

El posible origen de la sismicidad somera que se presenta en la región que corresponde a la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía de Perijá y la Península de La Guajira, noreste de Colombia.

German Chicangana^{1,2}, **Andreas Kammer**², **Carlos Alberto Vargas – Jiménez**², **Camilo Ivan Ordoñez Aristizabal**³, **Hector Mora - Páez**⁴, **Andre Luiz Ferrari**³, **Sergio Adrian López**⁴.

1. Centro de Investigaciones de Ingeniería y Arquitectura “Rogelio Salmona”, Corporación Universitaria del Meta, Villavicencio, Colombia.

2. Grupo de Geofísica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.

3. LAGEMAR, Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

4. Proyecto GEORED, INGEOMINAS, Bogotá D.C.

Resumen

Con el análisis de imágenes LANDSAT y trabajo de campo en varios lugares del norte de la Sierra Nevada de Santa Marta y la península de La Guajira, se han encontrado evidencias de tectónica activa. Igualmente la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), registra sismicidad para esta región, la cual es periódica con $3.0 < M_L < 5.0$ al igual que la red sismológica mundial (NEIC) que ha registrado para esta región sismos con una magnitud de momento ($M \geq 4,5$). Lamentablemente estas redes sismológicas poseen un número muy pequeño de estaciones en la región y su diseño ha sido establecido para determinar la sismicidad regional y no la sismicidad local. La profundidad focal de los sismos detectados por estas redes varía de entre 0 y 45 km, definiéndose que son de naturaleza intraplaca y no sublitosférica. Aquí planteamos que la sismicidad se debe al empuje que la placa Caribe ejerce sobre la península de La Guajira generando un campo de esfuerzos regional en dirección ESE, por lo que la península se está moviendo hacia el E a lo largo de su contacto con el norte de Suramérica que está definido por la Falla Oca. A esta falla se atribuye el sismo que afectó a la ciudad de Santa Marta en 1834. El gran tamaño de la Falla Oca (más de 1000 km), cuyo rumbo es E -W y la similaridad de su contexto geodinámico con el de las fallas del norte de la placa Caribe como la Enriquillo - Plantain Garden de Haití, hace pensar que la falla Oca ofrece las mismas probabilidades que esta última para producir un sismo con una magnitud semejante al presentado el 12 de enero de 2010 en la República de Haití.

Palabras Claves: Plataforma Caribe colombiana, Amenaza Sísmica, Placa Caribe, Sismotectónica, Geodinámica.

About the possible origin of shallow seismicity that occur beneath the Sierra Nevada de Santa Marta, the Perijá Range and the La Guajira peninsula, northeastern Colombia.

Start from analysis of LANDSAT images with field check in several places toward north of the Sierra Nevada de Santa Marta and the La Guajira peninsula we found active tectonics evidences. In same manner the Colombian seismological network called as Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), and the Global Seismological Network (NEIC) had been registered for this Colombian region a periodic shallow seismicity. The RSNC had registered shallow seismicity with

3.0 < M_L < 5.0, and NEIC equally shallow seismicity with moment magnitude (M) ≥ 4.5 . Unfortunate these seismological networks have a little number of seismological stations in this Colombian region and these were deployed for only registered the regional seismicity and not the local seismicity. The focal deep of the detect earthquakes by these networks varies between 0 and 45 km defining with this that these are shallow relate to intraplate regime and not intermediate relate to sublithospheric environment. Here we exposed that this seismicity is due to push of the Caribbean plate carries over the La Guajira peninsula producing a regional stress field with ESE tendency what made that the La Guajira peninsula is moving toward E along of its contact with the northwestern of South America continent defining in this the Oca fault. To this regional fault its attributed the 1834 Earthquake that affected and destroyed to the Santa Marta city. The large size of the Oca Fault (over 1000 km) which strike is E - W and its similarity of its geodynamic role like the large faults of northern border of the Caribbean plate how the Enriquillo - Plantain Garden Fault from Haiti, we think that the Oca Fault can has the same probabilities that this last for producing an earthquake with a similar magnitude to the occurred in January 12 of 2010 in Haiti Republic.

Key words: Colombian Caribbean platform, Seismic hazard, Caribbean plate, Seismotectonics, Geodynamics.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la instalación en 1993 de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) se ha observado una sismicidad periódica con $3.0 \leq M_L \leq 5.0$ que se ubica hacia la región central y sur de la península de la Guajira, y hacía la parte central y suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta (Figura 1). Igualmente la red sismológica mundial (NEIC) ha localizado para estas mismas regiones sismos cuando estos presentan una magnitud de momento (M) $\geq 4,5$. En éste sector de Suramérica se han presentado grandes sismos como el que afectó a la ciudad de Santa Marta en 1834 y los sismos $M \geq 7.0$ que ocurrieron al occidente de Venezuela en tiempos prehistóricos, estos últimos constatados por estudios paleosismológicos (Audemard, 1996). En este trabajo se propone que el desarrollo de la actividad tectónica de la Falla Oca, que es a la que se atribuye esta sismicidad, es el resultado del ajuste final durante el Neógeno Superior de la placa Caribe entre Norteamérica y Suramérica. Éste ajuste produjo durante el Neógeno Superior, la activación de grandes sistemas de fallas corticales que evidencian un límite de placas tanto al norte como al sur de la placa Caribe. Estos límites son el sistema de fallas Oca - Morón - El Pilar en Colombia y Venezuela al norte de Suramérica, y el sistema de fallas Motagua - Walton - Enriquillo - Plantain Garden, para el sector que corresponde a Guatemala, la fosa de Caimán, Jamaica y la Isla de La Española al sur de la placa norteamericana. Por el gran tamaño de la Falla Oca, cuyo rumbo es E -W y por su similaridad en su contexto geodinámico con el de las fallas del norte de la placa Caribe, se infiere que esta ofrece las mismas probabilidades de producir un sismo en el norte de Colombia con una magnitud semejante a la que se presentó el 12 de enero de 2010 en la República de Haití. Dicho sismo podría producir una situación de desastre para ciudades como Maicao, Riohacha o Santa Marta en Colombia, o Coro, Maracaibo o Punto Fijo en Venezuela.

En éste trabajo mostramos inicialmente los métodos aplicados en la investigación, pasando enseguida a los aspectos relacionados con la geotectónica de esta región de Colombia, luego mostramos aspectos relacionados con las evidencias de tectónica activa verificados desde imágenes tipo LANDSAT, verificación de campo y soporte con algunos métodos geofísicos para constatar estas evidencias en sentido tiempo y espacio. Se muestra luego la

sismicidad observada en esta región indicando además mostrando con la verificación de los vectores de desplazamiento horizontal desde la red satelital de GPS entre la península de La Guajira y el resto del noroccidente de Suramérica, como esta movilidad se relaciona con la sismicidad intraplaca de ésta región.

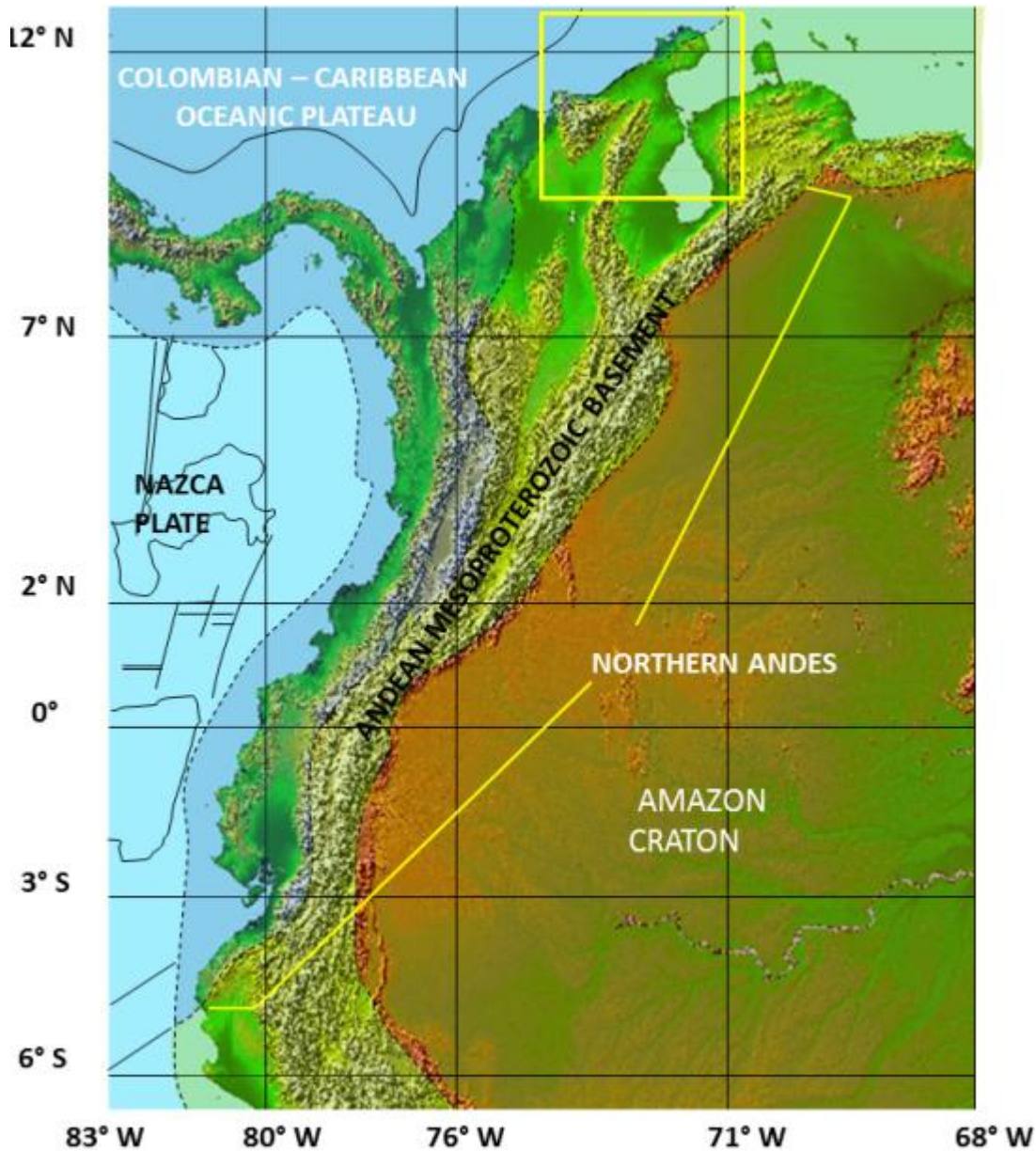


Figura 1. Localización de la región que abarca éste trabajo.

2. MÉTODOS

El desarrollo de éste trabajo se fundamenta en la información geológica disponible de esta región de Colombia para lo cual se realizó la recopilación, selección y clasificación de

información secundaria bibliográfica de los sectores que la constituyen con el objeto de establecer su origen y evolución. Siguiendo este esquema se busca inicialmente realizar una interpretación detallada de su marco tectónico - estratigráfico que involucre aspectos teóricos sobre las características geológicas y geofísicas relacionadas a aquellas regiones en donde las placas convergen. En esta fase se siguen los conceptos generales de Wilson (1989), y se refina con el trabajo de Cloos (1993). En éste sentido también se procedió a correlacionar eventos magmáticos, metamórficos y procesos sedimentológicos, buscando integrar su significado en espacio y tiempo para la Sierra Nevada de Santa Marta y la península de La Guajira. Por último, se analizaron resultados de dataciones isotópicas realizados por diferentes métodos radiocronométricos aplicados en regiones asociadas (Maya, 2001; Weber et al. 2010) y trabajos previos sobre paleomagnetismo como por ejemplo MacDonald y Opdyke (1972, 1984), Maze y Hargraves (1984), Gose et al. (2003), Bayona et al. (2010) y Montes et al. (2010)

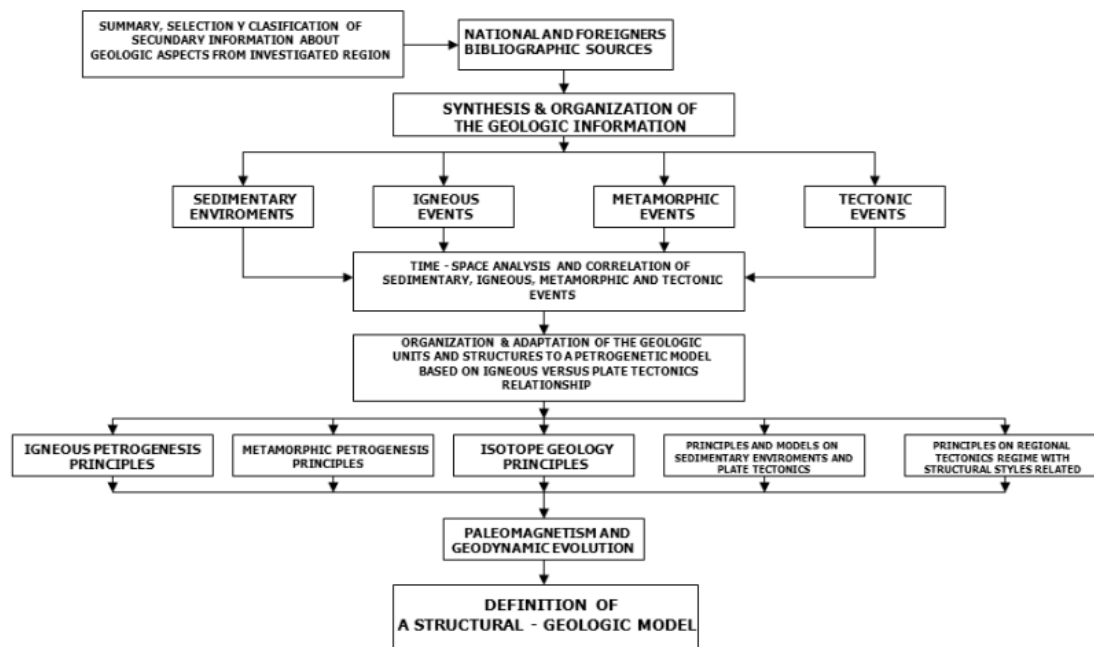


Figura 2. Cuadro esquemático que muestra los pasos seguidos para la definición del modelo geológico – estructural del orogeno conformado por la cuenca Cesar - Ranchería, Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá. Tomado y modificado de Chicangana (2005).

Se trató de unificar esta zona de cizalla en un modelo coherente geológico – estructural que indique su significado en el contexto geotectónico regional de los Andes del Norte y con ello facilitar el entendimiento de su comportamiento sismotectónico en Colombia. Estos pasos pueden ser observados de manera sintética en la Figura 2. Para nuestra región de interés se realizó un ejercicio que integra diversas herramientas tales como modelos faciales en rocas sedimentarias, provincias faunísticas, eutatismo, magmatismo, tectónica y paleomagnetismo (Wilson, 1989; Miall, 2000 y 1997; Turcotte y Schubert, 2002).

Una vez obtenido esto se procede a verificar con información geofísica de carácter regional derivada de la información disponible al público de la Agencia Nacional de Hidrocarburos como los mapas de anomalías de Bouguer y de anomalías magnéticas de Colombia (ANH, 2008, 2009). Luego con la ayuda de imágenes satelitales del tipo LANDSAT TM - 5 y ETM+7 se procedió a reconocer los rasgos estructurales sobresalientes del orogeno con forme la metodología indicada en la figura 3, junto con control de trabajo de campo, principalmente hacia sus bordes suroccidental en la región que corresponde a la zona de falla de Santa – Marta y hacía el norte donde corresponde a la zona de falla de Oca. Para ambos casos y también para el sector suroriental en la región que corresponde a la zona de las fallas El Tigre - Perijá en la frontera colombo - venezolana se apoyó con información sísmica de la exploración de la industria petrolera. Dicha información además se aplicó en otros lugares del orogeno para optimizar el modelo geotectónico general y poder plantear de una manera más segura su evolución para el Neógeno Superior.

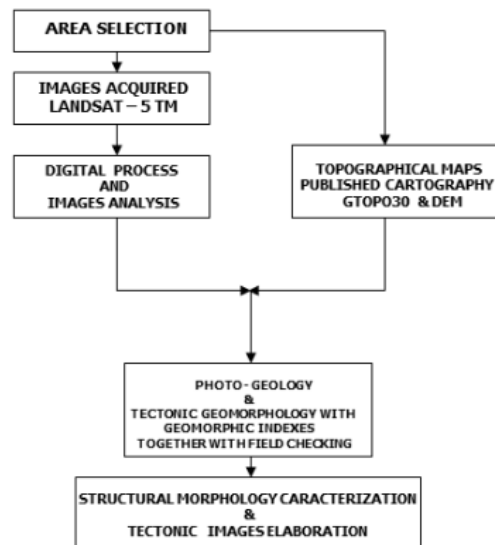


Figura 3. Cuadro esquemático que muestra los pasos seguidos para la elaboración de los mapas tectónicos y la caracterización morfológico - estructural de las regiones que constituyen la región del estudio. Tomado y modificado de Chicangana (2005).

3. GEOTECTONICA

3.1. Origen y evolución del Basamento

La plataforma continental al oriente de la Falla Santa Marta – Bucaramanga (FSMB) se caracteriza por presentar un basamento exhumado. En este sector se han desarrollado orogenos como la SNSM y la Serranía de Perijá, en donde se observan rocas desde el Mesoproterozoico hasta el Cenozoico (Gómez et al., 2007b). En la península de La Guajira, al norte de la Falla Cuisa aflora igualmente el basamento. Entre la SNSM y la Serranía de Perijá se presenta la cuenca Cesar - Ranchería, en la cual el basamento está recubierto por sedimentos Cenozoicos. En la Península de La Guajira entre la Falla de Oca al sur y la Falla

Cuisa al norte se presenta el basamento recubierto igualmente por sedimentos Cenozoicos. A continuación pasamos a describir dos provincias geológicas, una al norte que está constituida por la península de La Guajira y otra al sur constituida por la SNSM, la cuenca Cesar - Ranchería y la Serranía de Perijá (Figura 4).

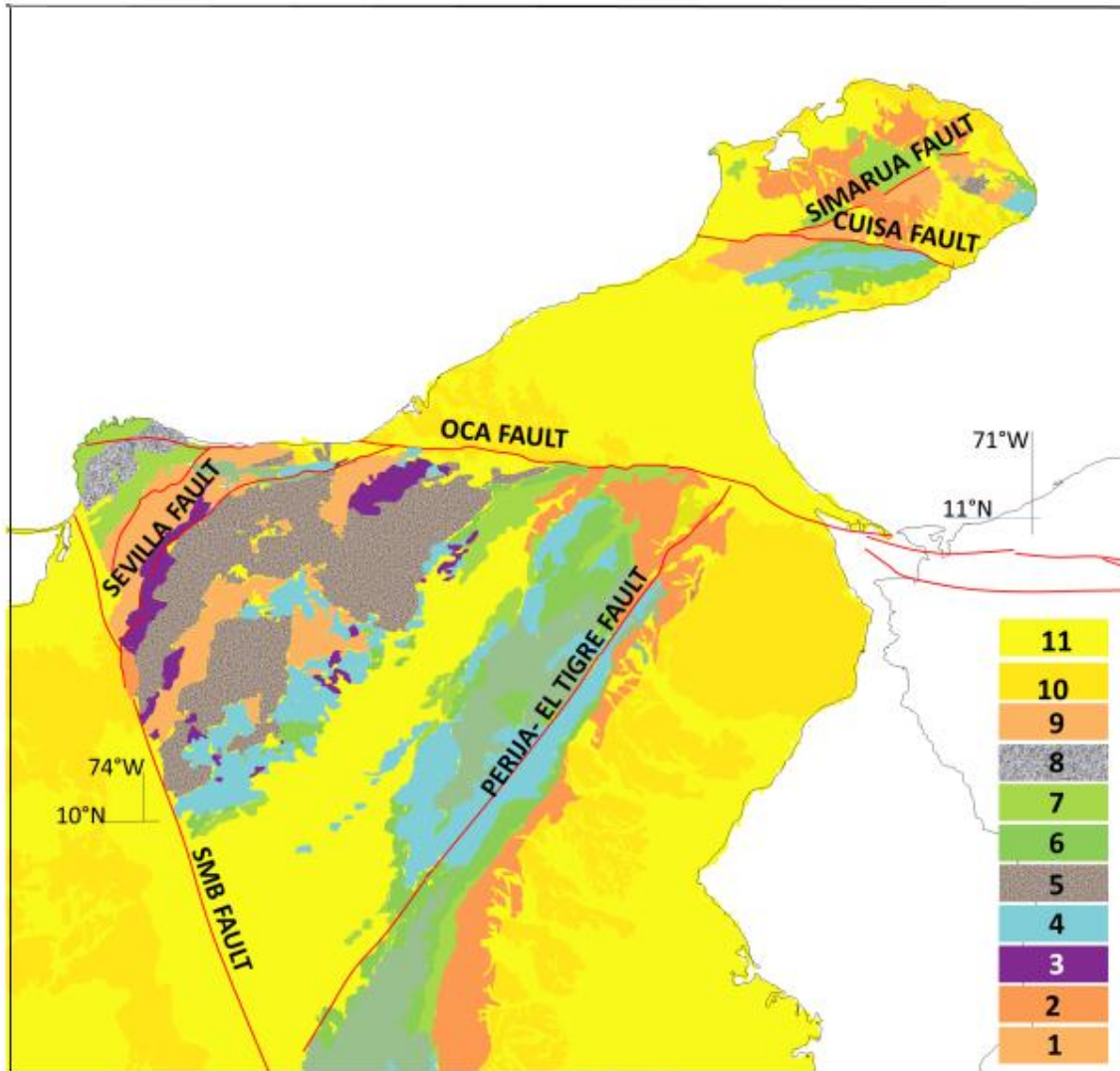


Figura 4. Mapa Geológico general de la región que corresponde al sector oriental de la plataforma Caribe colombiana. 1. Mesoproterozoico Indiferenciado. 2. Paleozoico Indiferenciado. 3. Triásico. 4. Jurásico. 5. Plutonismo Jurásico. 6. Cretáceo Inferior. 7. Cretáceo Superior. 8. Plutonismo Cretácico – Paleógeno. 9. Paleógeno. 10. Neógeno. 11. Cuaternario.

3.1.1. Provincia Geológica Península de la Guajira.

La península de la Guajira exhibe al norte de la falla Cuisa un basamento que abarca en tiempo geológico desde el Mesoproterozoico hasta el Mesozoico tardío (Figura 4). La región al norte de la falla Cuisa se ha denominado Alta Guajira y la falla Simarua es la que

sirve de límite entre una corteza continental y una corteza oceánica de acuerdo a Chicangana (2005), que propone que esta falla es el extremo norte del Sistema de Fallas de Romeral o SFR. Al sureste de la Falla Simarua afloran rocas metamórficas con edad Mesoproterozoico y Paleozoico. Las unidades que están relacionadas con un basamento Grenviliano o Mesoproterozoico en este sector son el Leucogranito de Jojoncito y el Neis de Uray (Chicangana, 2005). Para el Paleozoico se ha asignado a la unidad litológica denominada Metasedimentitas de Alas, la cual está constituida por filitas las cuales están en contacto fallado con las anteriores unidades y son cubiertas de forma discordante por unidades cenozoicas (Rodríguez y Londoño, 2002).

En general estas litologías se presentan en superficie en disposición NE - SO en contacto fallado unas con otras. El Leucogranito de Jojoncito aflora únicamente al sur de la falla Cuisa y emplazadas siguiendo el rumbo de la falla Simarua en contacto tectónico con las rocas asociadas al Neis de Uray se presentan las Formaciones Carpintero, Etpana, Ipaharahu y Jarara que Chicangana (2005) relaciona con la zona de subducción Cretácea que representa el SFR. Estas unidades se constituyen de rocas metasedimentarias e ígneas que sufrieron diversos grados de metamorfismo durante el proceso de subducción que sufrieron tanto la corteza oceánica como los sedimentos que reposaban sobre esta durante el lapso Jurásico Superior - Cretáceo Inferior. En el extremo noreste de la península se presentan de manera esporádica afloramientos de la Formación Paráuinkrein la cual representa a rocas sedimentarias, metasedimentarias y volcánicas con edad Cretáceo Inferior que Chicangana (2005) correlacionó con la Formación Quebradagrande de la Cordillera Central. Esta unidad litológica y las Formaciones Eptana y Jarara presentan mucha afinidad por su contenido de fósiles y de rocas metavolcánicas. También al sur de la falla Cuisa en contacto tectónico con las rocas del Neis de Uray se presentan diversas litologías sedimentarias que corresponden igualmente al lapso Jurásico - Cretáceo y que subyacen discordantes con las secuencias sedimentarias del Paleógeno como los Grupos Cojoro, Cosinas, Yuruma y Cogollo. Durante el Cenozoico la península de La Guajira se caracterizó por la generación de secuencias sedimentarias que representan desde ambientes marinos poco profundos hasta salobres y continentales como las Formaciones Macarao con edad Eoceno, Siamaná con edad Oligoceno, Uitpa para el lapso Oligoceno - Mioceno Inferior, Jimol con edad Mioceno medio, Castilletes con edad Mioceno Superior y la Formación Monguí con edad Plioceno. En esta región las Riodacitas de Ipapure - Cerro La Teta y la Granadorita de Iparure son rocas ígneas de edad Jurásico Inferior que están relacionadas a un magmatismo cuyo origen fue un rift (Chicangana, 2005). El magmatismo Paleógeno relacionado a un arco de islas y/o subducción está representado por el Stock de Parashi de edad Eoceno (Rodríguez y Londoño, 2002; Weber et al., 2009). Al oeste de la falla Simarua en el Cabo de La Vela afloran rocas que se han categorizado recientemente como el Complejo Ultramáfico del Cabo de La Vela (Weber et al., 2009), el cual está compuesto por serpentinitas, gabros y basaltos andesíticos (Figura 5).

La mayor parte de la Baja Guajira se encuentra cubierta por una cobertera sedimentaria compuesta por unidades correspondientes al lapso Pleistoceno - Holoceno cuyo espesor mediante información sísmica no supera 1 km en promedio (Barrero et al., 2007, García et al., 2008).

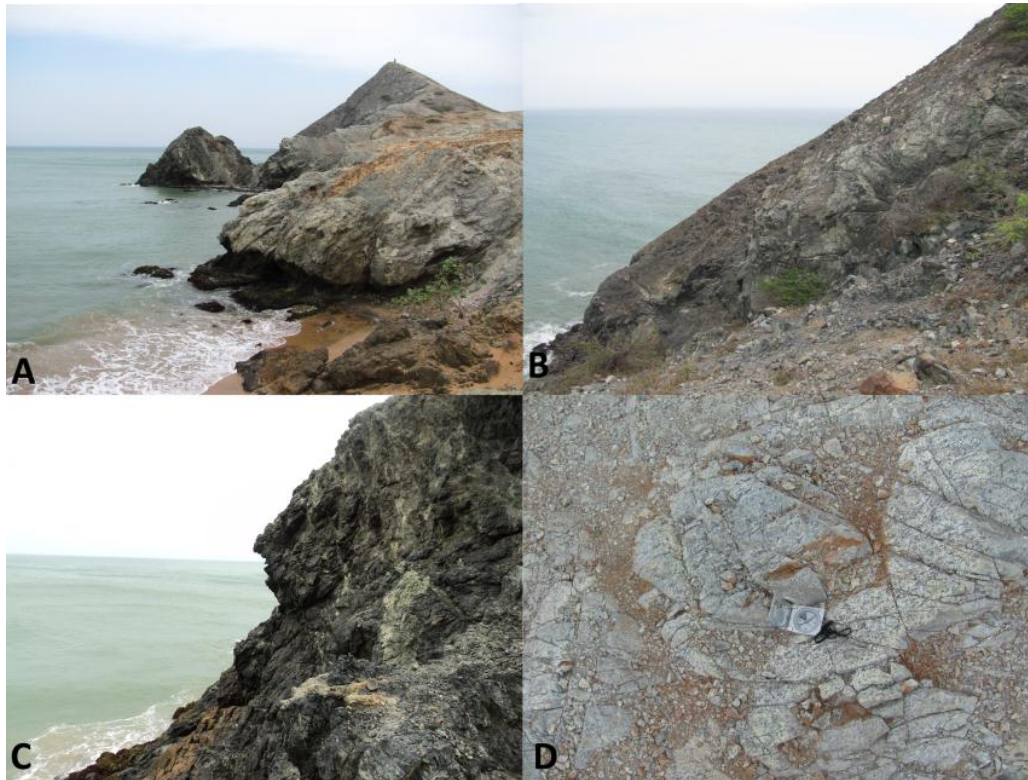


Figura 5. Rocas del sector del Cabo de La Vela. A. Aspecto general del cerro Pilón de Azúcar el cual se constituye principalmente de rocas básicas y ultrabásicas asociadas al Complejo Cabo de La Vela. B. Tectónitas compuestas principalmente por basaltos con serpentina. C. Lavas ultrabásicas serpentinizadas con presencia de magnetita, las cuales están intruidas por un dique compuesto por gabro. D. Gabro serpentinizado muy tectonizado.

Aquí se propone que la península de La Guajira presenta un basamento y unas unidades litológicas que se correlacionan con la cordillera Central y el basamento continental correspondiente al valle del Magdalena y la cordillera Oriental.

3.1.2. Provincia Geológica SNSM - Cuenca Cesar - Ranchería y Serranía de Perijá.

Muchos autores han tomado a la Sierra Nevada de Santa Marta como una entidad geológica independiente. Ejemplo de esto es el reciente trabajo de Montes et al. (2010), que aseguran en un intento por explicar la rotación en sentido horario hallada por ellos en algunos sectores de la SNSM, que este macizo rotó en dicho sentido durante el Cenozoico, produciendo con ello la fragmentación del basamento adyacente al occidente en la Depresión San Jorge – Plato o Valle Inferior del río Magdalena y el acortamiento de la cuenca de Ranchería al norte de la SNSM. Las rotaciones medidas con técnicas de paleomagnetismo en diversos lugares indican que no solo rotó la SNSM para el Cenozoico sino también toda la esquina noroccidental de Suramérica sin excepción. Con esta consideración entonces, se asume aquí que tanto la SNSM como la Cuenca Cesar - Ranchería y la Serranía de Perijá son una sola entidad geotectónica que presentaron una evolución común y única. Los límites tectónicos de esta provincia geotectónica (Figuras 4,

6 y 7) son la Falla de Oca al norte, la Falla Santa Marta – Bucaramanga al oeste y suroeste, y la Falla Perijá - El Tigre al sureste.

3.1.2.1. Sierra Nevada de Santa Marta

El macizo montañoso que define a la Sierra Nevada de Santa Marta o SNSM (Figuras 4 y 6) se encuentra demarcado por tres límites estructurales de primer orden, los cuales son la falla Oca al norte que presenta tendencia dextral, rumbo predominante de N 82°W y un buzamiento desconocido (París et al., 2000), la Falla de Santa Marta - Bucaramanga (FSMB) que presenta tendencia siniestral, un rumbo predominantemente N35°O y un buzamiento al E (Paris et al., 2000; Hernández, 2003 a), y el Lineamiento Cesar que de acuerdo a la cartografía geológica de Tschanz et al. (1969), comprendería las Fallas Cesarito y San Diego que tienen un rumbo predominante de N30°E y un buzamiento desconocido. Además de la componente lateral de las dos primeras fallas mencionadas, vale

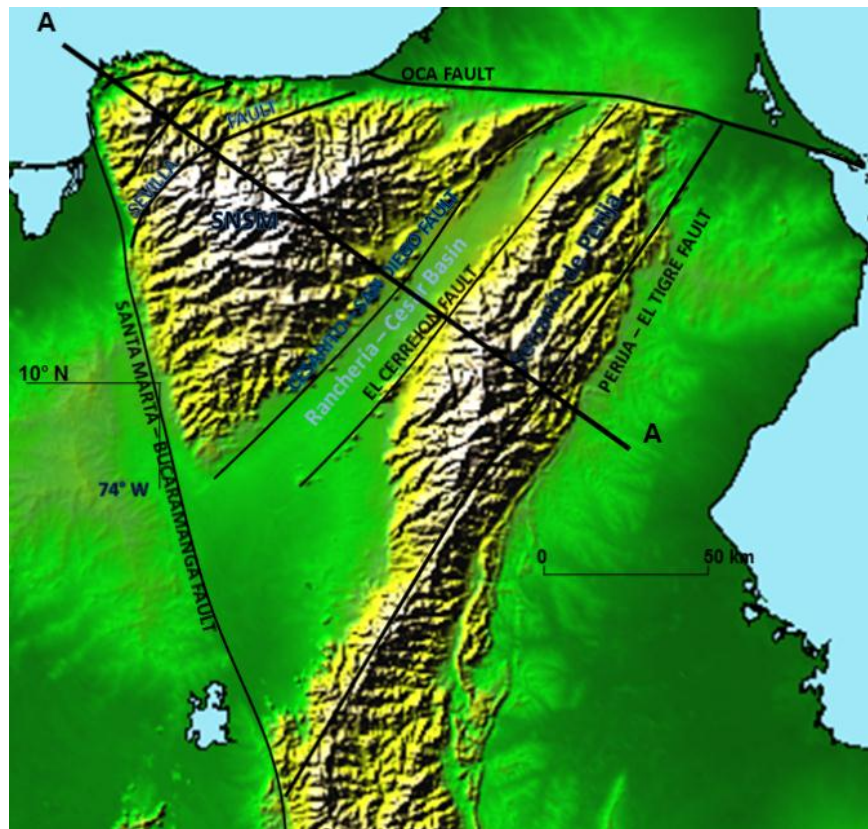


Figura 6. Imagen topográfica base es tomada de NASA/JPL/NIMA, (2004), en donde se muestran los principales elementos estructurales de la región que corresponde a la SNSM, la cuenca Cesar - Ranchería y la Serranía de Perijá. En los números los diversos terrenos y regiones que constituyen este sector de la plataforma oriental del Caribe colombiano: 1. Terreno Santa Marta. 2. Terreno Sevilla. 3. Terreno Sierra Nevada. 4. Cuenca Cesar – Ranchería. 5. Serranía de Perijá. En trazos negro el límite entre los terrenos Santa Marta y Sevilla. La Línea A - A corresponde al perfil de la figura 7.

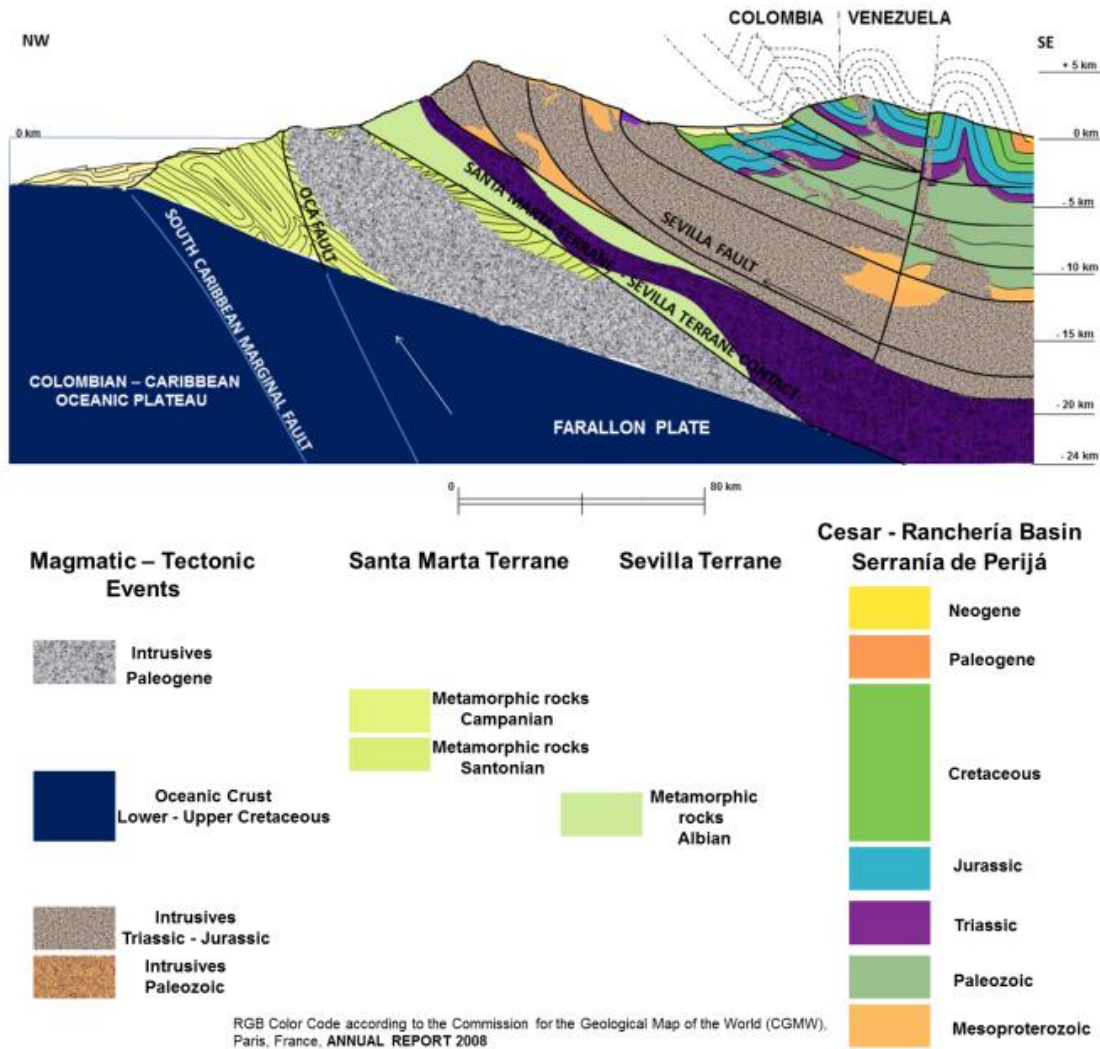


Figura 7. Perfil hipotético regional de la SNSM, Cuenca de Cesar - Ranchería y la Serranía de Perijá que se basó en la geología regional realizada en la región por Tschanz et al. (1969 y 1974), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2005), Gómez et al. (2007 a y b) y PDVSA (2010). La Falla Marginal del Sur del Caribe es tomada de Toto y Kellogg (1992).

la pena recalcar que todas tienen una tendencia vertical inversa. La Falla de Oca en la esquina noroccidental de este macizo en las vecindades de la ciudad de Santa Marta se denomina Falla Jordan (Tschanz et al., 1969), la cual es su prolongación occidental. En general, la SNSM se divide en tres terrenos diferentes, que derivan de la apreciación inicial de Tschanz et al. (1974), como provincias geotectónicas (Figura 6) que son los terrenos Santa Marta, Sevilla y Sierra Nevada. El Terreno Sierra Nevada se ubica al sur del macizo, que está separado del terreno Sevilla al norte por la Falla Sevilla, al oeste por la FSMB y al este por la Falla Cesarito - San Diego. Este terreno constituye el basamento de la Sierra Nevada de Santa Marta y está constituido por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que abarcan edades van desde el Mesoproterozoico hasta el Cenozoico (Tschanz et al., 1974). La conducta tectónica en estas litologías se relaciona con el régimen de esfuerzos de la FSMB y otras componentes estructurales del orogeno en su interacción al norte con el frente de la Falla de Oca durante el Neógeno. Este basamento se ha

correlacionado con el basamento grenviliano de México (Complejo Oaxaquense) y con los macizos de Garzón y Bucaramanga de la cordillera Oriental y el basamento Mesoproterozoico que aflora de manera esporádica en la cordillera Central y la Serranía de San Lucas (Priem et al., 1989; Restrepo et al., 1997; Maya, 2001; Keppie et al., 2001, 2003 y 2008; Chicangana, 2005; Cardona et al., 2010a, Ramos, 2010), el cual igualmente se correlaciona con el basamento de la península de La Guajira. En la SNSM el basamento presenta intrusiones con edades correspondientes al lapso Pérmico – Triásico (Cardona et al., 2010b) y Jurásico junto con vulcanitas Jurásicas. Éste está recubierto parcialmente y de manera discordante por rocas sedimentarias con edades correspondientes al Paleozoico Inferior (lapso Cámbrico - Ordovícico), Paleozoico Superior, Triásico Inferior, Jurásico y Cretáceo. También hacía los bordes del macizo se presentan algunos paquetes sedimentarios correspondientes al Eoceno y el Neógeno (Figura 4).

El terreno Sevilla que aflora en una faja estrecha y combada (Figuras 4, 6 y 7), presenta como constituyente litológico al denominado por Tschanz et al. (1969, 1974), Complejo Metamórfico de Sevilla. Esta unidad se compone de neises y esquistos con naturaleza mafica y ultramafica (Tschanz et al., 1974). El terreno Sevilla presenta como incertidumbre su edad y tradicionalmente se ha seguido en este criterio a Tschanz et al. (1969, 1974), que la han señalado forzosamente como Proterozoico. El terreno Sevilla está representado por unidades estratigráficas como el Neis de Buritaca, el Neis Los Muchachitos, las Metamorfitas de San Pedro de La Sierra (Hernández, 2001) y la denominada Rocas Metamórficas No Diferenciadas. Todas estas unidades estratigráficas por su naturaleza petrológica se pueden asociar con el metamorfismo de una corteza oceánica junto con sus sedimentos en el sentido planteado por Hacker et al. (2003 a y b).

El terreno de Santa Marta comprende dos tipos de litologías (Figura 4). Una compuesta de rocas metamórficas de muy bajo a medio grado que conforman las Formaciones Cinto, Esquistos de Gaira, Esquistos de San Lorenzo, Punta Betín, Rodadero y la Filita de Taganga (Cardona et al., 2010c), y otra que se compone de un gran cuerpo ígneo intrusivo denominado al Batolito de Santa Marta (Tschanz et al., 1969, 1974; Hernández, 2003 a; Gómez et al., 2007 a y b). En este último se observan xenolitos que se componen de fragmentos de la primera litología principalmente. La edad demostrada de estas rocas abarca el lapso Cretáceo Superior - Paleógeno (Cardona et al., 2010c).

3.1.2.2. Cuenca Cesar - Ranchería

La Cuenca Cesar - Ranchería se encuentra limitada al Oeste por las Fallas Cesarito y San Diego (Figura 6), y al Este por la falla de cabalgamiento de El Cerrejón (Kellogg, 1984), al norte por la falla Oca y al sur por la FSMB en la estribación norte de la cordillera Oriental, en su interceptación con el extremo sur de la Falla Perijá - El Tigre (Kellogg, 1984). Se trata de una cuenca retroarco o una retroarc foreland basin en el sentido de Miall (2000), en donde afloran de manera parcial (Figura 4) hacía el norte rocas sedimentarias del lapso Cretáceo Superior - Paleógeno Inferior y rocas volcánicas asociadas a la Riolita de Golero con edad Cretáceo Inferior (Tschanz et al., 1969). El resto de la cuenca y sobre todo hacía el sur de ella, se encuentra cubierta por depósitos fluvio - lacustres predominantemente con un rango de edad que varía entre el Pleistoceno y el Holoceno. Se estima que la cobertera Cenozoica de la cuenca Cesar - Ranchería presenta un espesor que varía entre 0,5 y 1 km de

acuerdo a la información sísmica (Olshansky et al., 2006; Barrero et al., 2007). Olshansky et al. (2006), muestran con las líneas sísmicas para la parte sur de la cuenca una relativa proximidad hacia superficie de sedimentos correspondientes al lapso Cretáceo - Paleógeno con interés económico en cuanto a su potencial de reservorio de hidrocarburos y confirman con las líneas ANH-CR-2005 (Figura 9), que se ubican hacia la estribación occidental de la Serranía de Perijá, una serie de fallas que cumplen con el papel de planos cabalgantes en un estilo estructural que confirma lo planteado inicialmente por Kellogg (1984) tanto para esta cuenca como con la Serranía de Perijá.

3.1.2.3. Serranía de Perijá

La Serranía de Perijá es un orogeno que resultó del levantamiento de una fracción del basamento delimitada por dos fallas de cabalgamiento, la Falla Cerrejón en Colombia al occidente y la Falla Perijá - El Tigre en Venezuela al oriente (Kellogg, 1984, Audemard y Audemard, 2002). La estratigrafía que exhibe la Serranía de Perijá (Figura 4) corresponde al mismo basamento de la SNSM y de la península de La Guajira. Con respecto a esto PDVSA (2010), basándose en las apreciaciones del Léxico Estratigráfico Venezolano correlacionan tentativamente a la denominada “Serie” Perijá con el Neis de Santo Domingo o la Serie Iglesias de los Andes de Mérida, aunque el grado de metamorfismo es diferente para ambas unidades (PDVSA, 2010). En Venezuela a esta unidad no se le ha establecido con seguridad el rango de edad, ya que estiman que esta va desde el Proterozoico hasta el Paleozoico sin precisar, mientras que en Colombia el rango aceptado ha sido el del Paleozoico Inferior para las rocas metamórficas y Paleozoico Superior para las rocas sedimentarias (Arias y Morales 1999; Rodríguez y Londoño, 2002). Kellogg (1984) considera para estas unidades una edad Paleozoico sin diferenciar, las cuales en el sector venezolano se encuentran intruidas por el Granito de El Palmar cuya edad que abarca el lapso Pérmico - Triásico. Dicho cuerpo magmático hacia el norte está cortado por la Falla El Tigre (USGS, 2005; PDVSA, 2010). Se destaca encima de estas litologías las rocas sedimentarias de la Formación La Quinta con edad Jurásico Superior, la cual es correlacionable con el Grupo Cojoro de la Península de La Guajira y la Formación Girón de la cordillera Oriental en Colombia (Royero y Clavijo, 2001; PDVSA, 2010). Se destacan además rocas volcánicas como ignimbritas en el lado colombiano (Arias y Morales 1999), las cuales se pueden correlacionar con unidades como la Ignimbrita de los Clavos de la SNSM (Tschantz et al., 1974; Arias y Morales 1999), y rocas sedimentarias correspondientes al lapso Cretáceo Superior - Mioceno, las cuales son correlacionables con las aflorantes en la península de La Guajira.

En síntesis la Serranía de Perijá es una unidad geotectónica que forma parte de un basamento común con una historia evolutiva similar al borde oriental de la SNSM, la península de La Guajira y la cordillera Oriental.

4. RESULTADOS

4.1. Tectónica activa y reciente

Con la ayuda de imágenes tipo LANDSAT ETM + 7 (Figura 8), se ha verificado a una escala regional la deformación y movilidad tectónica reciente de esta región con los ejemplos que se muestran en la figura 8.

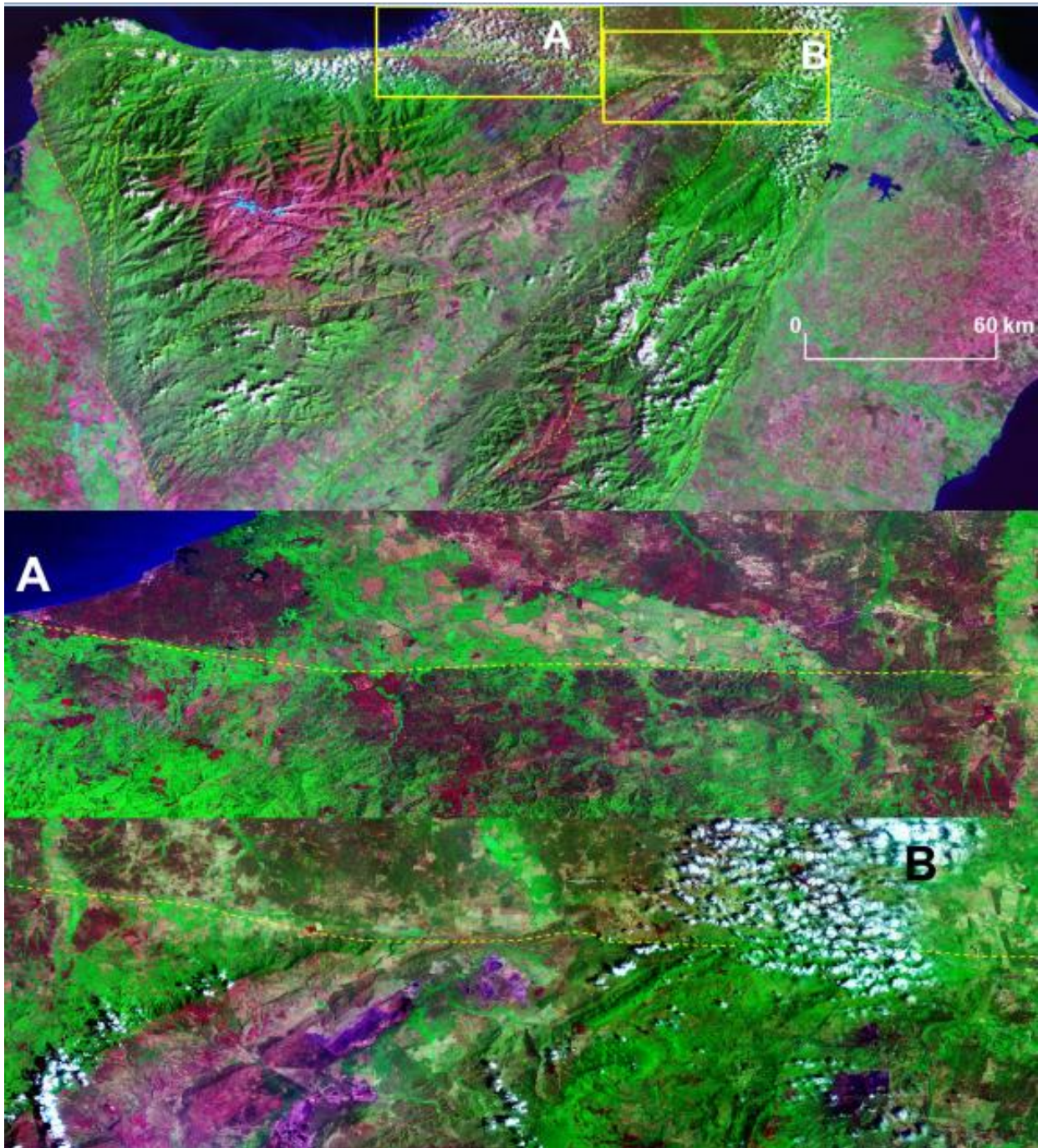


Figura 8. Imágenes LANDSAT 7 ETM+ que muestra los rasgos morfoestructurales de la Falla de Oca en el sector correspondiente a Colombia en A y B.

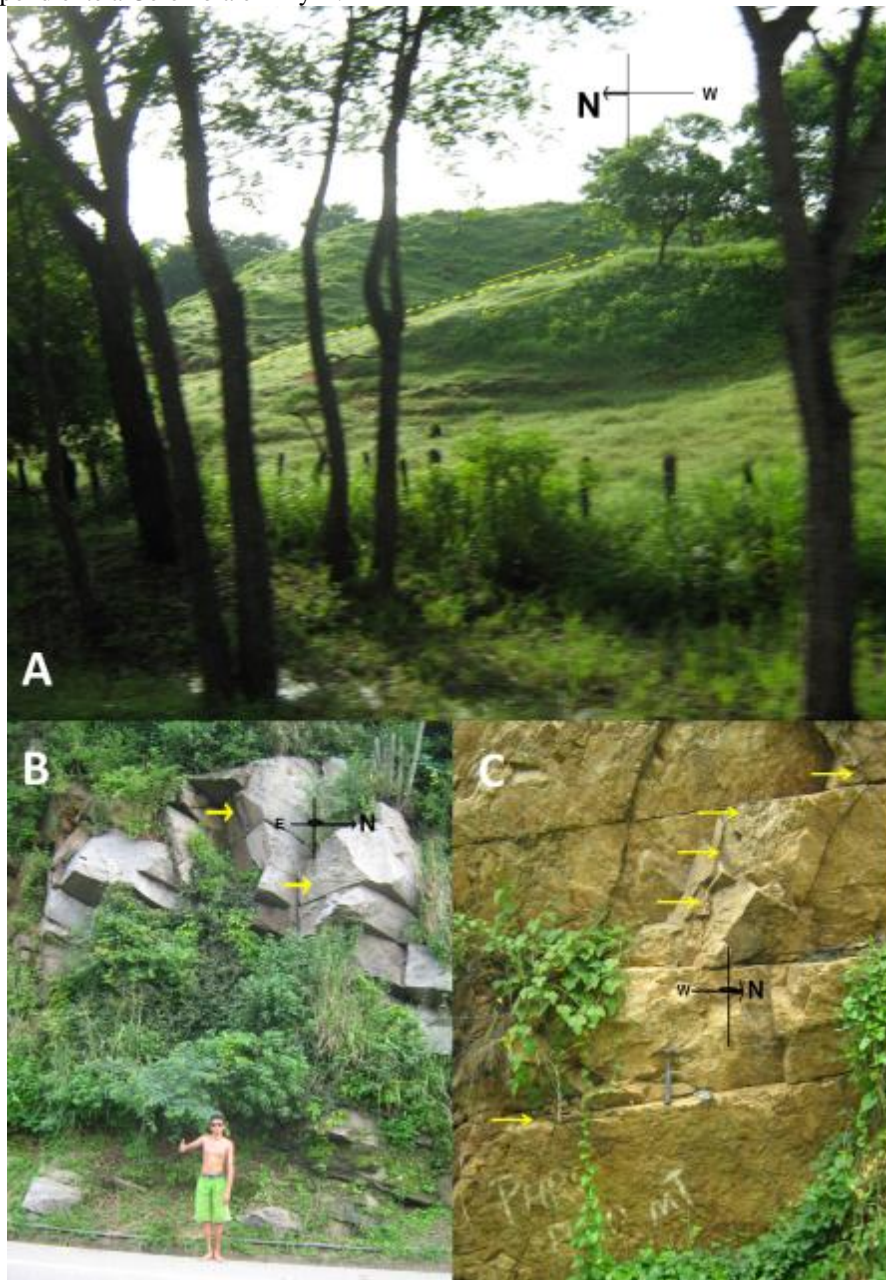


Figura 9. Evidencias de neotectónica con cerca de un millón de años se registran en rocas de la Sierra Nevada de Santa Marta entre este edificio orogénico y la llanura que define la región de la Baja Guajira cerca de la localidad de Campana Nuevo en el municipio de Dibulla en el Departamento de la Guajira, en donde están afectados por la actividad de la falla, sedimentos correspondientes al lapso Mioceno – Plioceno de la Formación Monguí en A. En vecindades de la Falla de Oca como en los granitoides del Batolito de Santa Marta en B y en los neises del Neís de Los Muchachitos en C.

En la figura 8 en A y B respectivamente, se puede seguir sin mayor dificultad la expresión morfotectónica de la falla Oca que define un límite topográfico de primer orden en éste sector de Suramérica. Las huellas de la más reciente actividad tectónica de esta falla a una escala local y que dejan evidencias de movilidad para cerca de un millón de años se pueden constatar en rocas de la Sierra Nevada de Santa Marta como en los granitoides del Batolito de Santa Marta, las rocas del Neis de Los Muchachitos y entre la cuenca Cesar - Ranchería y la Baja Guajira (Figura 9).

Desde la Geofísica regional la disposición geotectónica de éste sector de la plataforma Caribe colombiana se verifica con el mapa de anomalías totales de Bouguer de Colombia y el mapa de intensidad magnética total de Colombia (ANH, 2008 y 2009). Con estos (Figura 10), se pueden inferir la disposición en profundidad de los grandes cuerpos litológicos que constituyen la litosfera y el alcance igualmente litosférico que presentan límites estructurales como la falla Oca, la FSMB y la falla Perijá - El Tigre. Para el orogeno compuesto por la SNSM, la Cuenca Cesar - Ranchería y la Serranía de Perijá, el mapa de intensidad magnética total no muestra los grandes rasgos estructurales definidos por las fallas Oca, FSMB y Perijá - El Tigre, mientras que el mapa de anomalías totales de Bouguer las confirma ya que deja constancia de los cambios en densidad asociados a las cuencas que lo bordean. Para la Península de La Guajira el mapa de anomalías totales de Bouguer muestra un fuerte contraste entre las regiones que definen a la Alta y la Baja Guajira, ya que infiere una profundización del basamento al sur de la península junto con el incremento del espesor de la cobertera sedimentaria del Neógeno en éste sector. Esto define de manera clara la presencia de las fallas Cuisa al norte y Oca al sur.

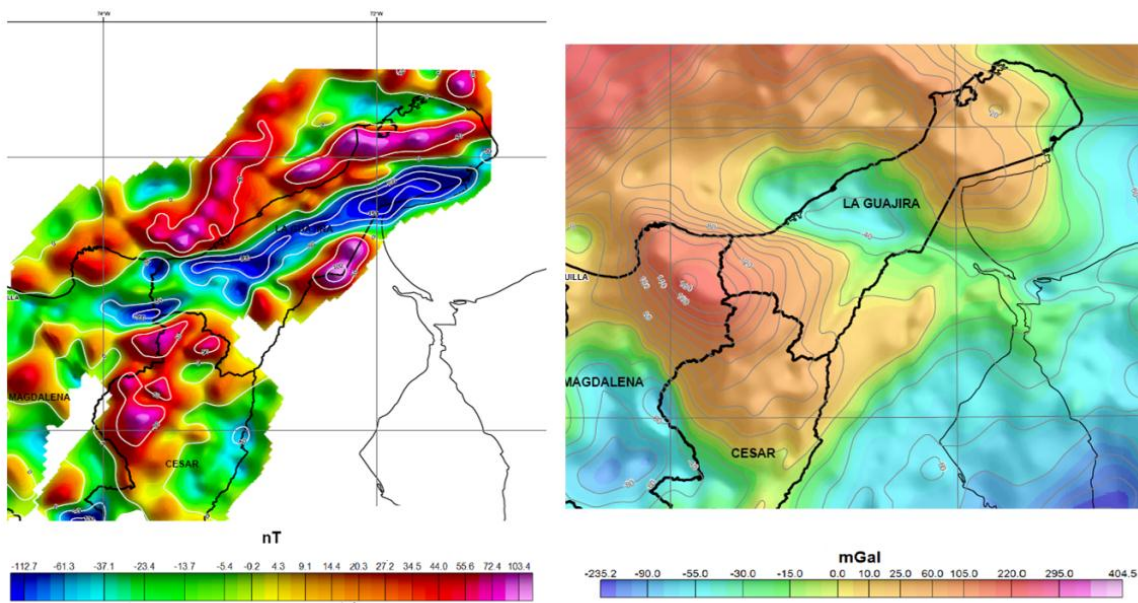


Figura 10. Información geofísica regional como anomalías magnéticas a la izquierda, y de gravimetría a la derecha, la cual fue tomada aquí de los mapas de anomalías de intensidad magnética de Colombia y de anomalías totales de Bouguer de Colombia de la agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2008 y 2009).

Con respecto a la naturaleza de los constituyentes litológicos que divide la falla Simarua en la alta Guajira, el mapa de las anomalías totales de Bouguer no indica un límite estructural que señale un límite entre una corteza de origen oceánico con una corteza de origen continental, como sí lo sugiere el contraste de los valores de intensidad magnética.

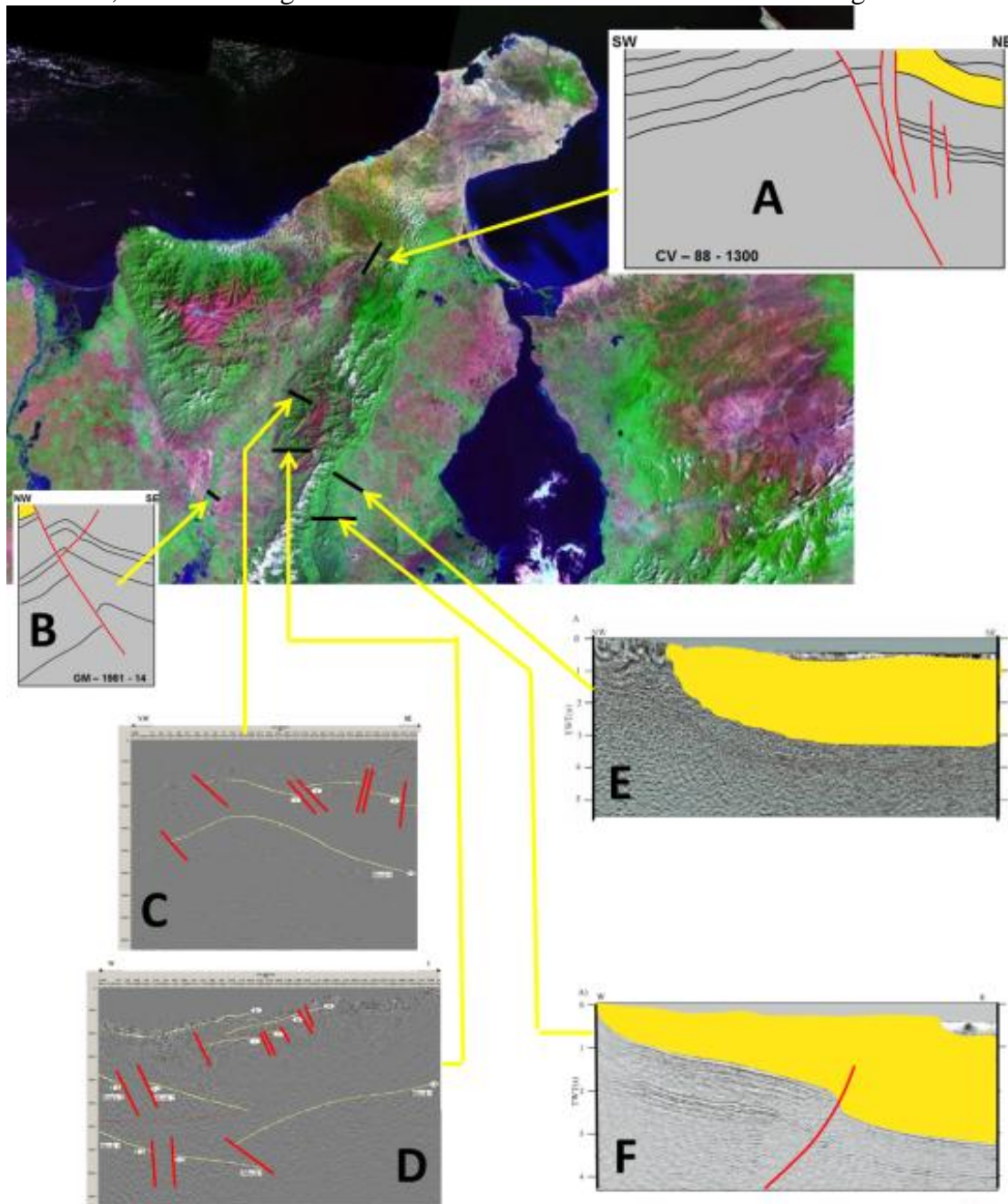


Figura 11. Información sísmica para la cuenca Cesar - Ranchería perfiles A y B tomados de Cediél et al. (1998) y para la Serranía de Perijá, perfiles C y D tomados de Olshansky et al. (2006), y E y F tomados de Duerto et al. (2006). Para los perfiles A, B, E y F se repinta con el color RGB 255/230/25 el cual representa el Neógeno de acuerdo al código de colores de la Comisión para el Mapa Geológico del Mundo, mostrando con éste solo las unidades sedimentarias que pertenecen al Mioceno y el Plioceno. Dichas unidades sufrieron cambios estructurales y deformación durante los últimos 3 millones de años, mientras que los perfiles C y D

muestran los estilos estructurales relacionados a unidades Cretácico – Paleógenas plegadas y limitadas por cabalgamientos.

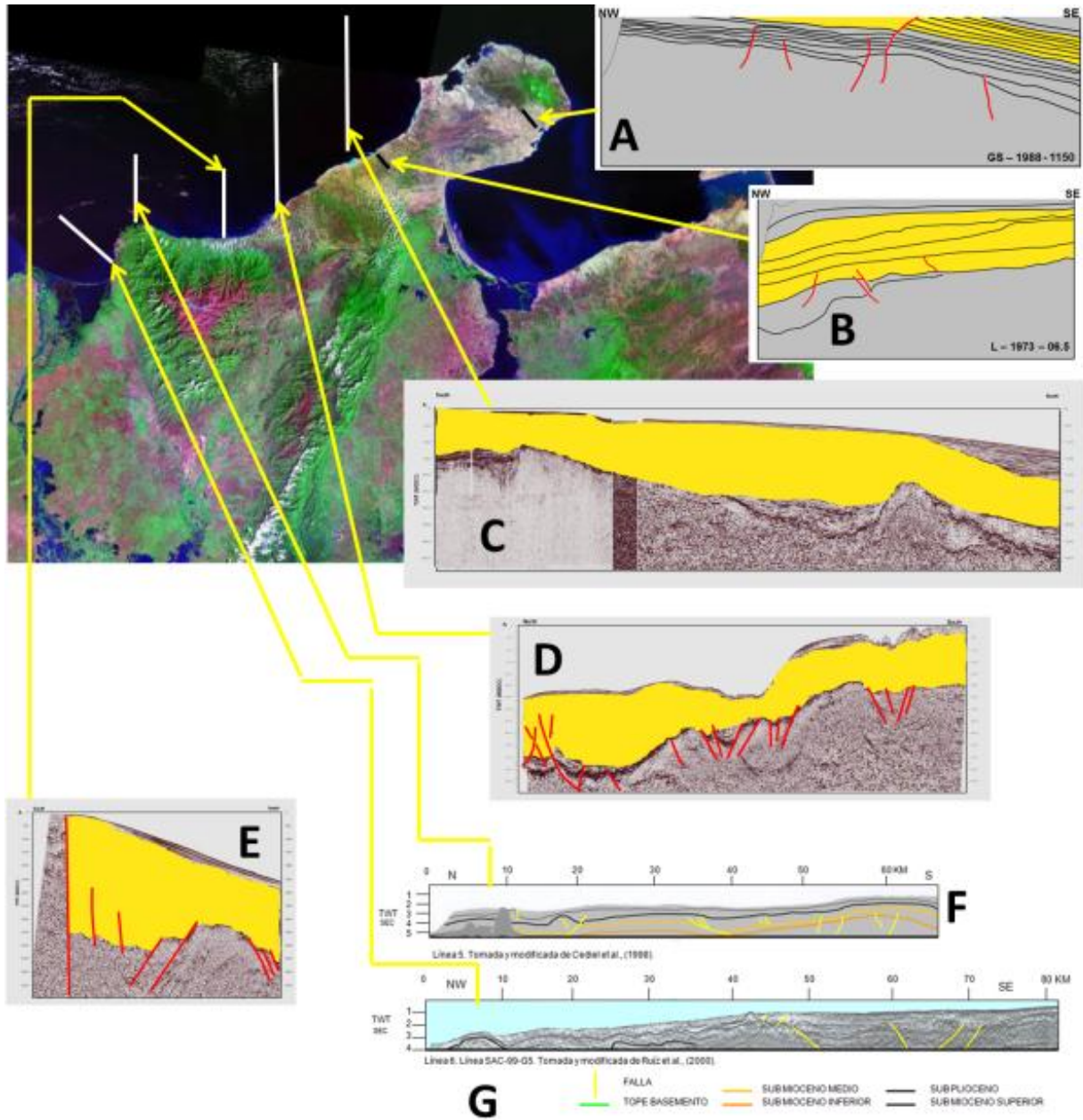


Figura 12. Información sísmica para la región de la Alta Guajira con los perfiles A y B tomados de Cediel et al. (1998), los bordes de la Península de La Guajira para su margen occidental en offshore con los perfiles C y D tomados de Vence (2008), y los bordes de la Sierra Nevada de Santa Marta en offshore con los perfiles E tomado de Vence (2008) y, F y G tomados de Cediel et al. (2005). Para los perfiles A, B, C, D y E se repinta con el color RGB 255/230/25 el cual representa el Neógeno de acuerdo al código de colores de la Comisión para el Mapa Geológico del Mundo mostrando con éste solo las unidades sedimentarias que pertenecen al Mioceno y el Plioceno. Dichas unidades sufrieron cambios estructurales y deformación durante los últimos 3

millones de años. Los perfiles F y G delimitan dicho lapso de tiempo geológico con sus respectivas unidades sedimentarias con los límites que corresponden al intervalo sub Mioceno Inferior - sub Plioceno.

Este último mapa muestra valores de intensidad magnética altos al noroeste de la falla Simarua y valores bajos al sureste de esta. Los valores altos que presentan las anomalías totales de Bouguer hacia el extremo NO de la SNSM y el sector del Cabo de la Vela en la Alta Guajira, revelan la presencia de una corteza oceánica muy próxima a superficie bajo estos sectores. Para la alta Guajira esto se constata de manera definitiva con los valores altos de las anomalías de intensidad magnética, con lo que nos ayuda de esta manera para el sector de la SNSM, definir la geometría de un plano de subducción muy próximo y que está relacionado a la placa Farallón tal como lo señalamos con el perfil que mostramos con las figuras 6 y 7. Dicho placa cesó su subducción durante el Eoceno Medio cuando se acrecionó la placa Caribe en éste sector.

Las líneas sísmicas previamente interpretadas en éste trabajo fueron tomadas de Cediél et al., (1998), Duerto et al. (2006), Olshansky et al. (2006) y Vence (2008). Con esta información se verificó la geología estructural y se encontró que éste sector de la plataforma Caribe colombiana ha presentado en los últimos 10 millones de años un fuerte cambio estructural que se evidencia por las fuertes deformaciones que han sufrido las unidades sedimentarias e ígneas cuya edad no superan en edad el lapso Mioceno - Plioceno, lo cual se verifica observando la disposición estructural y relación estratigráfica de las unidades litológicas pertenecientes al Neógeno, las cuales son indicadas aquí en los perfiles con el código de color RGB 255/230/25 de acuerdo a la Comisión para el Mapa Geológico del Mundo (Figuras 4, 6, 11 y 12). El resultado de la evolución de la convergencia final ocurrida entre la Placa Caribe con el margen noroccidental de Suramérica durante el lapso Neógeno Superior - Cuaternario se puede observar en los perfiles que corresponden a la Cuenca Cesar - Ranchería, la Península de La Guajira, la Serranía de Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta (Figuras 11 y 12).

4.2. Sismicidad

Desde la instalación en la década de 1990 se ha observado para esta región una sismicidad periódica con $3.0 \leq M_L \leq 5.0$ (Figura 13) que se ubica hacia la región central y sur de la península de La Guajira y hacia la parte central y suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta. Igualmente la red sismológica global (NEIC) ha localizado para estas mismas regiones sismos cuando y de forma excepcional estos presentan una magnitud de momento (M) $\geq 4,5$. El inconveniente técnico es que estas redes sismológicas poseen un número muy pequeño de estaciones en la región y su diseño ha sido establecido para determinar la sismicidad regional y no la sismicidad local.

La profundidad focal varía de entre 0 y 45 km, demostrando con esto que el registro somero captado por las redes son de naturaleza intraplaca y no sublitosférica.

Históricamente para la región oriental de la plataforma Caribe colombiana es relevante el sismo del 22 de mayo de 1834 que afectó al mausoleo de Simón Bolívar y produjo la destrucción de edificaciones en la ciudad de Santa Marta. Los efectos de este sismo en Santa Marta están ampliamente documentados, y señalan que Santa Marta la cual tenía en esa época aproximadamente 4500 habitantes, sufrió daños materiales cuantiosos para la

época dejándola en la ruina. El sismo en esta ciudad produjo la destrucción de más de 100 casas y las cinco iglesias que tenía en ese tiempo incluyendo entre estas a la catedral (Bermúdez, 1997; Viloria de la Hoz, 2000). Este sismo ha servido de referencia para indicar el alcance de la amenaza sísmica que puede tener la falla Oca (Paris et al., 2000), sin embargo para Santa Marta no se ha considerado a la falla Oca como la principal causa de la amenaza sísmica para la ciudad, sino a la falla Santa Marta - Bucaramanga (Hernández, 2001), a pesar de que la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, estableció que la falla de Oca contribuye con cerca del 70% de la amenaza sísmica para la

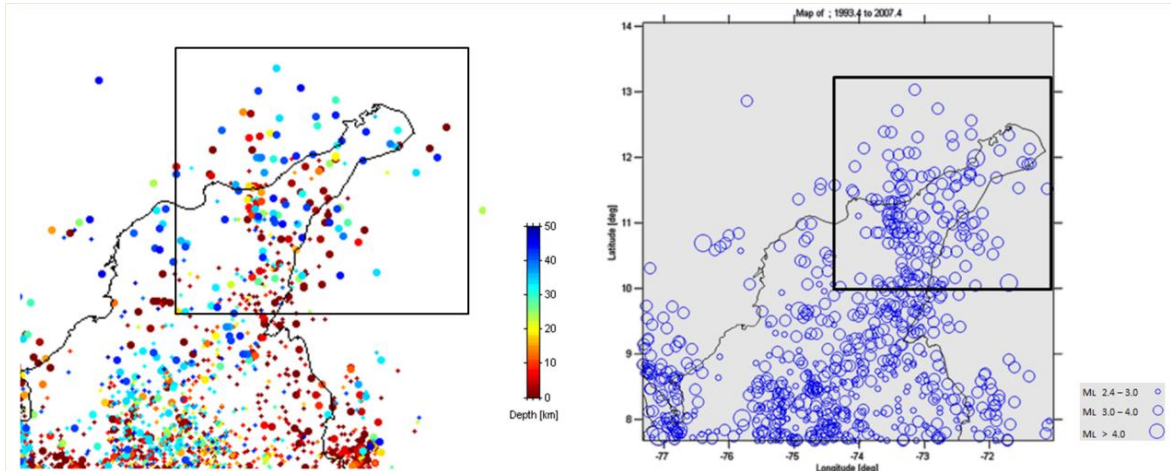


Figura 13. Sismicidad registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC - INGEOMINAS, 2008), para nuestra zona de interés en el recuadro, con la profundidad de los focos a la izquierda y la magnitud local (M_L) a la derecha.

ciudad (AIS – INGEOMINAS, 1996). Un sismo reciente ocurrido el 20 de febrero de 2004 fue reportado por la RSNC con magnitud $M_L = 6.1$ y por el NEIC con $M_W = 4.6$. En ambos casos el foco se ubicó con una profundidad $h \leq 50$ km. Este sismo muestra un mecanismo focal rumbo deslizante de acuerdo al CMT (Figura 14) de la Universidad de Harvard (Harvard University, 2011), el cual se interpreta como la transcurrencia dextral que la placa Caribe presenta con respecto a la plataforma continental en esta región, en este caso el plano de la Falla Oca.

Por último está el sismo con $M_L = 3.8$ con un foco con profundidad < 30 km que ocurrió el 26 de diciembre de 2009 y que la RSNC localizó a 25 km al noroeste de la ciudad de Valledupar en la zona de influencia de las Fallas Cesarito - San Diego al SE de la SNSM (Figura 15). Para finales de 2009 y principios de 2010 una serie de sismos se presentaron en la región de la Baja Guajira los cuales fueron registrados por la RSNC. Dichos eventos ocurrieron la zona de influencia de la Falla Cuisa que divide las regiones de la Alta y Baja Guajira.

Start date: 2004/2/20 End date: 2004/2/20
 8 <=lat<= 14 -75 <=lon<= -71
 0 <=depth<= 60 -9999 <=time shift<= 9999
 0 <=mb<= 10 0<=Ms<= 10 0<=Mv<= 10
 0 <=tension plunge<= 90 0 <=null plunge<= 90

Results

022004B NORTHERN COLOMBIA

Date: 2004/ 2/20 Centroid Time: 11:16: 1.9 GMT
 Lat= 10.92 Lon= -73.90
 Depth= 54.3 Half duration= 0.6
 Centroid time minus hypocenter time: 2.1
 Moment Tensor: Expo=23 1.330 -2.150 0.812 -0.177 -0.527 0.087
 Mw = 4.8 mb = 4.9 Ms = 0.0 Scalar Moment = 1.91e+23
 Fault plane: strike=120 dip=51 slip=133
 Fault plane: strike=244 dip=56 slip=50



End of events found with given criteria.

See the [CMT project](#) web page for more information on CMTs.

Please [email comments](#).
 Last modified: 2006-09-26

Figura 14. Mecanismo focal del sismo del 20 de febrero de 2004 calculado por el proyecto CMT de la Universidad de Harvard (Harvard University, 2011).

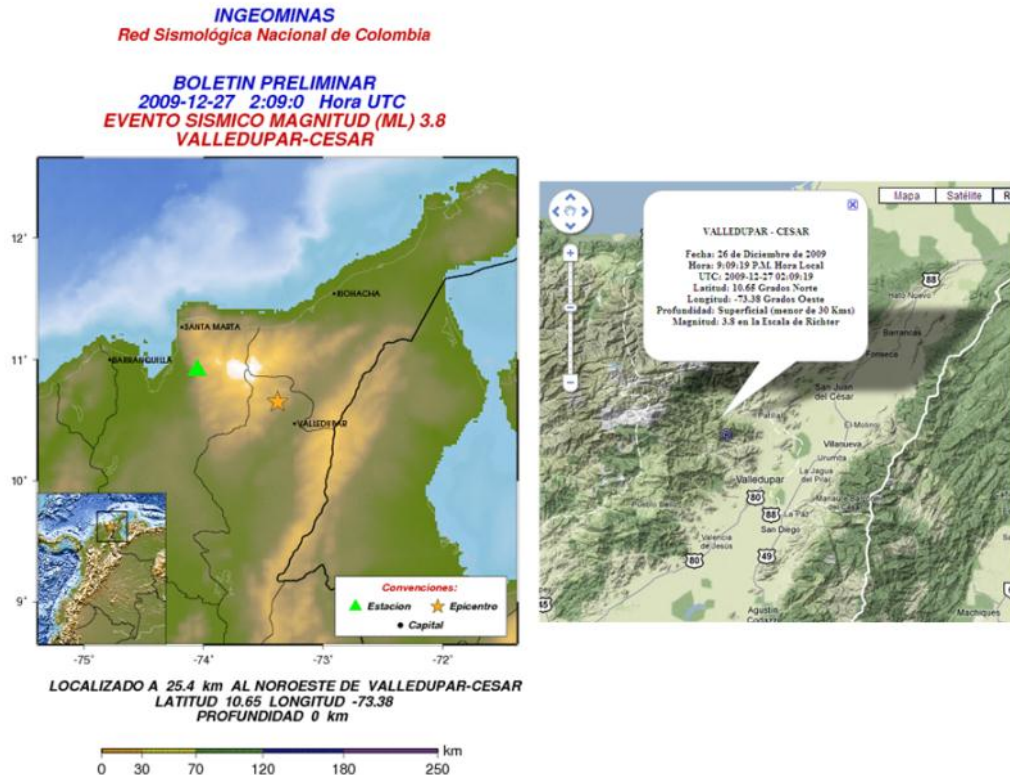


Figura 15. Reporte de la RSNC para el sismo del 27 de diciembre de 2009, el cual ocurrió muy cerca de la ciudad de Valledupar.

4.2. Aspectos Geodésicos

Con las estaciones GNSS permanentes de operación continua del proyecto “Implementación de la Red Nacional de Estaciones Geodésicas Satelitales GPS con propósitos geodinámicos” - GEORED del Servicio Geológico Colombiano - INGEOMINAS (Mora y López, 2011), se realizó la observación durante el lapso 2009 hasta 2011 del movimiento relativo de la Estación ALPA (Riohacha) con respecto a la estación VDUP (Valledupar). En esta observación se observa que ALPA tiene una dirección SE con respecto al resto de Suramérica (Figura 16).

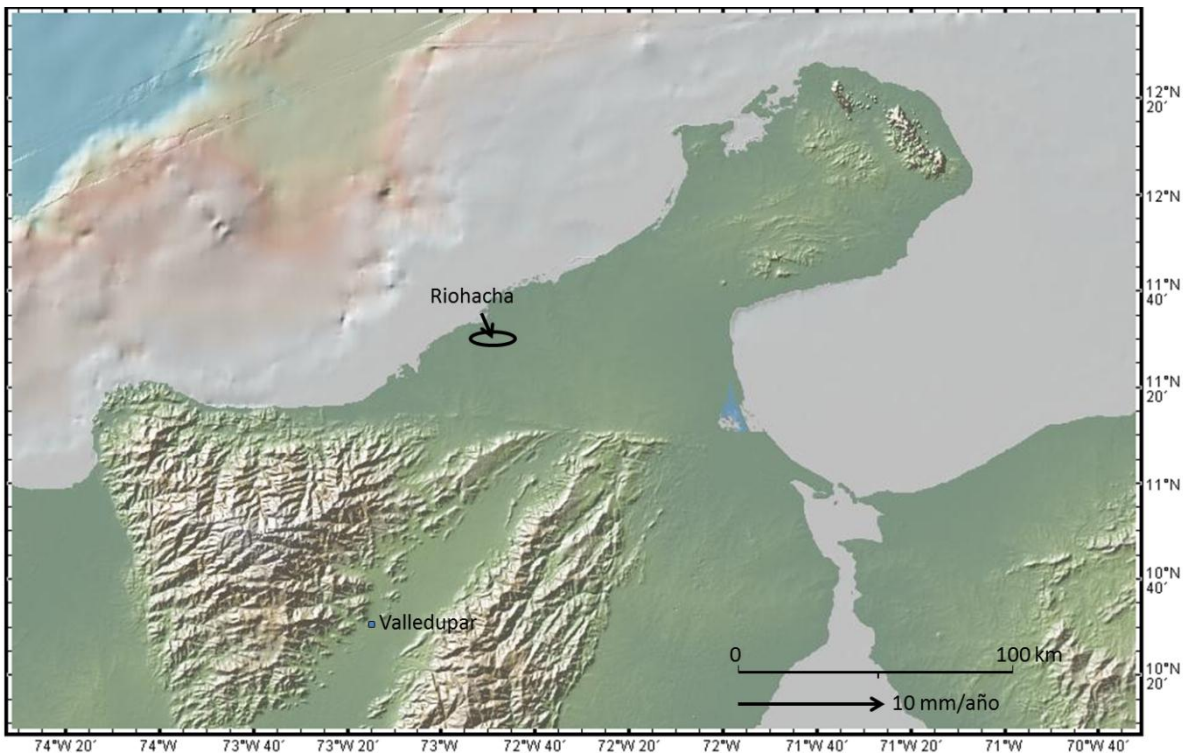


Figura 16. Movimiento relativo de la estación ALPA (Riohacha) con respecto a Valledupar (VDUP). Los vectores de velocidad están expresados en IRTF2005. Esta verificación fue realizada en el proyecto GEORED por Mora y López (2011).

De acuerdo a este desplazamiento de la estación ALPA, Chicangana et al. (2011) proponen que la sismicidad que se observa en esta región, la cual ha sido también registrada por la red sísmológica global, se debe al empuje que la placa Caribe ejerce sobre la península de La Guajira en su desplazamiento en dirección E, generando un campo de esfuerzos regional en dirección ESE, por lo que la península se está moviendo hacia el E a lo largo de su contacto con el norte de Suramérica que está definido por la falla Oca. La acumulación de esfuerzos a la que se encuentra sometida esta gran falla, ha producido grandes sismos como el que afectó a la ciudad de Santa Marta en 1834 (Paris et al., 2000) y en el occidente de Venezuela en tiempos prehistóricos que calculados desde evidencias paleosismológicas han presentado magnitudes (M_S) superiores a 7.0 (Audemard, 1996).

4. DISCUSION

Villagómez et al. (2011), indican desde el método de trazas de fisión en apatito, que el último enfriamiento de la corteza en la SNSM data del Mioceno Medio (15 m.a.). Estos autores señalan además que ha pasado muy poco tiempo para que el desarrollo de la topografía que se observa en la actualidad en la SNSM justifique la corrosión de las trazas fósiles, indicando que con la fuerte tasa de erosión actual presente por el clima en la región (> 2m/año) y la gran altura que exhibe el macizo de la SNSM (5.775 mt. s.n.m), solo se habrían requerido 1 o 2 millones de años como máximo, para poder conservarse la topografía actual del macizo. De acuerdo a lo anterior entonces, el enfriamiento cortical no obedece en este caso a la reciente exhumación de los basamentos que exhibe éste orogeno, y posiblemente dicho levantamiento orogénico se deba un efecto geodinámico reciente derivado del efecto de la colisión o subducción de un seamount o por la adición no equilibrada de corteza dentro de la SNSM (Spikings, 2011), aunque también puede obedecer a un rebote astenosférico producido por el traslado de la cuña astenosférica bajo éste sector cuando se ajustó de manera definitiva la placa Caribe durante el Neogéno Tardío.

Aquí se propone que la exhumación inicial del basamento de la SNSM fue producido por la colisión de la placa Caribe con el margen continental durante el Eoceno y la topografía actual de la SNSM se desarrolló desde el Plioceno Temprano. En éste esquema el Terreno Santa Marta representa una cuenca ante arco que existió durante el lapso Cretáceo Superior - Paleoceno y el Terreno Sevilla representa una zona de subducción relacionada con el Sistema de Fallas de Romeral (Chicangana, 2005). La deformación plástica final observada para la cuenca Cesar - Ranchería y la Serranía de Perijá, ésta última contigua controlada por la Falla Perijá - El Tigre, ocurrió durante el lapso Plioceno Inferior – Pleistoceno. Los mecanismos estructurales que permitieron la emergencia del macizo tal cómo lo vemos hoy en día, fueron las fallas Perijá - El Tigre y el Lineamiento Sevilla, los cuales sirvieron de planos de apoyo junto el plano de subducción que conforma el límite estructural entre el Terreno Santa Marta y los planos subducidos de la Placa Caribe y la ancestral placa Farallón (Figuras 17 y 18). La presencia de una corteza oceánica muy próxima y que está cubierta por una muy delgada corteza continental (Figuras 7 y 17) derivada de esta colisión Paleógena, explica los altos valores de las anomalías gravimétricas y magnéticas observadas en la SNSM (Figura 10).

El resultado de esta movilidad regional y que aun sigue en acción, se evidencia con la actividad neotectónica o de tectónica activa que se observa en el sector oriental de la plataforma Caribe colombiana. Al respecto, París et al. (2000) y Audemard et al. (2000, 2006), señalan evidencias de movilidad Pleistocena y Holocena para la Falla Oca para el sector del río Ranchería a partir de escarpes y la alteración de abanicos aluviales correspondientes al Pleistoceno Inferior. Para la FSMB, París et al. (2000), indican que para el segmento Santa Marta son evidentes los escarpes de falla y el control que ejerce esta en los drenajes. Con la ayuda de imágenes LANDSAT (Figura 8) se observa que la Falla Cesarito - San Diego no es clara hacía el SO aunque muestra ciertos lineamientos hacía el extremo sur de la SNSM que revelan su presencia de una manera algo difusa, y se detecta un rasgo contundente al NE junto con la Falla Cerrejón. Estos rasgos estructurales son más

contundentes hacia la proximidad a la Falla Oca. La Falla Perijá - El Tigre muestra en el sector sur central un rasgo fuerte.

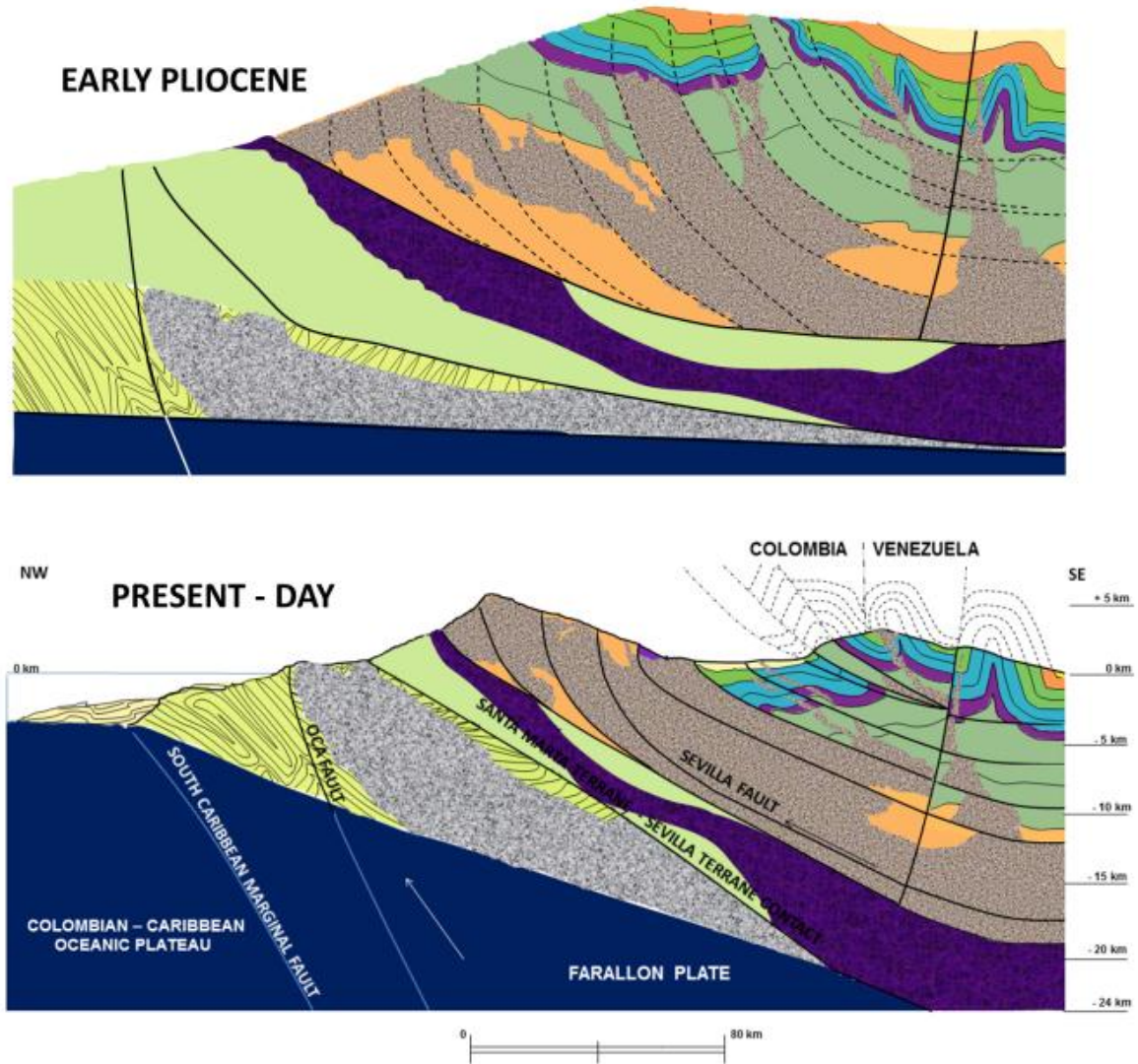


Figura 17. Perfil hipotético de la SNSM (Figura 6), en donde se muestra la evolución de la topografía para principios del Plioceno Inferior arriba y para el Presente abajo. Los colores representan las unidades geológicas que se especifican en la figura 7.

La SNSM presenta varios rasgos estructurales contundentes expresados como fallas, destacándose estructuras sintéticas al frente de cabalgamiento que representa la FSMB y a la Falla Oca. Para esta última se estima una tasa de desplazamiento que varía entre 0,2 y 4,0 mm/año (Audemard et al., 2000; París et al., 2000).

Para la península de La Guajira solo Ordoñez (2002), muestra algunas evidencias de actividad tectónica reciente a partir del análisis de la línea de costa. En nuestro caso analizamos esta línea de costa desde el Cabo de la Vela hasta las salinas del municipio de

Manaure al sur (Figura 18) y se encontraron evidencias de levantamiento del margen costero en éste sector de la península para al menos los últimos miles de años, los cuales se constan por los efectos erosivos de en las terrazas costeras, aunque para estar muy seguros sobre la edad de los depósitos fosilíferos afectados, se debe realizar un control bioestratigráfico muy detallado para estimar con más certeza la edad última del proceso. A pesar de esta falencia lo seguro es que esta región está sufriendo una fase de emergencia por efecto de una compresión que coincide con la transurrencia de la placa Caribe hacía el E, sin embargo hasta la fecha, salvo París et al. (2000), que relaciona a la actividad de la Falla de Oca al sur de Riohacha y el trabajo antes mencionado, persiste una total ausencia de estudios en este sentido para esta región.



Figura 18. Aspectos de la erosión costera en playas y acantilados del sector noroccidental de la península de La Guajira. En A y B, acantilados del sector del Cabo de La Vela. En C y D aspectos de una playa cerca de la cabecera municipal de Manaure. En ambos casos se observan terrazas costeras que se conforman de coral con fauna fósil. Un buen análisis bioestratigráfico permitirá indicar con seguridad la edad del último levantamiento de éste sector, o si éste sector continúa levantándose en la actualidad.

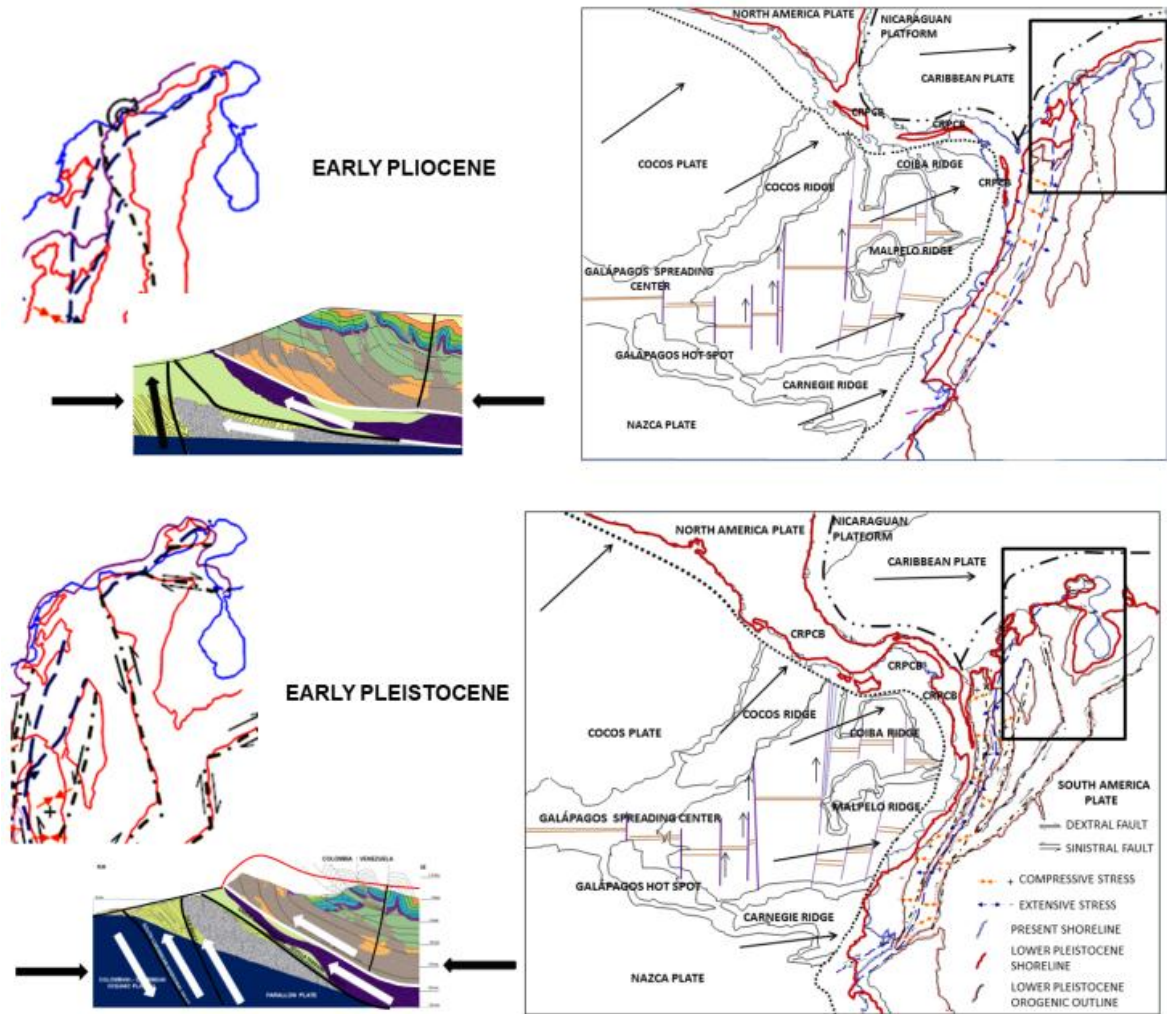


Figura 19. Bosquejo geodinámico hipotético para América Central meridional, el noroccidente de Suramérica, las placas Caribe, Cocos y Nazca para el Plioceno Temprano, arriba y el Pleistoceno Temprano, abajo. El SFR está representado por trazos azules gruesos y las fallas adyacentes a este sistema por trazos verdes discontinuos. La línea de costa actual en línea continua azul y los contornos paleocosteros con línea continua gruesa roja. Al lado se muestra una ampliación del sector oriental de la plataforma Caribe colombiana y el modelo cinemático correspondiente al crecimiento orogénico de la SNSM a siguiendo el perfil de la figura 7.

De acuerdo a Chicangana (2005), para inicios del Plioceno tanto la SNSM cómo la península de La Guajira se encontraban emergidas conformando un orogeno que continuaba hacia el sur conformando lo que luego sería la cordillera Oriental (Figura 19). La esquina noroccidental de Suramérica sufría en ese momento un proceso de rotación en sentido de las manecillas del reloj como resultado del inicio del ajuste final de la placa Caribe con la esquina noroccidental de Suramérica. En dicha época se observa que aun el arco de Panamá no se había acrecionado totalmente con el borde noroccidental colombiano y en el sector de la SNSM y la Península de La Guajira (Figuras 17 y 19) se presentaba con los basamentos mayoritariamente cubiertos por coberteras Meso - Cenozoicas y en un inicio de fase erosiva el cual estaba regulado por el clima de entonces.

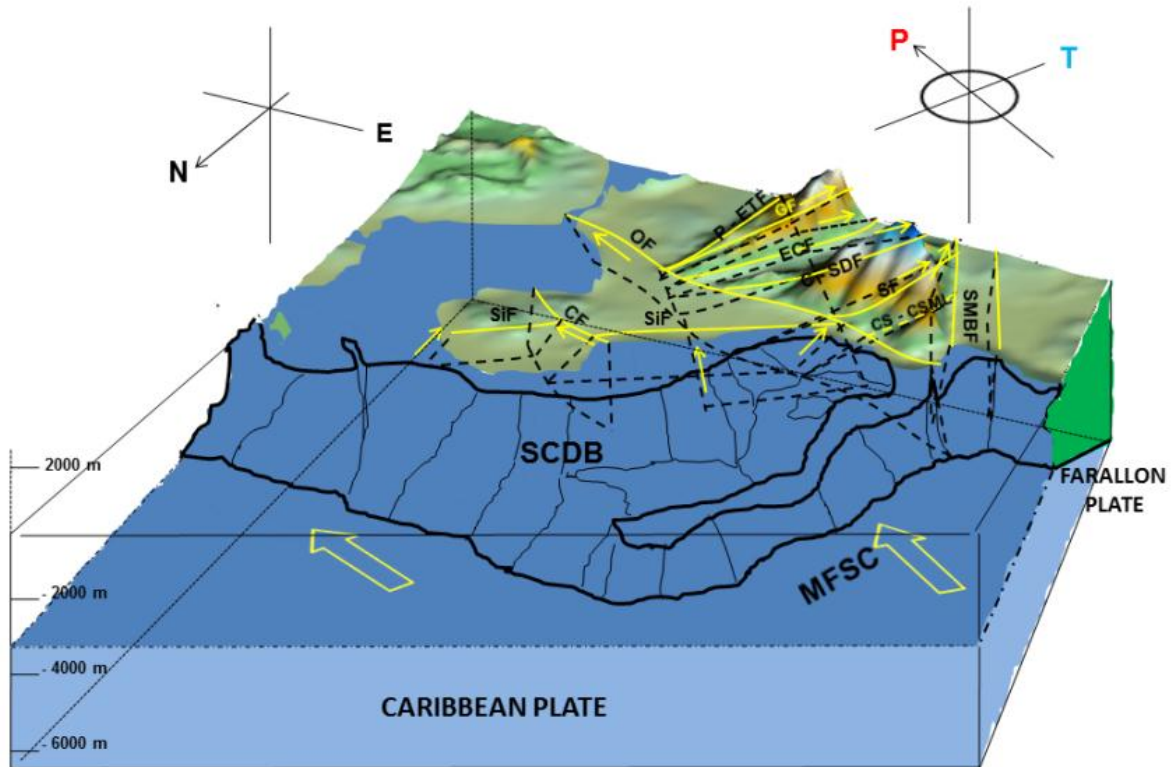


Figura 20. Bloque diagrama idealizado de la configuración geotectónica en el Presente de las provincias geológicas que constituyen la plataforma oriental del Caribe colombiano. En este se muestran la tendencia del campo de esfuerzos producido por la transcurrencia hacia el ESE de la Placa Caribe con la correspondiente respuesta cinemática en los principales planos de falla que se presentan en esta región. La escala vertical es en ms. MFSC: Falla Marginal del Sur del Caribe; OF: Falla Oca; FSMB: Falla Santa Marta – Bucaramanga; GF: Falla Guasare; ECF: Falla El Cerrejón; P - ETF: Falla Perija – El Tigre; C - SDF: Falla Cesarito – San Diego; SeF: Falla Sevilla; SF: Falla Simarua; CF: Falla Cuisa y CS - CSML: Límite entre los Terrenos Santa Marta y Sevilla. Es muy posible que la sismicidad que se reporta en esta región obedezca no solo al accionar de la falla Oca, sino varios de los planos de falla mostrados aquí.

Para principios del Plioceno el clima era muy distinto al actual debido a que se presentaba una conexión directa entre las aguas del océano Atlántico con las del océano Pacífico, porque aún no había emergido el istmo de Panamá, y la tasa erosiva que sufrían los orogenos era muy diferente a la actual, esta era posiblemente más intensa que Hoy. El régimen de esfuerzos era influenciado solo por el accionar de la placa Caribe, ya que la subducción de la placa de Nazca, que es la que deforma e influye junto con la amalgamación del arco de Panamá en la deformación de la esquina noroccidental de Suramérica en el Presente, no entraba todavía en juego. Es muy posible que el régimen de esfuerzos fuera compresivo, pero sin la influencia anteriormente mencionada, posiblemente gran parte de la península de La Guajira como la SNSM presentaban el desarrollo de un orogeno con una configuración muy diferente a la actual (Figura 17). Es muy posible que en esa época por solo la influencia de la placa Caribe hacía el E, se diera inicio en el sistema orogénico SNSM - Serranía de Perijá el accionar de fallas cabalgantes con rumbo promedio N50°E y que produjeron la exhumación paulatina del basamento (Figuras 17 y 18). Éste régimen de esfuerzos venía desarrollándose desde el Eoceno y efectivamente

ayudaba a levantar y deformar el basamento en éste sector de los Andes incluyendo aquí el sector de la Alta Guajira, en donde en la actualidad se observan ventanas del basamento Mesoproterozoico, mientras que en el sector que corresponde a la Baja Guajira, al parecer se presentó un régimen transtensional que produjo la subsidencia de dicho bloque, entre la falla Oca al sur y la falla Cuisa al norte durante el lapso Eoceno - Mioceno Superior, lo cual está constado tanto con la información geológica como con la información sísmica (Figuras 1, 9 y 12).

Para el Pleistoceno Inferior el arco de Panamá se había acrecionado completamente al margen noroccidental de Suramérica produciendo la actual configuración orogénica de los Andes colombianos y la FSMB con rumbo N20°O se activó como resultado de esta acreción debido al cambio en la dirección de esfuerzos. La FSMB y la falla Oca comienzan aquí a desarrollar la actual configuración del sector oriental del Caribe colombiano produciendo la exhumación definitiva de basamentos en varios lugares de la SNSM. Con la colisión y amalgamación del arco de Panamá, el sistema orogénico conformado por la SNSM y la Serranía de Perijá se fue configurando en la medida que la placa Caribe se ajustaba con el margen noroccidental de Suramérica en su transcurrancia final, cuando Norteamérica “comprimió” a la placa Caribe con Suramérica durante este lapso. Dicho efecto produjo que algunas fallas como el la Falla El Cerrejón y la Falla Cesarito - San Diego, se accionaran de manera diferencial por estar en un punto medio entre los backstop que lo constituyen la Falla Marginal del Sur del Caribe al NO y la falla Perijá – El Tigre al SE (Figura 20). Esto produjo una cuenca tras - arco que es la actual cuenca Cesar - Ranchería. El sistema orogénico conformado por la SNSM y la Serranía de Perijá se fue levantando de manera lenta conforme el modelo del bulldózer por acortamiento cortical (Davis et al., 1983; Byrne et al., 1993), exhumando el basamento más profundo. El bulldozer que empuja en este caso es la placa Caribe. El sistema orogénico SNSM - Serranía de Perijá sigue en la actualidad en crecimiento y la tendencia del su levantamiento es hacía el SE. Esto se debe a que la FSMB presenta en este sector un movimiento inverso con transcurrancia siniestral y la transcurrancia de la placa Caribe en dirección E produce como resultado que la falla Oca incremente su movilidad en dicho sentido hacía el sur de la Baja Guajira y en el sector del Golfo de Maracaibo en Venezuela (Audemard, 1996; Audemard et al., 2000, 2006), dando lugar a la sismicidad somera detectada en esta región

CONCLUSIONES

En este trabajo se determinó que la plataforma oriental Caribe colombiana presenta actividad sísmica periódica. Esta plataforma forma parte del desarrollo geotectónico de la esquina noroccidental de Suramérica y presenta un basamento cuya edad máxima corresponde al Mesoproterozoico. Este basamento está constituido de rocas ígneas y metamórficas de alto grado y le dan un carácter frágil. La Falla Santa Marta -Bucaramanga (FSMB) sirve de límite entre dos sectores de la plataforma, las cuales presentan dos escenarios litosféricos diferentes. En esta región el campo de esfuerzos tiene su componente compresiva σ_1 con una dirección SE y su influencia va desde en latitud desde los 10° hasta los 14° norte. Este campo de esfuerzos es el resultado de la convergencia hacía el ESE de la Placa Caribe. La sismicidad relacionada en este último se concentra en la zona de contacto entre la Placa Caribe y la plataforma continental la cual está definida por la Falla Marginal del Sur del Caribe (FMSC) (Figura 20) y concentra una fuerte actividad

tectónica a lo largo de la Falla de Oca, la cual es el contacto entre esta y el continente. Con la actividad tectónica en esta la probabilidad de ocurrencia de un gran sismo en esta región de la plataforma es muy alta ya que con la paleosismología han quedado evidencias de sismos con $M > 7.0$. La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) junto con la Cuenca Cesar - Ranchería y la Serranía de Perijá se desarrollaron desde el Plioceno Inferior como resultado del accionar simultaneo de las Fallas FSMB y Oca, al ocurrir el ajuste definitivo el arco de Panamá y la Placa Caribe con el margen noroccidental de Suramérica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera muy especial a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Corporación Universitaria del Meta de la ciudad de Villavicencio, por el apoyo que se le ha dado al Proyecto “Amenaza Sísmica de la Plataforma Caribe Colombiana” que se está realizando desde 2006 y del cual éste trabajo es uno de sus resultados. Al Grupo de Geofísica del Departamento de Geociencias de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por su apoyo permanente en este proyecto cuyo desarrollo ha arrojado resultados que han contribuido para consolidar el conocimiento de los alcances de la amenaza sísmica en el territorio colombiano, y por último a los investigadores del Proyecto GEORED del Servicio Geológico Colombiano - INGEOMINAS en Bogotá D.C., por su participación en este trabajo y su colaboración brindada con los datos de las estaciones GNSS permanentes ALPA y VDUP, las cuales sirvieron de punto de referencia inicial para el análisis de los resultados de este trabajo en concreto.

REFERENCIAS

ANH. (2008). Mapa de anomalía Bouguer total de la República de Colombia. Bogotá D.C.: Agencia Nacional de Hidrocarburos.

ANH. (2009). Magnetic Total intensity anomalies Map for Colombia. Bogotá D.C.: Agencia Nacional de Hidrocarburos.

Arias, A., Morales, C. J., 1999, Mapa geológico generalizado del Departamento del Cesar, memoria explicativa y mapa a escala 1: 250.000. Bogotá D.C.: INGEOMINAS.

Audemard, M, F. A. (1996). Paleoseismicity studies on the Oca – Ancón fault system, northwestern Venezuela. *Tectonophysics*, **259** (1 - 3): 67 – 80.

Audemard, F. E., Audemard, F. A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America – Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, **345** (1 - 4): 299 - 327.

Audemard, F.A., Machette, M.N., Dart, R.L., Haller, K.M. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions*. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-018.

<http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0018/> (last Access 29 - 09 - 2011)

Audemard, M, F. A., Singer, P, A., Soulas, J - P., Neotectonics Section of the Funvisis Earth Department. (2006). Quaternary faults and Stress regime of Venezuela. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, **61** (4): 480 - 491.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas C. A., Martínez, J. F. (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. Bogotá D. C.: ANH and B&M Exploration Ltda. 91p.

Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J., Cordani., U. (2010). Paleomagnetic data and K–Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta massif: A preliminary interpretation for block rotation and translations. *Journal of South American Earth Sciences*, **29** (4): 817-831

Byrne, D. E., Wang, W - H., Davis, D., 1993. Mechanical role of backstops in the growth of forearcs. *Tectonics*. **12** (1): 123 - 144.

Cardona, A., Chew, D., Valencia, V., Bayona, G., Mišković, A., Ibanez-Mejia, M. (2010a). Grenvillian remnants in the Northern Andes: Rodinian and Phanerozoic paleogeographic perspectives. *Journal of South American Earth Sciences*. **29** (1): 92-104

Cardona, A., Valencia, V., Garzón, A., Montes, C., Ojeda, G., Ruiz, J., Weber, M. (2010b). Permian to Triassic I to S-type magmatic switch in the northeast Sierra Nevada de Santa Marta and adjacent regions, Colombian Caribbean: Tectonic setting and implications within Pangea paleogeography *Journal of South American Earth Sciences*, **29** (4): 772-783

Cardona, C., Valencia, V., Bustamante, C., García-Casco, A., Ojeda, G., Ruiz J., Saldarriaga, M., Weber, M. (2010 c). Tectonomagmatic setting and provenance of the Santa Marta Schists, northern Colombia: Insights on the growth and approach of Cretaceous Caribbean oceanic terranes to the South American continent. *Journal of South American Earth Sciences*, **29** (4): 784-804

Cediél, F., Barrero, D., Caceres, C. (1998). Seismic Atlas of Colombia: Seismic Expression of Structural Styles in the Basins of Colombia. Bogotá D.C. Ecopetrol – GEOTEC - Robertson. Bogotá D.C.: ECOPETROL

Chicangana, G. (2005). Estudio del Sistema de Fallas Romeral (0,5 – 11,5 ° N), a partir de una caracterización sismotectónica regional. Tesis de Maestría en Ciencias – Geología, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - UNCB-, Bogotá D.C. 191p, 6 Anexos. (No publicada).

Chicangana, G., Mora – Páez, H., Ordoñez, A, C. I. , López, I, S. A., Ferrari, L. (2011). La posible actividad sísmológica y modelo sismotectónico de la interacción entre la Península de la Guajira con el complejo orogénico Sierra Nevada de Santa Marta - Serranía de Perijá, Colombia - Venezuela. XIV Congreso Latinoamericano de Geología, Medellín, Colombia, Memorias p. 302 – 303.

Cloos, Mark (1993). Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: Subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts. *GSA Bulletin*, **105** (6): 715-737.

Davies, D., Suppe, J., Dahlen, F. A. (1983). Mechanics of Fold – and – Thrust Belts and Accretionary Wedges. *Journal of Geophysical Research*. **88**, b2, 1153 – 1172.

Duerto, L., Escalona, A., Mann, P. 2006. Deep structure of the Merida Andes and Sierra de Perija mountain fronts, Maracaibo Basin, Venezuela. *AAPG Bulletin*, **90** (4): 505–528.

Gómez, J., Nivia, A., Montes, N.E., Tejada, M.L., Jiménez, D.M., Sepúlveda, M.J., Osorio, J.A., Gaona, T., Diederix, H., Mora, M. & Uribe, H., compilers, (2007a). Geological Map of Colombia. Scale 1:1'000.000. INGEOMINAS. Bogotá.

http://www.ingegominas.gov.co/getattachment/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia/GMC_2007_1000K.pdf.aspx (last access 12 - 09 – 2011).

Gómez, J., Nivia, A., Montes, N.E., Jiménez, D.M., Sepúlveda, J., Gaona, T., Osorio, J.A., Diederix, H., Mora, M. & Velásquez, M.E., compiladores. (2007b). Atlas Geológico de Colombia. Escala 1:500.000. INGEOMINAS, 26 planchas. Bogotá.

<http://www.ingegominas.gov.co/Geologia/Mapa-geologico-de-Colombia/Atlas-Geologico-de-Colombia.aspx>(last access 12 - 09 – 2011).

Gose, W.A., Perarnau, A., Castillo, J., 2003. Paleomagnetic results from the Perija Mountains, Venezuela: an example of vertical axis rotation. In: Bartolini, C., Buffler, R.T., Blickwede, J. (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydro-Carbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics*. AAPG Memoir, **79**, 969–997.

Hacker, B. R., Abers, G. A., Peacock, S. M. (2003 a). Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic waves speeds, and H₂O contents. *Journal of Geophysical Research*. **108** (B1): 2030, doi10.1029/2001JB001127, 2003.

Hacker, B. R., Peacock, S. M., Abers, G. A., Holloway, S. D. (2003 b). Subduction factory 2. Are intermediate – depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic reactions? *Journal of Geophysical Research*. **108** (B1): 2030, doi10.1029/2001JB001129, 2003.

Harvard University. (2011). Global CMT catalog search. Harvard University Centroid Moment Tensor CMT – Project:

<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (Last access 23 - 09 – 2011)

Hernández, M. (2003a). Geología de las Planchas 11 Santa Marta y 18 Ciénaga, Escala 1: 100.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS, Bogotá D. C., 92 p.

Kellogg, J. N., (1984). Cenozoic tectonic history of the Sierra de Perijá, Venezuela - Colombia and adjacent basins. In: The Caribbean - South America plate boundary and Regional tectonics. *Geological Society of America Memoir* **162**, 239 – 261.

Keppie, J. D., Dostal, J., Ortega – Gutierrez, F., Lopez, R. (2001). A Grenvillian arc on the margin of Amazonia: evidence from the southern Oaxacan Complex, southern Mexico. *Precambrian Research*, **112**, 165 – 181.

Keppie, J. D., Nance, R. D., Murphy, J. B., Dostal, J. (2003). Tethyan, Mediterranean, and Pacific analogues for the Neoproterozoic – Paleozoic bith and development of peri – Godwanan terranes and their transfer to Laurentia and Laurussia. *Tectonophysics*, **365**, 195 – 219. doi: 10.1016/S0040 – 1951(03)00037 - 4

Keppie, J. D., Dostal, J., Miller, B. V., Ramos – Arias, M. A., Morales – Gámez, M., Nance, R. D., Murphy, J. B., Ortega – Rivera, A., Lee, J. W. K., Housh, T., Cooper, P. (2008). Ordovician – earliest Silurian rift tholeiites in the Acatlan Complex, southern Mexico: Evidence of rifting on the southern margin of the Rheic Ocean. *Tectonophysics*, **461**, 1 - 4, 130 - 156. doi: 10.1016/j.tecto.2008.01.010

MacDonald, W.D., Opdyke, N.D. (1972). Tectonic rotations suggested by paleomagnetic results from Northern Colombia, South America. *Journal of Geophysical Research*, **77**, 5720–5730.

MacDonald, W.D., Opdyke, N.D. (1984). Preliminary paleomagnetic results from Jurassic rocks of the Santa Marta massif, Colombia. In: Bonini, W.E., Hargraves, R.B., Shagam, R. (Eds.), *The Caribbean–South American Plate Boundary and Regional Tectonics*, GSA Memoir, **162**, 295–298.

Maya, M. (2001). Distribución, facies y edad de las rocas metamórficas de Colombia. INGEOMINAS, I – 2426, 57 p.

Maze, W.B., Hargraves, R.B. (1984). Paleomagnetic results from the Jurassic La Quinta Formation in the Perijá Range, Venezuela, and their tectonic significance. In: Bonini, W.E., Hargraves, R.B., Shagam, R. (Eds.), *The Caribbean–South American Plate Boundary and Regional Tectonics*, GSA Memoir, **162**, 287–293.

Miall, A.D. (1997). *The Geology of Stratigraphic Sequences*. New York, Springer, 225 - 270.

Miall, A.D. (2000). *Principles of Sedimentary Basins Analysis*. New York, Springer, 467 – 593.

Montes, C., Guzman, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., Jaramillo, C. (2010). Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería basins. *Journal of South American Earth Sciences*, **29** (4): 832-848

Mora - Páez, H., López, I, S. A. (2011). El proyecto GEORED del INGEOMINAS: Instrumentación orientada a las investigaciones espaciales para el estudio de la dinámica terrestre en Colombia. XIV Congreso Latinoamericano de Geología, Medellín, Colombia, Memorias, p. 150.

NASA/JPL/NIMA (2004). PIA03388: South America Shaded Relief and Colored Height, SRTM: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia03388> (Last access 24 - 11 – 2011)

Olshansky A.S., Kuzmin E.L., Maslianitzkiy V.V. (2006). Informe de exploración sísmica de acuerdo al proyecto: Cesar Ranchería 2D. (Procesamiento, interpretación y modelamiento geológico de la información sísmica de reflexión-2D, obtenida en la cuenca Cesar-Ranchería de la República de Colombia) (Contrato SNG – UTKG 336/2006) Tomo 1. Texto, 84 p. Bogotá D.C. Agencia Nacional de Hidrocarburos: <http://www.anh.gov.co/media/metodos%20de%20visualizacion/SISMICA%20CESAR-RANCHERIA%202D%202005.pdf> (Last access 09 -09 -2011)

Ordoñez, A, C. I. (2002). Rasgos de levantamiento de la margen continental a partir del Oligoceno: Contribución al conocimiento del Nordeste Colombiano. *Boletín Científico CIOH*. 24, 126–138. http://www.cioh.org.co/dev/publicaciones/resumboletin/b24_dev.html (Last access 09 - 09 -2011)

París, G., Machette, R., Dart, R. L., Haller, K. M. (2000). Database and Map of Quaternary faults and folds of Colombia and its offshore regions, Open – File Report 00 – 0284.

<http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0284/ofr-00-0284.pdf> (Last access 16 - 09 - 2011).

PDVSA. (2010). *Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela*. Documento patrocinado por Petróleos de Venezuela, S.A.

Editado por el Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura (CIEN). Caracas, PDVSA.

<http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm> (last access 23 - 09 - 2011).

Priem, H. N. A., Kroonenberg, S. B., Boelrijk, N. A. I. M., Hebeda, E. H. (1989): Rb - Sr and K - Ar evidence for the presence of a 1.6 Ga basement underlying the 1.2 Ga Garzón - Santa Marta Granulite Belt in the Colombian Andes. *Precambrian Research*, 42 (3/4): 315 – 324.

Ramos, V. A. (2010). The Grenville - age basement of the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 29 (1): 77 – 91.

Restrepo, P. P. A., Ruiz, J., Gehrels, G., Cosca, M. (1997). Geochronology and Nd isotopic data of Grenville – age rocks in the Colombian Andes: new constraints for the Late Proterozoic – Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 150 (3 – 4): 427 – 441.

Rodríguez, G., Londoño, A.C. (2002). Mapa Geológico del Departamento de La Guajira, Geología, Recursos Minerales y Amenazas Potenciales, Versión 2, Escala 1: 250.000. INGEOMINAS, Medellín, 259 p.

Royero, G. J. M., Clavijo, J., 2001, Mapa geológico generalizado del Departamento de Santander. Escala 1: 400000. Memoria y mapa. Bogotá D.C. INGEOMINAS, 91 p.

RSNC -INGEOMINAS. (2008). Boletín de Sismos 1993 - 2007. Bogotá D.C. : INGEOMINAS - Red Sismológica Nacional de Colombia.

Spikings, R. (2011). Reactivation of the western South American margin in response to the collision, subduction and accretion of oceanic plateaus and passive ridges: Examples from the northern, central and southern Andes. XIV Congreso Latinoamericano de Geología, Medellín, Colombia, Memorias p. 403 - 404.

Toto, E. A., Kellogg, J. N. (1992). Structure of the Sinu – San Jacinto fold belt - An active accretionary prism in northern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*. 5 (2): 211-222.

Tschanz, C. M., Jimeno, V. A., Cruz, B. J., et al., (1969). Mapa Geológico de Reconocimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta. Escala 1: 200.000. INGEOMINAS – US Geological Survey, Bogotá.

Tschanz, C. M., Marvin, R. F., Cruz, B. J., Mehnert, H. H., Cebula, G. T., 1974. Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. *GSA Bulletin*, 85, 273-284.

Turcotte, D. L., Schubert, G. (2002). *Geodynamics*. London, Cambridge University Press, Second Edition, 456 p.

USGS. (2005). Geologic shaded relief map of Venezuela. Open - file report 2005. 238.

Vence, E. M. (2008). Subsurface structure, stratigraphy, and regional tectonic controls of the Guajira margin of northern Colombia. Thesis Master of Science in Geological Sciences, The University of Texas at Austin. 128 p.

Villagómez, D., Spikings, R., Mora, A., Guzmán, G., Ojeda, G., Cortés, E., va der Lelij, R. (2011). Vertical tectonics at a continental crust-oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Tectonics*, **30**, TC4004, doi:10.1029/2010TC002835, 2011

Weber, M. B. I., Cardona, A., Paniagua, F., Cordani, U., Sepúlveda, L., Wilson, R., 2009, The Cabo de la Vela Mafic-Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: a record of multistage evolution of a Late Cretaceous intra-oceanic arc. Geological Society, London, Special Publications. **328**, 549-568; DOI: 10.1144/SP328.22

Weber, M., Cardona, A., Valencia, V., García-Casco, A., Tobón, M., Zapata, S. (2010). U/Pb detrital zircon provenance from late cretaceous metamorphic units of the Guajira Peninsula, Colombia: Tectonic implications on the collision between the Caribbean arc and the South American margin. *Journal of South American Earth Sciences*, **29** (4): 805-816

Wilson, Marjorie (1989). *Igneous Petrogenesis*. London, Unwin Hyman, 466 p.