995. Andean and pre-Andean deformation, Boomerang Hills area, Bolivia. En "Petroleum basins of South America. AAPG Memoir 62".
- Wilcox, R., Harding, T.P. and Selly, D.R., 1973. Basic wrench tectonics. The AAPG Bulletin, vol. 57, n. 1, p. 74-96.
- Zolnai, G., 1988. Continental wrench-tectonics and hydrocarbon habitat. AAPG Continuing Education Series 30.

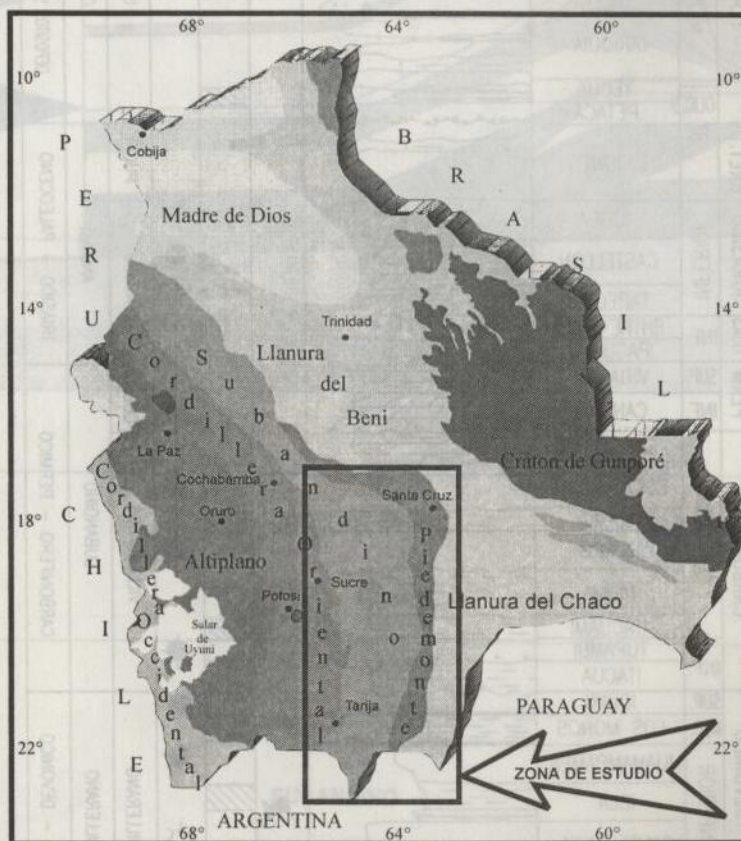


Figura 1

EDAD	FORMACION	LITOLOGIA	ROCA				CICLOS		
			GENERA-DORA	SELLO	RESER-VORIO	MORETTI	LOHMAN	ESTE	TRABAO
TERCIARIO	PLIO?	EMBOROZU							
	MIOCENO	GUANDACAY					CHACO		
		TARIQUIA						CHACO	
	OLIG.	YECUA							
	PAL.	PETACA							DEPOSITOS SINOCENICOS
CRET.		CAJONES					PUCA		
JURASICO	INFERIOR	ICHOA							
		CASTELLON							
		TAPECUA					TACURU	ANDINO	
TRIAS	INF.	ENTRE RIOS							TRIASICO - PALEOCENO
PERM	SUP.	IPAGUAZU							
	INF.	VITIACUA							
CARBONIFERO		CANGAPI							
		SAN TELMO							
		ESCARPMENT							
	SUPERIOR	TAIGUATI							
		CHORRO							
		TARIJA							
		ITACUAMI							
		TUPAMBI							
	INF.	ITACUA							
		IQUIRI							
DEVONICO	SUP.	LOS MONOS							
	MED.	HUAMAMPAMPA							
	INFERIOR	ICLA							
		SANTA ROSA							
SILURICO	SUP.	TARABUCO							
		KIRUSILLAS							
ORD.	SUP.	CANCAÑIRI							
	INF.	CIENEGUILLAS							
P-e	SUP.	ISLAYACHI							
		TOTOHUAYCO							
		SAN CRISTOBAL							
		BASAMENTO							

Figura 2

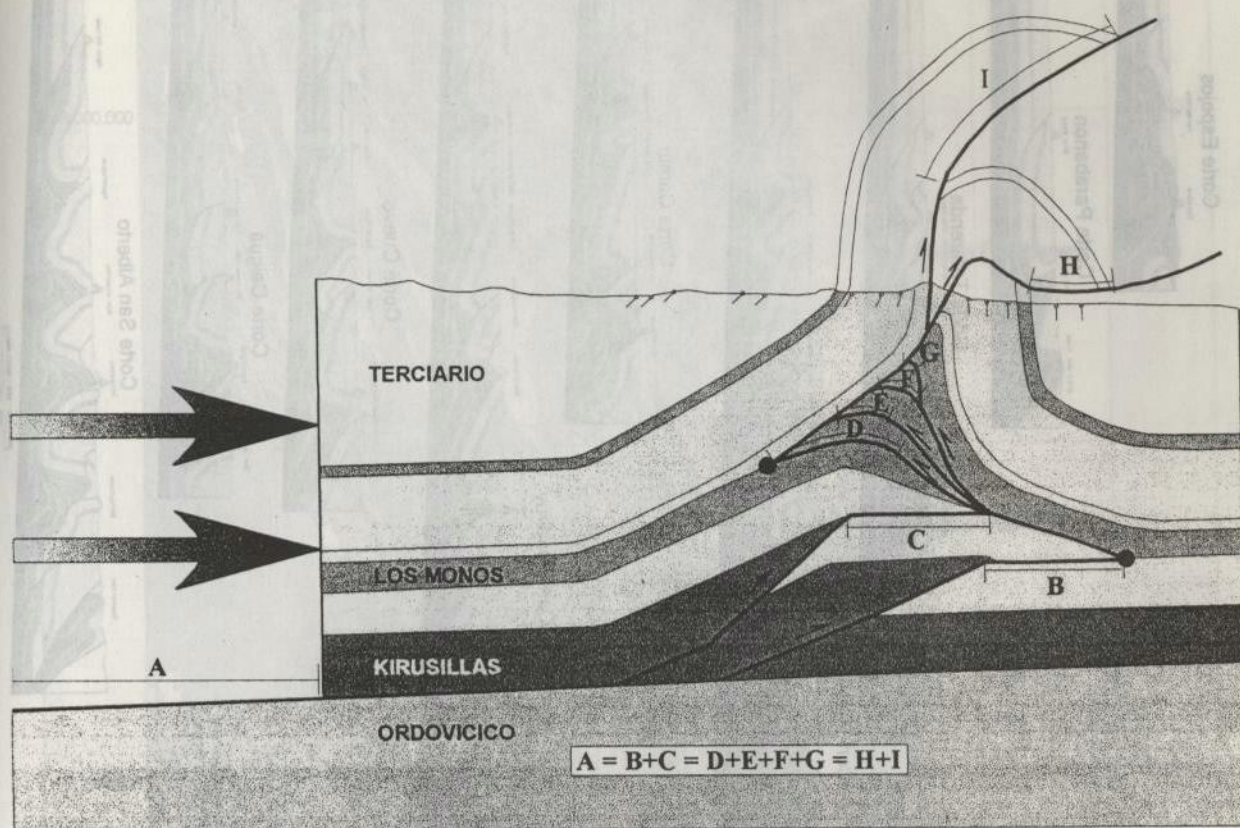


Figura 3

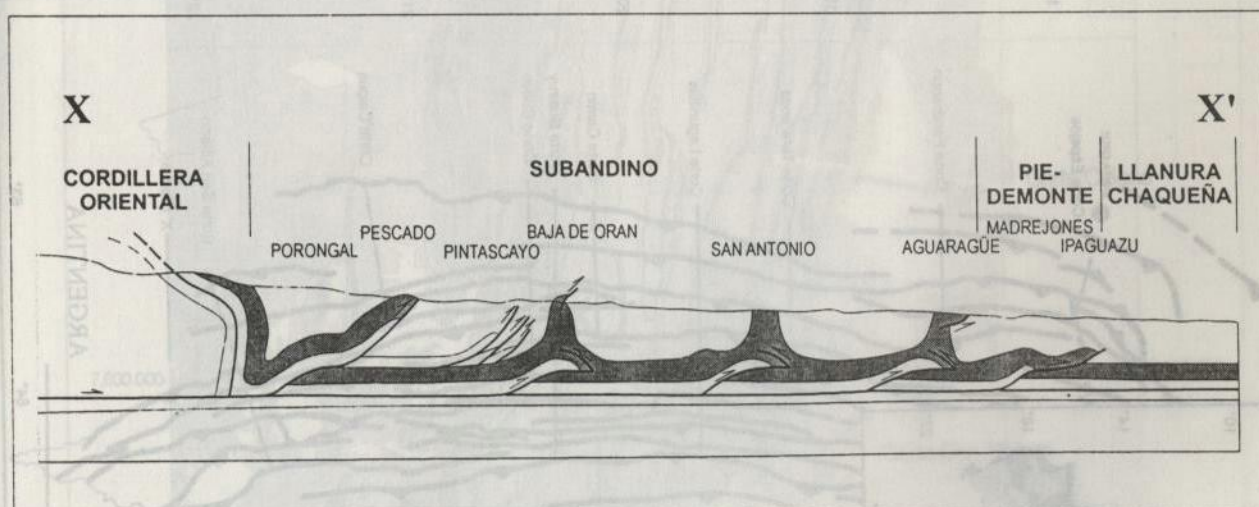


Figura 4

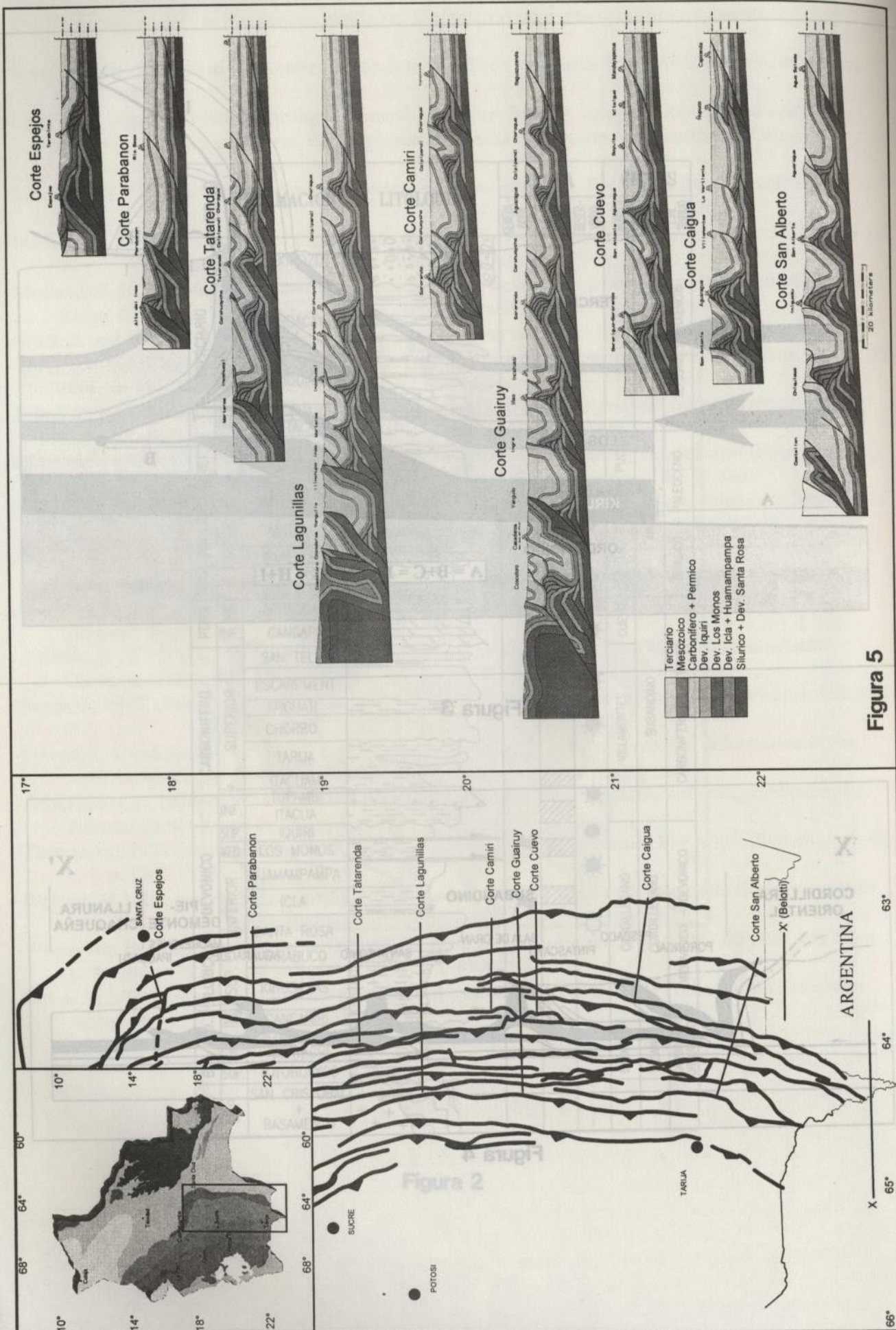


Figura 5

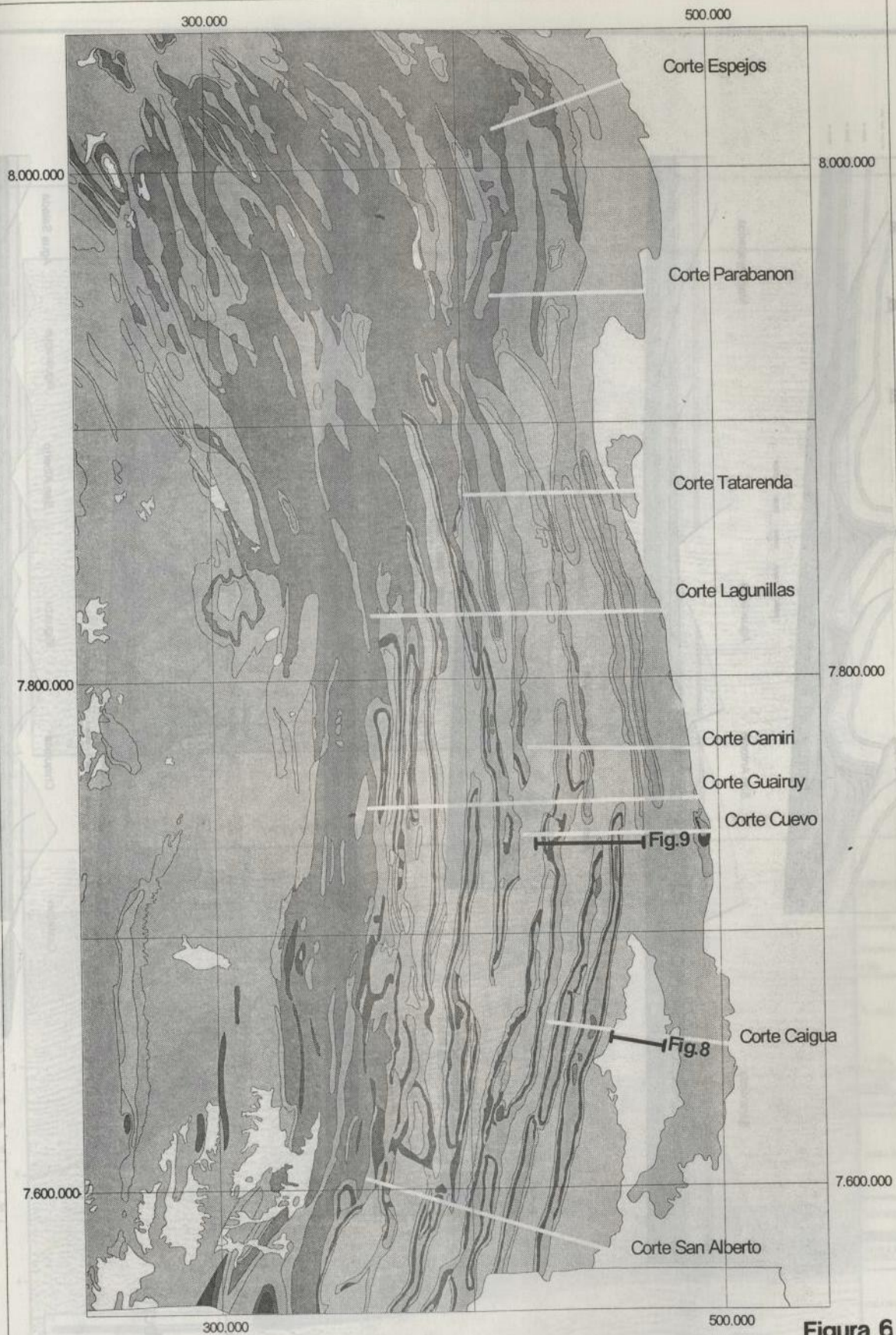
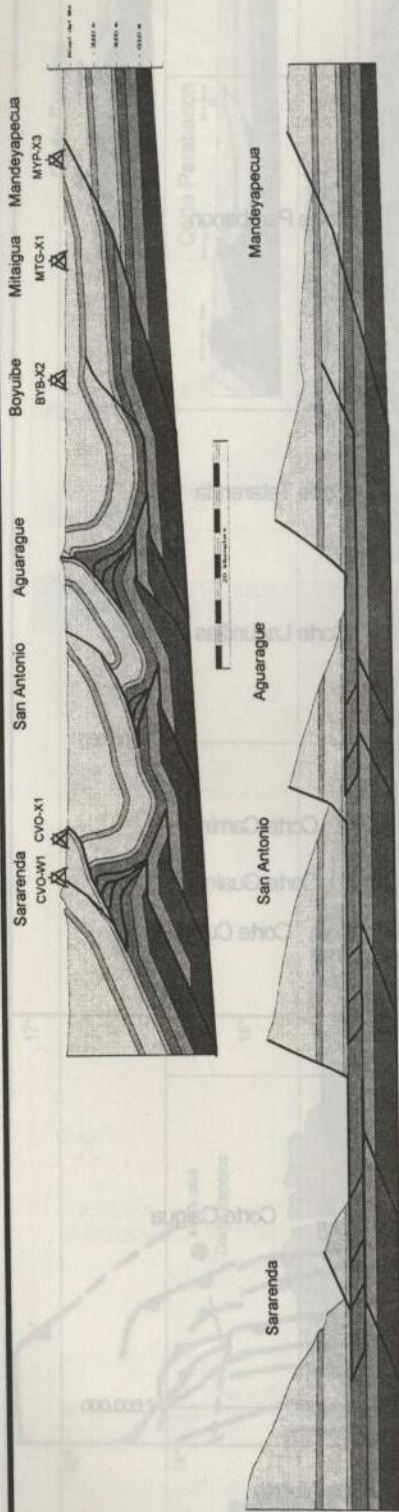
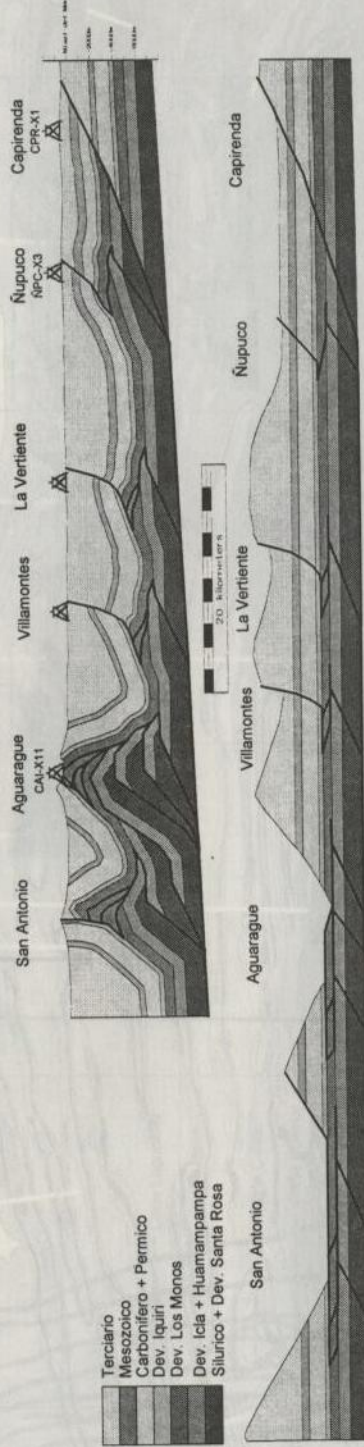


Figura 6

Corte Cuevo



Corte Caigua



Corte San Alberto

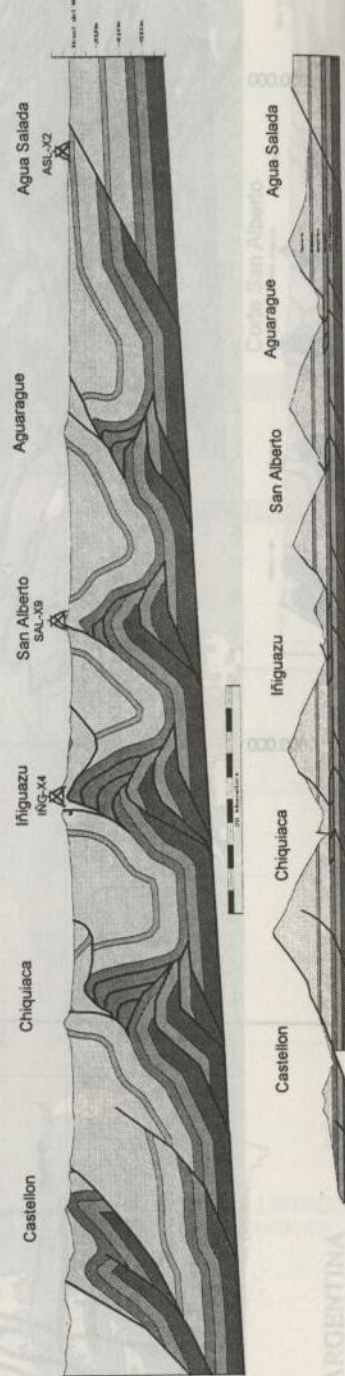


Figura 7

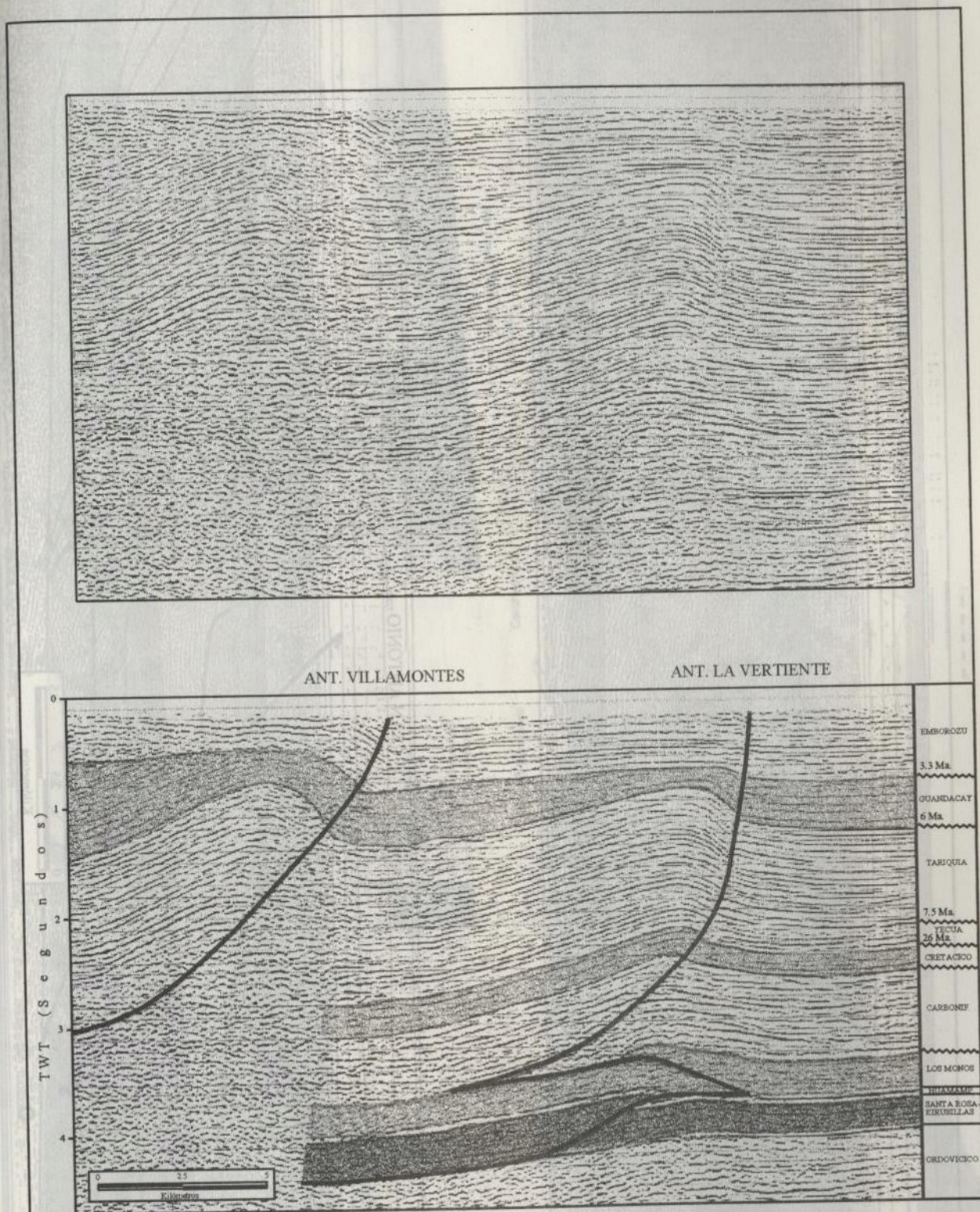


Figura 8

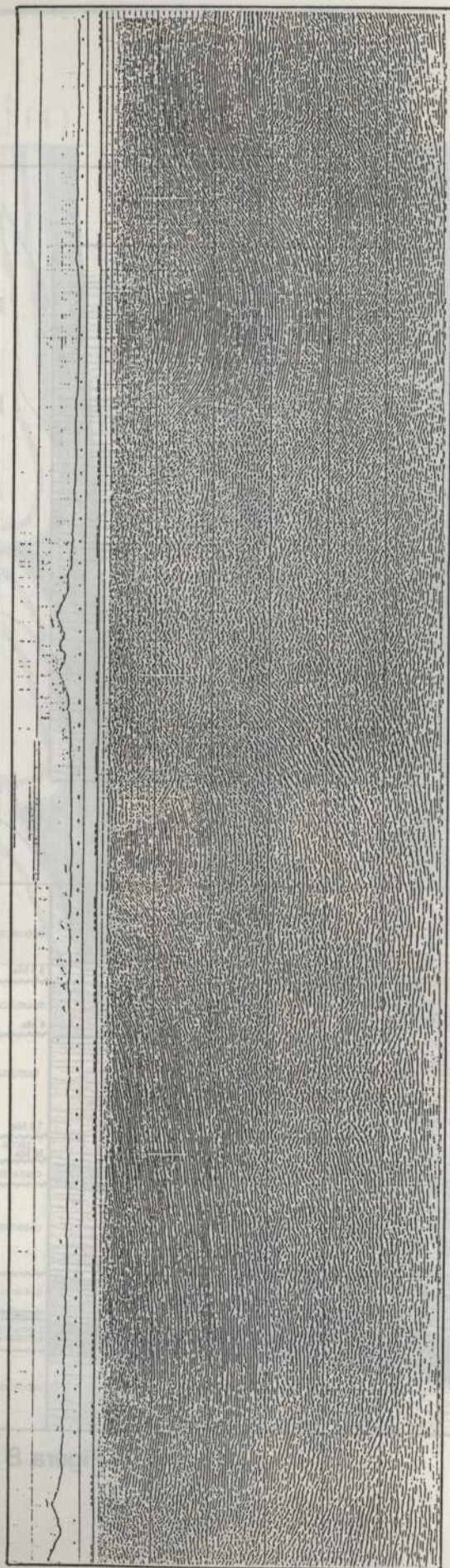


Figura 9

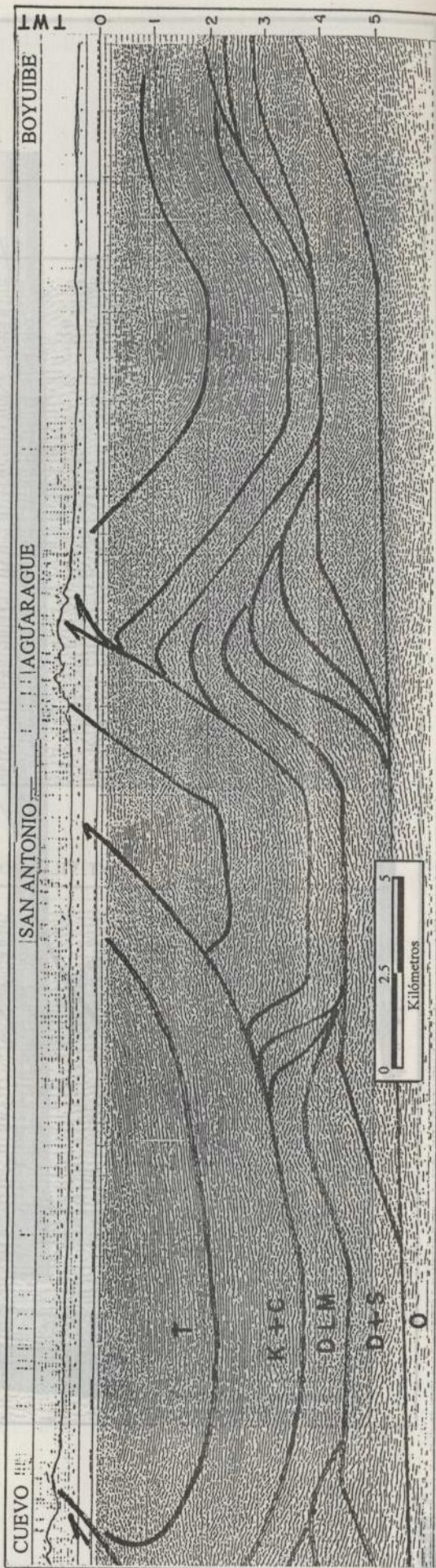
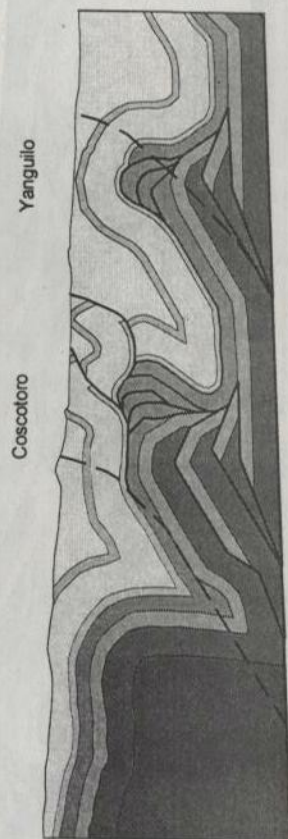
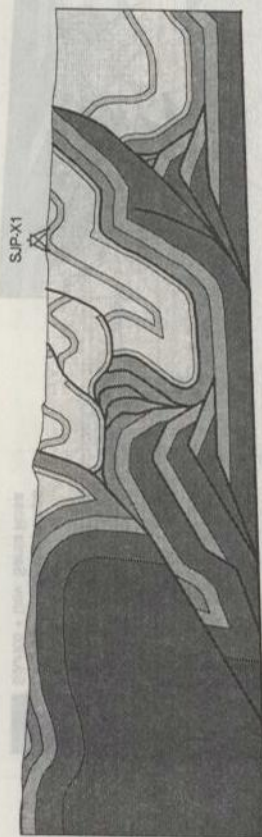




Figura 10



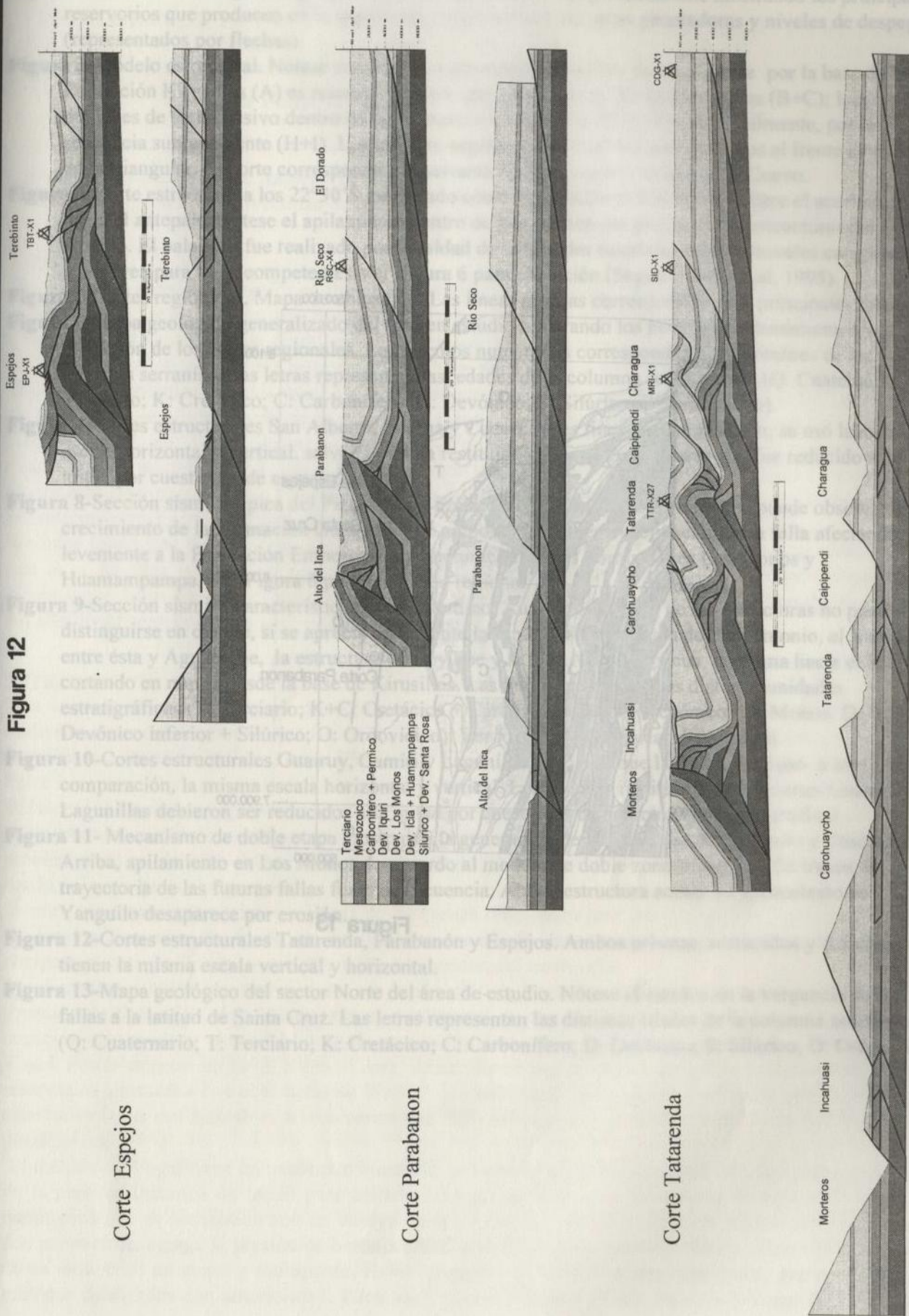
Coscotoro Cazaderos Yanguillo



20 kilometers

Figura 11

Figura 12



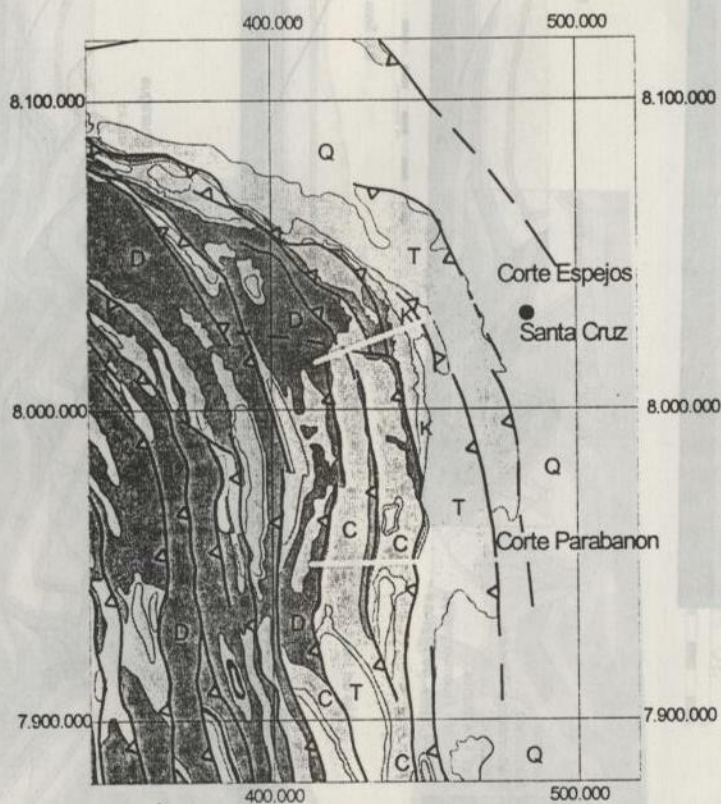


Figura 13

Figura 1-Mapa morfoestructural simplificado de Bolivia mostrando el área de estudio.

Figura 2-Columna estratigráfica generalizada del Sub-Andino Sur y Piedemonte mostrando los principales reservorios que producen en la región, así como también las rocas generadoras y niveles de despegue (representados por flechas).

Figura 3-Modelo estructural. Nótese cómo el acortamiento transmitido desde el Oeste por la base de la Formación Kirusillas (A) es resuelto, primero por los duplexes Siluro-Devónicos (B+C); luego, en duplexes de techo pasivo dentro de la Formación Los Monos (D+E+F+G) y finalmente, por la secuencia suprayacente (H+I). Los círculos negros representan los puntos ciegos al frente de cada zona triangular. El corte corresponde a la serranía de Aguaragüe a la latitud de Cuevo.

Figura 4-Corte estructural a los 22°30'S mostrando cómo la Cordillera Oriental transfiere el acortamiento hacia el antepaís. Nótese el apilamiento dentro de Los Monos (en gris) para las estructuras del Sub-Andino. El balanceo fue realizado por igualdad de longitudes estratales para los niveles competentes y por área para los incompetentes. Ver Figura 6 para ubicación (Según Belotti et al, 1995).

Figura 5-Cortes regionales. Mapa de ubicación. Las líneas gruesas corresponden a las principales fallas.

Figura 6-Mapa geológico generalizado del área en estudio mostrando los principales lineamientos y la ubicación de los cortes regionales. Los círculos numerados corresponden a los nombres de las distintas serranías. Las letras representan las edades de la columna sedimentaria (Q: Cuaternario; T: Terciario; K: Cretácico; C: Carbonífero; D: Devónico; S: Silúrico; O: Ordovícico).

Figura 7-Cortes estructurales San Alberto, Caigua y Cuevo. A los fines de comparación, se usó la misma escala horizontal y vertical, salvo el prisma restituido del corte San Alberto que fue reducido a la mitad por cuestiones de espacio.

Figura 8-Sección sísmica típica del Piedemonte. En la versión interpretada (abajo), se puede observar el crecimiento de la Formación Guandacay en ambos anticlinales, reactivación de la falla afectando levemente a la Formación Emborozú y estructuración en las Formaciones Los Monos y Huamampampa. Ver Figura 6 para ubicación regional.

Figura 9-Sección sísmica característica del Sub-Andino. Aunque el interior de las estructuras no puede distinguirse en detalle, sí se aprecia claramente la espalda de la serranía de San Antonio, el sinclinal entre ésta y Aguaragüe, la estructura de Boyuibe y la falla Mandeyapeuca, la última hacia el Este cortando en rampa desde la base de Kirusillas. Las letras representan las distintas unidades estratigráficas (T: Terciario; K+C: Cretácico + Carbonífero; DLM: Devónico Los Monos; D+S: Devónico inferior + Silúrico; O: Ordovícico). Ver Figura 6 para ubicación regional.

Figura 10-Cortes estructurales Guairuy, Camiri y Lagunillas. Al igual que la figura 7, se usó, a los fines de comparación, la misma escala horizontal y vertical. Los prismas restituidos de los cortes Guairuy y Lagunillas debieron ser reducidos a la mitad por cuestiones de espacio (ver escala gráfica).

Figura 11-Mecanismo de doble etapa mostrando la generación de las serranías de Yanguilo y Coscotoro. Arriba, apilamiento en Los Monos de acuerdo al modelo de doble zona triangular. En trazos, la trayectoria de las futuras fallas fuera de secuencia. Abajo, estructura actual. El apilamiento en Yanguilo desaparece por erosión.

Figura 12-Cortes estructurales Tatarenda, Parabanón y Espejos. Ambos prismas, restituidos y deformados tienen la misma escala vertical y horizontal.

Figura 13-Mapa geológico del sector Norte del área de estudio. Nótese el cambio en la vergencia de las fallas a la latitud de Santa Cruz. Las letras representan las distintas edades de la columna sedimentaria (Q: Cuaternario; T: Terciario; K: Cretácico; C: Carbonífero; D: Devónico; S: Silúrico; O: Ordovícico)