

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE LA CINEMÁTICA Y DEFORMACIÓN DE
BLOQUES TECTÓNICOS EN LA REGIÓN NORORIENTAL DE
VENEZUELA A PARTIR DE MEDICIONES DE GEODESIA
ESPACIAL**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Ing. Reinoza Gómez, Carlos Eduardo
Para optar al Título
de Magister Scientiarum en Ciencias Geológicas

Caracas, 2020

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA CINEMÁTICA Y DEFORMACIÓN DE BLOQUES TECTÓNICOS EN LA REGIÓN NORORIENTAL DE VENEZUELA A PARTIR DE MEDICIONES DE GEODESIA ESPACIAL

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Franck A. Audemard M.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Ing. Reinoza Gómez, Carlos E.
Para optar al Título
de Magister Scientiarum en Ciencias Geológicas

Caracas, 2020

Reinoza, G., Carlos E.

**ESTUDIO DE LA CINEMÁTICA Y DEFORMACIÓN DE
BLOQUES TECTÓNICOS EN LA REGIÓN NORORIENTAL DE
VENEZUELA A PARTIR DE MEDICIONES DE GEODESIA
ESPACIAL**

**Tutor Académico: Prof. Franck A. Audemard M. Tesis. Caracas, U.C.V.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2020, 110 p.**

Palabras claves: Geodesia Espacial, Cinemática, Deformación, Venezuela, Falla El
Pilar

Resumen. En el oriente venezolano se realizaron campañas de adquisición de datos geodésicos en los años 2003, 2005 y 2013, las cuales han permitido obtener el campo de velocidades geodésicas para el Nororiente del país y caracterizar principalmente la Falla El Pilar (FEP). Adicionalmente, desde la concepción e instalación de la red geodésica se buscó establecer un mínimo de tres sitios de observación por bloque tectónico con el fin de estudiar su deformación, a través de parámetros como la rotación, traslación y “strain”. Si bien, la FEP es la responsable de acomodar una fracción sustancial del movimiento relativo dextral entre las placas Caribe y Suramérica en esta región, en al menos un 60% del movimiento intersísmico anual, el estudio en detalle de cada bloque tectónico permite además de caracterizar estas unidades por sí mismas, también cuantificar la contribución de las fallas primarias y secundarias que los limitan. Se realizaron cálculos asociados a la deformación a cada bloque tectónico con base en al menos tres puntos geodésicos. La distribución de puntos de observación ha permitido delimitar de 7 a 8 bloques tectónicos principales de acuerdo a la metodología empleada. Entre ellos los ya conocidos bloques Bergantín y Caripe al sur de la FEP. Los restantes se ubican al norte de la FEP, denominados en este trabajo: Golfo de Cariaco, Puente de Tierra, Paria, Península Norte (Araya), Margarita (divido en Península de Macanao, al oeste, y Margarita, al este). Los resultados de este trabajo seguramente tendrán implicaciones significativas en los próximos estudios de amenaza sísmica para la región al cuantificar una serie de

parámetros relacionados con la deformación de los mencionados bloques tectónicos, así como la cinemática de las fallas principales y secundarias.

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA,

Al profesor Franck Audemard, primero colega, luego profesor, director de tesis, y gran amigo.

A la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas-FUNVISIS. Gracias al apoyo de tanta gente que me alentaron a seguir formándome. Al apoyo técnico-administrativo, al espaldarazo continuo.

La Maestría en Ciencias Geológicas de la U.C.V. fue un proyecto que me acompañó durante mucho tiempo, fue una idea que comencé con mucha ilusión en mis primeros años como profesional, donde un grupo de nuevos ingenieros de FUNVISIS emprendimos esta tarea. Luego con los años, las complicaciones propias de la vida y nuevos retos que iban apareciendo, dilataron un poco el proceso. Pero la meta, siempre presente, en mi caso, de obtener un grado en esta gran Universidad, de una ciudad que siempre será mi ciudad “Caracas”, donde no nací, pero de la cual me siento parte.

Hoy le agradezco, al Centro de Investigaciones Científicas y Educación Superior de Ensenada, Baja California, donde encontré el espacio adecuado y la tranquilidad, para decantar las ideas y plasmarlas en este tomo.

Le agradezco a Dios, Maria Auxiliadora y Don Bosco, a mi familia, amigos y a toda esa gente especial que siempre me acompaña en todos mis proyectos.

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS	xiii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA - ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	7
1.2.1. Objetivo general.....	7
1.2.2. Objetivos específicos	7
1.3. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIOS.....	8
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO Y GEODINÁMICO.....	11
2.1. INTRODUCCIÓN	11
2.2. MARCO TECTÓNICO DE LA CUENCA NORORIENTAL DE VENEZUELA.....	13
2.2.1. La Serranía del Interior	16
2.2.2. El cinturón de pliegues y corrimientos de Monagas	18
2.2.3. La Cuenca antepaís de Maturín.....	19
2.2.4. Fallas activas región nororiental de Venezuela.....	19
2.2.4.1. La Falla El Pilar	21
2.2.4.2. Falla de Urica	28
2.2.4.3. Falla de San Francisco	28
2.2.4.4. Falla de Río San Juan.....	29
2.2.4.5. Falla de Bohordal	29
2.2.4.6. Falla Loma de Viento.....	30
2.2.4.7. Falla Aragua de Maturín	30
2.2.4.8. Falla Manzanillo-Cariaco.....	31
2.2.4.9. Falla de Laguna Grande	31
2.2.4.10. Falla de Costa Norte.....	31
2.2.4.11. Falla de Tunapuy.....	32
2.2.4.12. Falla de Charagato	32
2.2.4.13. Falla de Coche.....	32
2.2.4.14. Falla Punta Arenas	33
2.2.4.15. Falla de Margarita	33
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	34
3.1. INTRODUCCIÓN	34

3.2. RECOPIACIÓN DE DATOS GEODÉSICOS	35
3.2.1. Campañas de medición de datos	35
3.2.2. Redes geodésicas permanentes	40
3.2.2.1. REMOS	40
3.2.2.2. GEORED - Servicio Geológico Colombiano	40
3.2.2.3. Servicio Internacional GNSS	41
3.2.2.4. COCONet-UNAVCO	41
3.2.3. Interferometría Radar por Satélite.....	46
3.3. ESTRATEGIA DE PROCESAMIENTO	48
3.3.1. Ordenamiento de datos.....	48
3.3.2. Preprocesamiento – Procesamiento	50
3.3.2.1. Determinación de orbitas precisas	51
3.3.2.2. Módulo de preprocesamiento.....	52
3.3.2.3. Módulo de procesamiento de los datos	52
3.3.2.4. Formación de archivos de diferencias simples.....	53
3.3.2.5. Estimación de la solución diaria	53
3.3.2.6. Estimación de velocidades	54
3.3.2.7. Marco de referencia Suramérica	55
3.4. MODELADO NUMÉRICO	56
3.4.1. Modelado elástico homogéneo.....	57
3.4.2. Modelado de bloques	58
3.4.2.1. Rotación de un cuerpo rígido	59
3.4.2.2. Acumulación de deformación elástica	60
3.4.2.3. Tasa de deslizamiento de la falla	61
3.4.2.4. Modelado final	61
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS	63
4.1. CAMPO DE VELOCIDADES GEODÉSICAS	63
4.1.1. Mapa de velocidades relativas a Suramérica fija.	67
4.2. MODELADO.....	71
4.2.1. Modelado de deformación intersísmica de primer orden.....	71
4.2.2. Modelado de bloques	73
4.2.2.1. Deformación infinitesimal a partir de un arreglo triangular	73
4.2.2.2. Modelado elástico litosférico de bloques	78

4.3. ANÁLISIS	88
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	97

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Zona de estudio con la localización de la fallas activas en el noreste de Venezuela (Audemard et al., 2000). 8
- Figura 2.1.** Mapa esquemático geodinámico del margen sur del Caribe (Audemard, 1999b; Audemard et al., 2000; Weber et al., 2001; Trenkamp et al., 2002; Soto et al. 2007). Se muestran los principales bloques: Bonaire, Maracaibo y Norandino interactuando con las placas Caribe, Nazca y Suramérica..... 12
- Figura 2.2.** Corte geológico simplificado del margen sureste del Caribe. Basado en mapas y secciones compiladas de Bellizzia et al. (1976); Stéphan et al. (1980); Campos (1981); Beck (1986); Chevalier (1987)..... 13
- Figura 2.3.** Ubicación relativa de la cuenca de Carúpano y sus elementos estructurales más importantes (Modificado de Pereira, 1985). 14
- Figura 2.4.** Presencia de Fallas prominentes de dirección este-oeste y fallas de orientación ENE–OSO a NO-SE. Sc: Sub-cuenca (Pereira, 1985; Beltrán, 1993; Audemard, et al., 2000). 15
- Figura 2.5.** Mapa tectónico generalizado del Oriente de Venezuela. BB: Bloque Bergantín; BC: Bloque Caripe, BSR: Bloque Santa Rosa; CPCM: Cinturón de Pliegues y Corrimiento de Monagas; TB: Bloque de Trinidad (Modificado de Parra et al., 2011). 15
- Figura 2.6.** Modelo de velocidades del perfil 64° O. Se identifican las siguientes estructuras A: Complejo ígneo-metamórfico de Araya-Paria; B: Cuenca de Cariaco; C: Margen Pasivo y/o Jurásico de la SDI; D: Basamento cristalino y engrosado debajo de la SDI; E: Corrimiento de Pirital; F y G: Sedimentos no consolidados y consolidados de la Cuenca de Maturín. F.E.P.: Falla El Pilar, F.S.F: Falla San Francisco, F.P.: Falla Pirital (Tomado de Liuzzi, 2006). 18
- Figura 2.7.** Extracto del mapa de fallamiento activo de la región nor-oriental (Tomado de Singer et al., 1994). Se resaltan en amarillo la mayoría de los accidentes descritos en esta sección. 20
- Figura 2.8.** La FEP dividida en cuatro segmentos como se muestra en una porción del Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela (Tomado de Audemard et al., 2000). La nomenclatura original VE-13a, VE-13b, VE-13c, and VE-13d del documento representan los segmentos de oeste a este de la FEP. La Falla Los Bajos se muestra bajo el Código VE-15. La línea verde segmentada sobre el Golfo de Cariaco representa la ubicación de la sección sísmica de la Figura N° 2.9. 22
- Figura 2.9.** Perfiles de sísmica reflexión obtenidos con un perfilador de fango o pinger-3,5 kHz (Arriba) y un sparker-1,1kHz (Abajo). Se observan las trazas sur y norte de la FEP. Para la localización en planta de los perfiles ver la figura 2.6 (Van Welden, 2007). 23
- Figura 2.10.** Distribución de 1306 réplicas del terremoto de Cariaco a lo largo de la zona de la FEP indicando la profundidad focal. En recuadro inserto arriba y a la derecha, número de réplicas versus profundidad; el círculo rojo muestra la profundidad focal del evento principal estimada por Romero et al. (1999) (Modificado de Baumbach et al., 2004). 23

Figura 2.11. Esquema tridimensional y distribución de la sismicidad en el nororiente de Venezuela. Se indican dos tipos diferentes de sismicidad: una primera asociada a la actividad cortical de la FEP y una segunda sismicidad, relacionada con los terremotos más profundos principalmente relacionados con la subducción de las Antillas (Modificado de Jouanne et al., 2011).	24
Figura 2.12. Distribución de la sismicidad en el nororiente de Venezuela desde 1910-2010 (Catalogo FUNVISIS). Las fallas activas son tomadas de Beltrán (1993) y los mecanismos focales de Audemard et al. (2005) y Palma et al. (2010).	24
Figura 2.13. Perfil de sísmica de reflexión al SE del Caribe cruzando la FEP. CDP: Punto de reflejo común; TWT: Tiempo de viaje doble; ZF: Zona de Falla (Modificado de Christeson et al., 2008).	26
Figura 2.14. Velocidades observadas (blanco) con elipses de error de 66% obtenidas a partir de la comparación de campañas de observación geodésicas 2003 y 2005 (Jouanne et al., 2011). Las velocidades se representan relativas a la Placa Suramérica fija, utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi et al. (2007). Las fallas activas en el NE de Venezuela son tomadas de Beltrán (1993) y Audemard et al. (2000).	27
Figura 3.1. Dispositivos de latón plantados en afloramientos estables. (A) Modelo de rosca externa y (B) modelo de rosca interna (Tomado de Reinoza et al., 2017).	36
Figura 3.2. Antena modelo Choke Ring Ashtech instalada en el vértice MAN1 (Punta Manzanillo, Nueva Esparta). El dispositivo de rosca externa se encontró degradado por vandalismo en la misión de reconocimiento de 2013 (se observa ligeramente a la izquierda de la extensión de la antena) y fue sustituido por un modelo de rosca interna (Tomado de Reinoza et al., 2017).	36
Figura 3.3. Distribución de estaciones en el oriente venezolano. Los recuadros amarillos, círculos verdes y triángulos rojos representan los sitios de medición en los años 2003, 2005 y 2013, respectivamente. La estrella azul corresponde a la estación cGNSS CUMA de la red REMOS-IGVSB. Las fallas activas en el NE de Venezuela son tomadas de Beltrán (1993) y Audemard et al. (2000).	37
Figura 3.4. Estación CHA0 (Charagato, Isla de Cubagua). Receptor: Trimble 5700 y antena: Zephyr Geodetic Trimble, instalada de forma convencional sobre un trípode topográfico. Crédito fotografía: Franck A. Audemard.	37
Figura 3.5. Ubicación de las estaciones IGS y COCONet-UNAVCO, utilizadas en el procesamiento de los datos. Se resaltan las estaciones IGS de referencia (Arriba). Acercamiento de la imagen, donde se denotan las estaciones IGS y UNAVCO, así como las estaciones de la red oriental medidas en campaña (2003, 2005, 2013) y las estaciones REMOS y GEORED-SGC (Abajo).	43
Figura 3.6. (A) Velocidades LOS estimadas (rad/año) para 3,5 años (2007-2011) a partir de datos InSAR con 30 m de resolución. Los círculos representan estaciones GNSS. (B) Valores de mínimos cuadrados (Root Mean Squares –RMS) estimados para el mismo periodo (2007-2011) (Tomado de Pousse-Beltrán et al., 2016).	47

Figura 3.7. Visualización de un archivo RINEX perteneciente a medición del día 16 de enero de 2013 en la estación AUD0. Se resalta el nombre del vértice (marker name), el tipo de receptor “Trimble R8” y antena “TRM5800.00”.....	49
Figura 3.8. Diagrama de flujo de la estrategia de procesamiento con el programa Bernese GNSS incluyendo a partir de la propia recopilación de datos, preprocesamiento. PCF: Archivo de Control de Procesos (Process File Control), CRD: extensión para designar el archivo de coordenadas de estaciones, VEL: extensión para designar el archivo de velocidades de estaciones y PLT: archivo de series de tiempo residuales	50
Figura 3.9. Falla bloqueada desde la superficie hasta una profundidad $D=3$ km. La dirección de los desplazamientos simula una perspectiva tridimensional (Modificado de Segall, 2010).	58
Figura 3.10. Desplazamiento y deformación (strain) intersísmico (Modificado de Segall, 2010).	58
Figura 3.11. Se muestran dos placas litosféricas (A y B) cuyo movimiento relativo puede ser descrito mediante una rotación ${}_{B}ROT_{A}$ o $OBVA$ (Siguiendo la nomenclatura de la Ecuación 3.2) alrededor de un polo de Euler (PE). Se indican las trayectorias (círculos rojos) de diversos puntos de la placa A en su movimiento relativo con respecto a la placa B. Las flechas rojas muestran cómo dichas trayectorias pueden disponerse desde ortogonales a paralelas en relación con el límite entre ambas placas. PN: Polo Norte (Tomado de Alfaro et al., 2013).	60
Figura 4.1. Campo de velocidades absolutas (flechas azules) expresadas en el Marco de Referencia IGB08 derivadas de la comparación de campañas de adquisición geodésica 2003, 2005 y 2013 con elipses de error para un 95% de nivel de confianza. El vector Arojo corresponde a la estación Cumaná (CUMA) de REMOS-IGVSB. Las fallas activas en el noreste de Venezuela son tomadas de Beltrán (1993) y Audemard et al. (2000). Los datos topográficos y batimétricos son tomados de Jarvis et al. (2008) y Weatherall et al. (2015) respectivamente.....	66
Figura 4.2. Campo de velocidades absolutas (flechas negras) expresadas en el Marco de Referencia IGS14 derivadas de la comparación de campañas de adquisición geodésica 2003, 2005 y 2013 con elipses de error para un 95% de nivel de confianza. El vector rojo corresponde a la estación Cumaná (CUMA) de REMOS-IGVSB.	66
Figura 4.3. Velocidades observadas (flechas azules) expresadas dentro del Marco de Referencia para la Placa Suramérica utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi et al. (2012), con elipses de error para un 95% de nivel de confianza. El vector rojo corresponde a la estación Cumaná (CUMA) de REMOS-IGVSB.	70
Figura 4.4. Velocidades observadas (flechas azules) expresadas dentro del Marco de Referencia ITRF2014 para la Placa Suramérica utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi et al. (2017), con elipses de error para un 95% de nivel de confianza. El vector rojo corresponde a la estación Cumaná (CUMA) de REMOS-IGVSB.....	70
Figura 4.5. Perfiles de velocidad paralela a la FEP donde se muestran los modelos más aceptables a partir del modelado de dislocación clásico para un semi-espacio, así como las velocidades observadas E-O a partir de las campañas de medición 2003, 2005 y 2013 (Se incluye la estación continua CUMA).....	72

Figura 4.6. Relación de intercambio entre la profundidad de bloqueo y la tasa de desplazamiento para el modelo homogéneo simple (Resultados: $V_T=21,2$ mm/a, $D=5,0$ km). Los contornos corresponden a valores de ECM y el punto negro indica el mejor modelo de 0,533.	72
Figura 4.7. Distribución de los polígonos a partir de las estaciones geodésicas. Las flechas negras corresponden a los vectores de translación para cada uno de los arreglos triangulares. La numeración corresponde con la de las tablas 4.4 y 4.5.	75
Figura 4.8. Distribución de los polígonos con sus respectivas velocidades rotacionales en $^{\circ}/Ma$ (Tabla N $^{\circ}$ 4.5).	77
Figura 4.9. Distribución de polígonos con sus respectivas tasas de deformación en nano-strain.	78
Figura 4.10. Definición de los bloques tectónicos utilizados en el modelado de bloques tectónicos. Los polígonos están delimitados a partir de las trazas de fallas geológicas (rojo) y se complementan con bordes libres (negro).	80
Figura 4.11. Localización de los polos de Euler para cada uno de los bloques de la zona de Estudio.	82
Figura 4.12. Malla o grilla de velocidades simuladas cubriendo la extensión de los bloques tectónicos utilizados en el modelado numérico de bloques.	83
Figura 4.13. (Izquierda) Componente N-S (ortogonal a la FEP) de velocidades observadas (círculos negros) y velocidades simuladas a partir del modelado de bloques (rombos rojos). (Derecha) Comparación de la Velocidad E-O (paralela a la FEP; círculos negros) con respecto a las simuladas a partir del modelado de bloques (rombos verdes).	84
Figura 4.14. Velocidades observadas (flechas blancas) con elipses de error para un 95% de nivel de confianza y velocidades simuladas (flechas negras) de acuerdo al modelado de bloques. Los desplazamientos están expresados al Marco de Referencia para la Placa Suramérica utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi et al. (2012).	85
Figura 4.15. Velocidades residuales (flechas negras) con elipses de error de 95% de confianza para el modelo de bloques.	86
Figura 4.16. Distribución de polígonos con sus respectivas tasas de deformación en nano-strain a partir del modelado numérico de bloques.	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Listado de puntos de la red geodésica oriental medida y sus respectivas ocupaciones en 2003, 2005 y 2013.....	38
Tabla 3.2. Listado de estaciones REMOS con sus coordenadas aproximadas, ubicación, ocupación en años (diferencia entre la primera y última observación) y disponibilidad de datos para diferentes años.....	40
Tabla 3.3. Listado de estaciones GEORED utilizadas en este trabajo con sus coordenadas aproximadas, ubicación, tiempo de ocupación, y datos disponibles por años.	41
Tabla 3.4. Estaciones complementarias utilizadas en el procesamiento con sus coordenadas aproximadas, ubicación, red (es) y agencia (s) asociadas.	44
Tabla 3.5. Polo de rotación absoluto ITRF2008 para Suramérica (Altamimi et al., 2012).56	
Tabla 4.1. Velocidades absolutas expresadas en el Marco de Referencia IGB08.	64
Tabla 4.2. Velocidades expresadas en el Marco de Referencia estable de Suramérica propuesto por Altamimi et al. (2012).	68
Tabla 4.3. Selección del mejor modelo de acuerdo a la prueba de varianza Fisher-Snedecor.	73
Tabla 4.4. Distribución de polígonos a partir de los sitios de observación. Se muestra la latitud y longitud del centroide de cada arreglo triangular más su velocidad de translación.	74
Tabla 4.5. Datos de velocidad rotacional y deformación (strain) para cada uno de los arreglos triangulares.....	76
Tabla 4.6. Distribución de bloques tectónicos para el modelado de bloques.....	79
Tabla 4.7. Tasa de movimiento promedio de fallas geológicas en mm/a, utilizados como data de entrada en el código TDEFNODE.	81
Tabla 4.8. Parámetros de rotación de los bloques a partir del modelado con TDEFNODE.86	
Tabla 4.9. Parámetros de deformación (strain) de los bloques a partir del modelado con TDEFNODE.	87

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA - ANTECEDENTES

Las mediciones geodésicas precisas con el Sistema de Navegación Global por Satélite (Global Navigation Satellite System –GNSS) han permitido determinar en un muy corto periodo de tiempo: la tasa de movimiento de las placas tectónicas, la dinámica entre los límites de placas, la deformación intra-cortical y cortical, así como la cinemática de las fallas geológicas, entre otros muchos aspectos (e.g., Beutler et al., 1987; DeMets et al., 1990; Lisowski et al., 1991). Aun cuando la tectónica activa en Venezuela ha sido largamente trabajada por diversos autores durante décadas (e.g., Bucher, 1952; Molnar y Skyes, 1969; Pérez y Aggarwal, 1981; Soulas, 1986; Stéphan et al., 1990; Beltran, 1993; Audemard et al., 2000), las mediciones GNSS aportan datos precisos que pueden ayudar a esclarecer temas de fuerte debate.

Las primeras mediciones del Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System –GPS) realizadas en el territorio venezolano, comienzan con el proyecto CASA UNO, un acrónimo para Centro-América y Sur-América y uno es español para designar la primera época de mediciones (Kellogg & Dixon, 1990). Este proyecto fue uno de los primeros esfuerzos civiles en establecer una red GPS; refiriéndose en específico a la constelación estadounidense, que a su vez forma parte del GNSS con otros sistemas administrados por otros países. El proyecto CASA UNO se inició en 1988 por un grupo aproximado de 30 instituciones de 13 países incluyendo Venezuela. El objetivo principal era monitorear deformaciones geodinámicas en la compleja zona tectónica de los límites de las placas Caribe, Cocos, Nazca y Suramérica.

Entre enero y febrero de 1988, comenzando por el occidente venezolano, fueron medidas cinco estaciones situadas a ambos lados de la Falla de Boconó, en sesiones discontinuas de 6 horas, llevadas a cabo en cuatro sesiones de dos días y dos sesiones de tres días. Los sitios seleccionados se caracterizaban por monumentos de concreto con placas metálicas rodeadas por varios marcadores de referencia. Estas mediciones se realizaron también con el objetivo de unir las redes geodésicas locales (Henneberg, 1983; Henneberg y Schubert, 1986) y conectarse con la red de control gravimétrico instalada a lo largo de la Falla de Boconó (Drewes et al., 1991). La primera repetición para la mayor parte de la red CASA se realizó en 1991; sin embargo, las estaciones de Venezuela no se midieron por problemas logísticos relacionados con la Guerra del Golfo Pérsico. La red en Venezuela fue remedida en el año 1993, extendiéndose a 21 estaciones que cruzaban la ya medida falla de Boconó y en esta oportunidad, extendiéndose a la Falla El Pilar (FEP), con seis perfiles en total de tres estaciones cada uno, las estaciones remanentes se utilizaron como estaciones de referencia (Drewes et al., 1989,1995; Kellogg y Dixon, 1990).

A partir de 1994, un grupo de investigación conformado por instituciones nacionales e internacionales, entre ellas la Universidad Simón Bolívar (USB), la Universidad de Colorado (UC), el Instituto Geográfico Venezolano “Simón Bolívar” (IGVSB, antigua Dirección de Cartografía Nacional) y la Universidad del Zulia (LUZ), han realizado diversas campañas de medición geodésica. Estas observaciones han permitido estimar la tasa y dirección del desplazamiento de la placa del Caribe con respecto a la sudamericana, así como el rol cinemático que juega el sistema de fallas de Boconó en el acomodo de parte del movimiento relativo entra las placas del Caribe y Suramérica, y además la cuantificación del campo de velocidades en el noroeste del continente y occidente de Venezuela. En mayo de 1994 y marzo de 1998, se realizaron dos campañas conocidas comúnmente como CARIVEN94 y Venezuela 1998 respectivamente (Bilham, 1994), y seguidamente a estas iniciativas se realizaron mediciones en 1999, 2000, 2004 y 2006.

CARIVEN94 se realizó en 20 sitios con múltiples sesiones de 8 horas distribuidas en tres sesiones de dos y cuatro días, y medidas simultáneamente en 8 a 10 sitios. En la campaña conocida como Venezuela 1998, se remidieron solo siete sitios (ARAY, AVES, CANO, CARU, COCH, JUAN, MARG. Sin embargo, en junio de 1999 (CARIVEN99) se midieron once sitios y se completaron 10 más en marzo de 2000. A partir de 1999.5 hasta 2006, se incrementó el tiempo de medición a sesiones de 12 horas por día durante periodos de cinco días. Durante todas las campañas, se utilizaron receptores doble frecuencia GPS con intervalos de muestreo de 30 s y antenas montadas sobre trípodes con una máscara de elevación de 15°. Los sitios seleccionados corresponden a placas metálicas embebidas en monumentos de concreto. Las estaciones Caracas, Maracaibo y Canoa se han usado comúnmente como estaciones de control (Pérez et al., 2001a, b, 2011, 2018).

Pérez et al. (2001b), a partir del análisis de las observaciones GPS realizadas entre 1994 y 2000 en 22 sitios en las Antillas Menores y el norte de Suramérica, determinaron que la placa Caribe, a lo largo de su límite sur, se desplaza a una tasa de $20,5 \pm 2$ mm/a relativo a la placa Suramérica, según un acimut de $N 84^\circ \pm 2^\circ E$, en $65^\circ O$. Los resultados de este trabajo indicaron que al este del meridiano $68^\circ O$, el campo de velocidades a través del límite de placas Caribe-Suramérica está confinado a una zona de cizalla angosta (<100 km), y el 80% de la deformación en superficie está contenida dentro de una zona de 80 km de ancho centrada a algunos kilómetros al norte de la FEP. Adicionalmente, se estimó el deslizamiento co-sísmico asociado con el terremoto de Cariaco de 1997 utilizando el método de elemento de frontera (King y Nostro, 1999) para estimar los desplazamientos en superficie (Okada, 1985) generados por una compleja dislocación del subsuelo determinada a partir de modelos sísmicos de ruptura (Mendoza, 2000). Las mediciones realizadas entre 1994 y 1999 incluían además de la deformación del límite de placas, una componente importante de deformación co-sísmica. La mejor solución se correspondía a un plano de falla dividido en tres sub-segmentos con un buzamiento $N 84^\circ E$. La profundidad de bloqueo se

estimó en 14 ± 2 km y el desplazamiento co-sísmico se estimó en 0,94, 1,25 y 1,1 m para cada segmento rectangular de oeste a este.

En 1997, la Fuerza de Trabajo Alemán para Terremotos (German Task Force for Earthquakes -GTFE), invitado por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), realiza estudios geofísicos e ingenieriles relacionados con el terremoto de Cariaco ocurrido el 9 de Julio de 1997. Entre los diversos estudios que realizó el GTFE, se incluyó la instalación de una pequeña red de receptores GPS doble frecuencia, con intervalo de muestreo a 30 s, a lo largo de la FEP con el objeto de detectar deformaciones post-sísmicas. Se consiguió determinar un movimiento lateral-derecho de aproximadamente 10 cm entre el 19 de julio y el 22 de agosto del año 1997 cerca de la terminación este de la zona de ruptura, así mismo indicaron que las componentes norte-sur y vertical eran considerablemente pequeñas (Baumbach et al., 2004). En los años sucesivos el Dr. Franck Audemard decide incursionar directamente en la disciplina y para ello celebra reuniones en 1999 con investigadores de instituciones francesas; universidades de Sophia Antipolis (Niza; Dr. Eric Calais) y de Savoie Mont Blanc (USMB, Chambéry; Dr. François Jouanne). Siendo esta última institución, quien muestra real interés en desarrollar la geodesia satelital con fines cinemáticos en Venezuela con la instalación de la red geodésica del Oriente venezolano. Las observaciones de datos geodésicos en 2003, 2005 y 2013 en esta red permitieron determinar el campo de velocidades geodésicas para esta región (Jouanne et al., 2011; Reinoza et al., 2015). El modelado de las observaciones GNSS ha permitido determinar la existencia de una importante componente de desplazamiento asísmico o reptación (creep) en la parte superior de la FEP, reforzando las observaciones previas de marcadores (carreteras, alcantarillas, aceras, construcciones, etc.) progresivamente desplazados (Audemard, 2006). Reinoza et al. (2015) a partir de los modelos en un semi-espacio elástico simple y asimétrico indican una profundidad de bloqueo somero que sugiere reptación de la falla. Los mismos autores aplicaron un modelo de zona de complacencia (ZC), así como una actualización del modelo de simulación del desplazamiento usando dislocaciones no verticales aplicado en una

primera oportunidad por Jouanne et al. (2011). Los resultados indicaron entre 40% y 50% de desplazamiento bloqueado entre la superficie y 12 km de profundidad. La porción oeste del segmento oeste de la FEP se corresponde al segmento afectado por el evento de 1929 (Audemard, 2007) y el segmento este está relacionado más al terremoto de Cariaco de 1997 (Audemard, 2006, Jouanne et al. 2011). Adicionalmente, a partir de la subdivisión de segmentos de falla en varios parches se concluye que el deslizamiento intersísmico no es uniforme. Se destaca una zona con baja tasa de deslizamiento en la zona este de la ciudad de Cumaná, de unos 12 km de ancho y 8 km de profundidad y probablemente relacionada a la zona de ruptura del terremoto de 1929, correspondiéndose entonces con una asperidad a lo largo de la falla. Sin embargo, la reptación total o parcial es presente en ambos segmentos de la FEP. El deslizamiento posterior al evento de 1997 pudiera ayudar a explicar la reptación en el segmento este. Para el segmento oeste, la reptación puede ser explicada de diferentes formas: un efecto post-sísmico del terremoto de 1929, después del cual la reptación debe haber continuado hasta disminuir con el tiempo o como una consecuencia de un efecto post-sísmico del terremoto de 1997 que afecta otro segmento de la FEP. Adicionalmente, Audemard (2011) reveló al menos 13 eventos alrededor de Ms 7,0 (Terremotos moderados) en los pasados 5600 años, lo que representa un periodo de retorno de 430 años, lo cual es significativamente diferente de los 195 años de período de retorno estimados en el caso de un bloqueo completo de los 12 km superiores de la FEP (Jouanne et al. 2011). Esta observación soporta la hipótesis de una reptación significativa durante los periodos intersísmicos, y no solo después de un gran terremoto. Como consecuencia, la reptación observada no puede ser considerada como el deslizamiento post-sísmico clásico de un gran terremoto. La distribución de la sismicidad en profundidad pudiera sugerir la presencia de reptación somera en la parte superior, con una transición gradual a una zona sismogénica parcialmente bloqueada entre 1,5 a 12 km, y la existencia de una zona dúctil bajo los 12 km.

Recientemente, en materia de modelado de bloques que incluyan la caracterización del margen sur de la placa Caribe, se encuentra el trabajo de Symithe

et al. (2015), quien a partir de mediciones GPS por campaña y permanentes, derivó un campo regional de velocidades regionales. Estos autores realizaron un modelo cinemático donde las velocidades en superficie resultan de la rotación de bloques rígidos limitados por fallas bloqueadas y parcialmente bloqueadas acumulando deformación intersísmica. En este modelado se consideran nueve bloques y placas. Sin embargo, en los que respecta al territorio venezolano se tomaron en cuenta (1) el Bloque de Maracaibo limitado por las fallas de Boconó, Oca y Santa Marta, (2) un bloque denominado Venezuela Norte, que se corresponde con el Bloque de Bonaire, y por último las placas (3) Caribe y (4) Suramérica. Se determinaron velocidades angulares con respecto a la placa Norteamérica para estos bloques de $0,635 \pm 0,180$, $0,687 \pm 0,194$, $0,179 \pm 0,004$ y $0,136 \pm 0,006$ °/Ma respectivamente. En el mismo sentido, Pérez et al. (2018) evaluó por medio de un modelo de bloques cinemático, la unión triple entre las placas Caribe y Suramérica y la placa Norandina, así denominada en este trabajo ($\sim 68^\circ$ O; $10,7^\circ$ N). En uno de los modelos con mejor ajuste determinó valores de rotación para diferentes bloques con respecto a la placa Suramérica: (1) un bloque limitado por las fallas de Boconó, Santa Marta-Bucaramanga y el límite norte del bloque de Bonaire con una rotación de $0,403 \pm 0,135$ °/Ma, y (2) un segundo bloque delimitado por Boconó, San Sebastián y La Victoria con $0,339 \pm 0,499$ °/Ma. En una segunda iteración se determinaron velocidades de rotación; pero subdividiendo el primero de los bloques del modelo anterior en (1) bloque de Maracaibo y un bloque de Bonaire (2) oeste y (3) este. Los valores resultantes fueron de $0,660 \pm 0,080$; $0,603 \pm 0,079$ y $0,341 \pm 0,322$ respectivamente. En la misma iteración se presentó el (4) bloque Boconó, San Sebastián y la Victoria con una rotación de $0,657 \pm 0,541$.

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) es una técnica que permite estudiar deformaciones de la superficie en zonas de estudio extensas con muy alta resolución espacial. En Venezuela, recién se comienzan a dar avances en este sentido. De allí, que con el propósito de estudiar las variaciones espacio-temporales del movimiento asísmico en la FEP, Pousse-Beltrán et al. (2016) realizaron el análisis de series de tiempo InSAR aplicando el método NSBAS (New Small BAseline Subset) a

18 imágenes del Satélite Avanzado de Observación Terrestre (Advanced Land Observing Satellite -ALOS-1) para un periodo de 3,5 años entre 2007 y 2011. Las observaciones InSAR mostraron un decrecimiento del movimiento asísmico hacia el este a lo largo de la FEP. La tasa de repteo del segmento oeste (Muelle de Cariaco-Cerezal-Oeste de Casanay) alcanza los $25,3 \pm 9,4$ mm/a en promedio, comparado a $13,4 \pm 6,9$ mm/a en promedio para el segmento este. Los resultados durante este periodo de tiempo, también permitieron observar cierta variación temporal en el segmento oeste, con ciertas aceleraciones en la tasa de reptación en mm/a. Adicionalmente, a partir de los modelos de distribución del desplazamiento a partir de datos GNSS e InSAR se pudo estimar que entre 2007 y 2011, se liberó un desplazamiento de momento $8,0-8,5 \times 10^{17}$ N m, el cual se correspondería a un terremoto de Mw ~6,26.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Generar un modelo de bloques tectónicos en el margen sureste del Caribe basado en mediciones de geodesia espacial.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Recopilar y procesar los datos geodésicos por campaña con la solución ITRF 2014.
- b) Recopilar e integrar los datos complementarios a partir de estaciones geodésicas permanentes e interferometría radar por satélite (InSAR).
- c) Generar el campo geodésico de velocidades actualizado al ITRF 2014.
- d) Generar el modelo de bloques tectónicos a partir de la integración de las velocidades geodésicas.

- e) Precisar las tasas de movimiento de las fallas secundarias limítrofes de los bloques tectónicos; y la velocidad de rotación de estos en caso de que la hubiese.

1.3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio (Figura N° 1.1) comprende casi en su totalidad la zona nororiental de Venezuela, incluye parte de los estados Anzoátegui y Monagas, así como la totalidad del estado Sucre y Nueva Esparta (Islas Margarita, Coche y Cubagua). Aproximadamente entre las longitudes 65° O y 61,8° O, y las latitudes 9,8° N y 11,3° N, cubriendo un área superior a los 58.000 km²

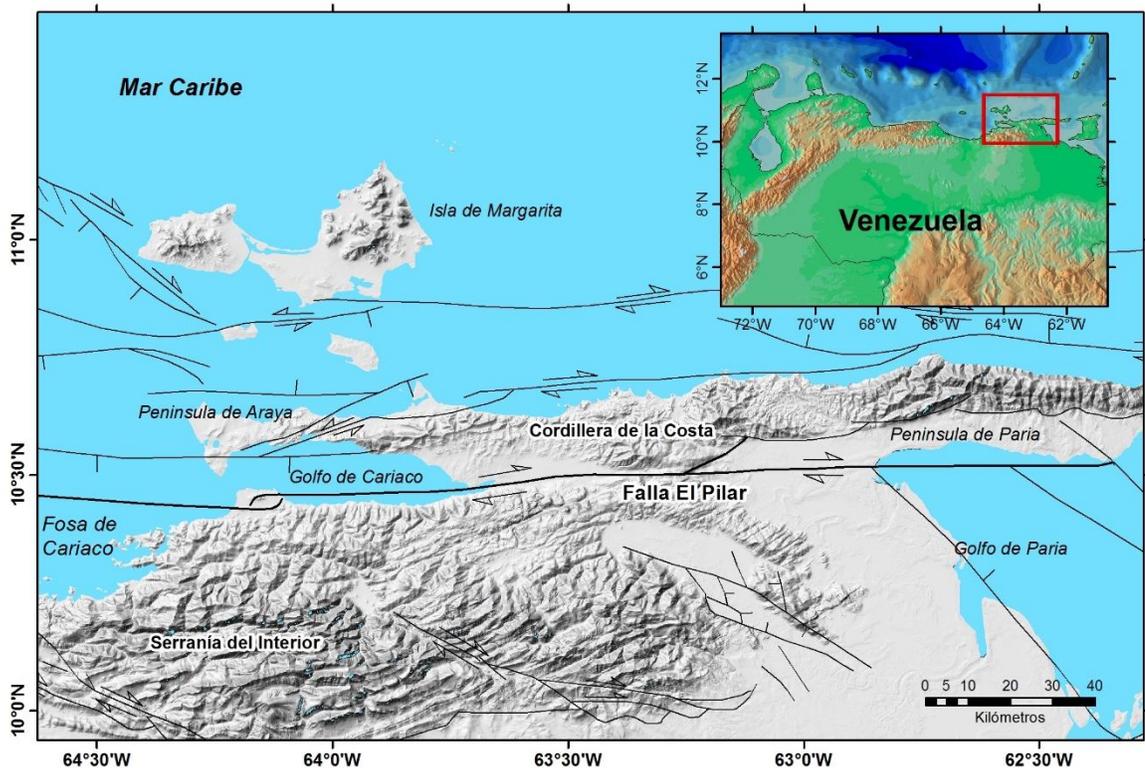


Figura 1.1. Zona de estudio con la localización de la fallas activas en el noreste de Venezuela (Audemard et al., 2000).

1.1. ORGANIZACIÓN DEL MANUSCRITO

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera. Adicional al presente capítulo introductorio, se presenta un capítulo referente al marco geológico y

geodinámico, seguidamente un capítulo de metodología, el cuarto capítulo está conformado por los resultados y análisis; y finalmente un capítulo de conclusiones.

El capítulo II, posterior al capítulo introductorio, incluye una revisión al marco tectónico de la Cuenca Oriental de Venezuela. Tomando como referencia la FEP, se mencionan las diferentes divisiones propuestas al norte y sur de la misma. Se describen con mayor detalle algunos elementos estructurales importantes como la Serranía del Interior (SDI), el cinturón plegado-corrído de Monagas (CPCM), y la cuenca antepaís de Maturín. Seguidamente, se enumeran y describen las fallas activas más importantes de la región nororiental de Venezuela. Se describe ampliamente la FEP, responsable del mayor acomodo del desplazamiento entre las placas Caribe y Suramérica y la cual cuenta con la mayor cantidad de estudios e información en la región. Sin embargo, se listan y describen las fallas de Urica, San Francisco, Río San Juan, Bohordal, Loma de Viento, Aragua de Maturín, Manzanillo-Cariaco, Laguna Grande, Costa Norte, Tunapuy, Charagato, Coche, Punta Arenas y Margarita.

En el tercer capítulo, el marco metodológico, define y describe tres aspectos básicos: adquisición y recopilación de datos, procesamiento y modelado numérico. La adquisición consiste básicamente en la descripción de la metodología utilizada en la obtención de datos geodésicos por campaña en 2003, 2005 y 2013; la recopilación de datos de estaciones geodésicas permanentes, incluyendo la estación CUMA del IGVS. La estrategia de procesamiento contempla el ordenamiento, así como las rutinas de pre y tratamiento de los datos, describiéndose las diferentes herramientas y paquetes computacionales utilizados para la obtención de las coordenadas y velocidades finales. Finalmente, en lo que respecta a este capítulo, se describen los dos enfoques de modelización: el modelado elástico homogéneo que será aplicado a la FEP, un pre-requisito casi obligatorio en este tipo de estudios, y por último el objetivo central de esta investigación que es el modelado de bloques.

En el capítulo 4 se muestran los resultados y análisis siguiendo el orden de las metodologías aplicadas en el capítulo previo: una primera parte referida a la

determinación del campo de velocidades geodésicas, y posteriormente los enfoques de modelado propuestos. Un último capítulo de conclusiones es presentado, donde se incluyen las ideas finales de esta disertación, así como se plasma la visión a futuro que se debería tener con respecto a la disciplina objeto de este estudio.

CAPITULO II:

MARCO GEOLÓGICO Y GEODINÁMICO

2.1. INTRODUCCIÓN

El norte de Venezuela es esencialmente una franja de deformación entre las placas de Caribe y Suramérica (Figura N° 2.1), donde interactúan un conjunto complejo de bloques o microplacas. Este margen de placas activo de 1600 km de longitud es considerado como una amplia zona de transpresión tectónica o partición de esfuerzos muy activa, producto de la asociación de movimiento convergente y además transcurrente dextral (e.g., Stéphan, 1985; Babb y Mann, 1999; Audemard, 2001a; Audemard et al., 2005). Esta zona comprende el sistema de fallas rumbo deslizantes dextral de Boconó–San Sebastián–El Pilar–Los Bajos/El Soldado, extendiéndose hacia Trinidad con la falla de la Cordillera Central/Warm Springs (Molnar y Sykes, 1969; Minster y Jordan, 1978; Pérez y Aggarwal, 1981; Stéphan, 1982; Aggarwal, 1983; Schubert, 1984; Soulas, 1986; Beltrán y Giraldo, 1989; Speed et al., 1991; Singer y Audemard, 1997; Pérez et al., 2001a; 2001b; Weber et al., 2001; 2011; Pindell y Kennan, 2007; Audemard, 2009). La convergencia oblicua entre las Placas Caribe y Suramérica se extiende hacia Trinidad, donde la estructura regional de esta zona es afectada también por la subducción de la litosfera oceánica de la placa Suramérica bajo la placa Caribe en el Arco de Las Antillas Menores (Weber et al., 2001).

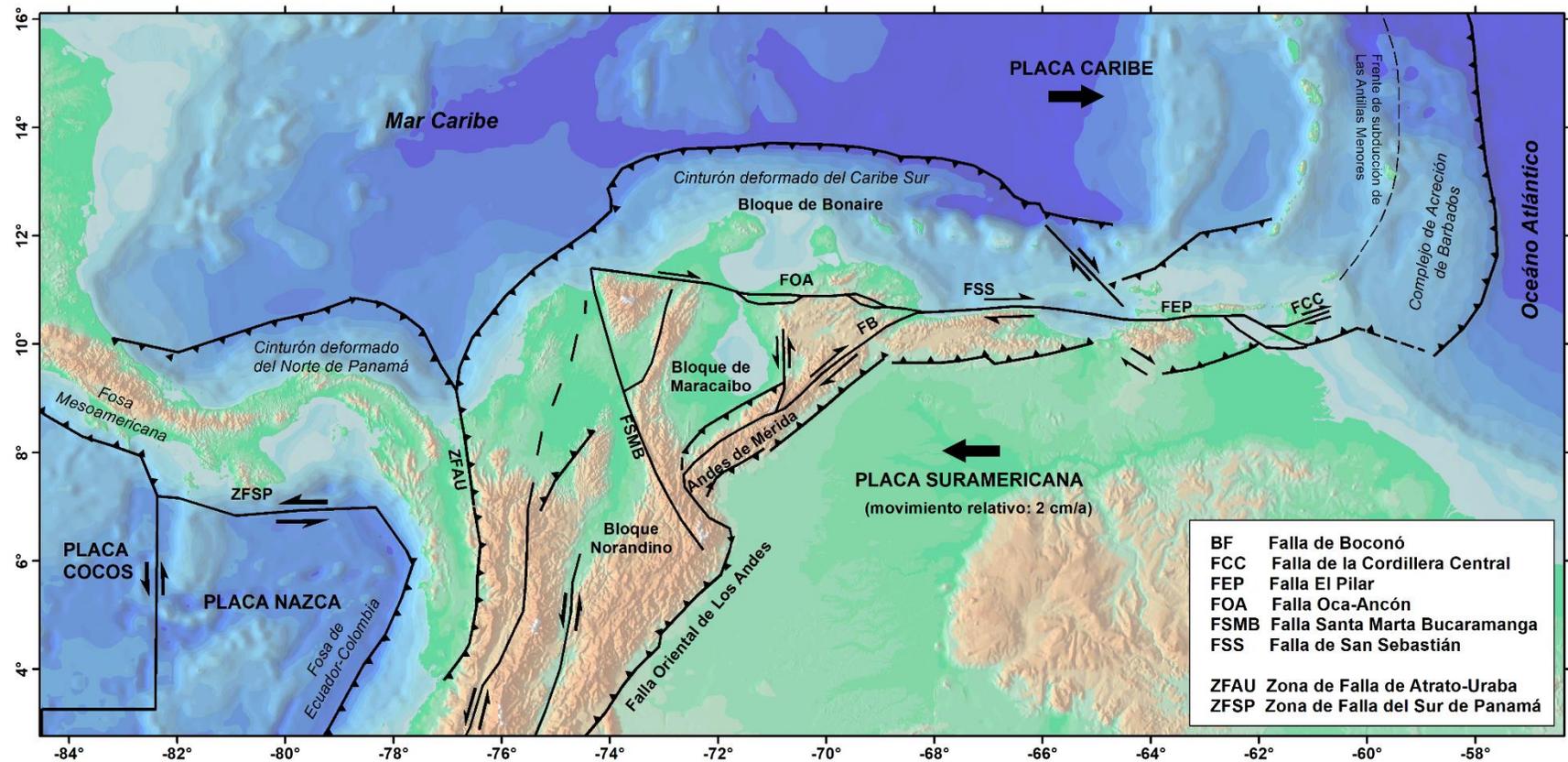


Figura 2.1. Mapa esquemático geodinámico del margen sur del Caribe (Audemard, 1999b; Audemard et al., 2000; Weber et al., 2001; Trenkamp et al., 2002; Soto et al. 2007). Se muestran los principales bloques: Bonaire, Maracaibo y Norandino interactuando con las placas Caribe, Nazca y Suramérica.

2.2. MARCO TECTÓNICO DE LA CUENCA NORORIENTAL DE VENEZUELA

La cuenca oriental de Venezuela está localizada entre las latitudes 8°N y 11°N y longitudes 61°O y 66°O. Cuatro eventos geodinámicos mayores contribuyeron a su formación: (1) La orogénesis paleozoica, (2) el rifting del Jurásico asociado con el rompimiento de Pangea, (3) el margen pasivo del Cretácico al Paleógeno y (4) el margen activo neógeno producido por la colisión oblicua entre las placas Caribe y Suramérica (Jácome et al., 2003b). Claramente, el rasgo estructural más importante de la región nororiental, es la falla transcurrente dextral de El Pilar al acomodar la mayor parte del movimiento entre las placas Caribe y Suramérica. Sin embargo, este límite de placas, es más una zona de deformación transpresional muy activa y compleja donde también interactúan otras estructuras como bloques tectónicos, pliegues y otras fallas menores (Figura N° 2.2).

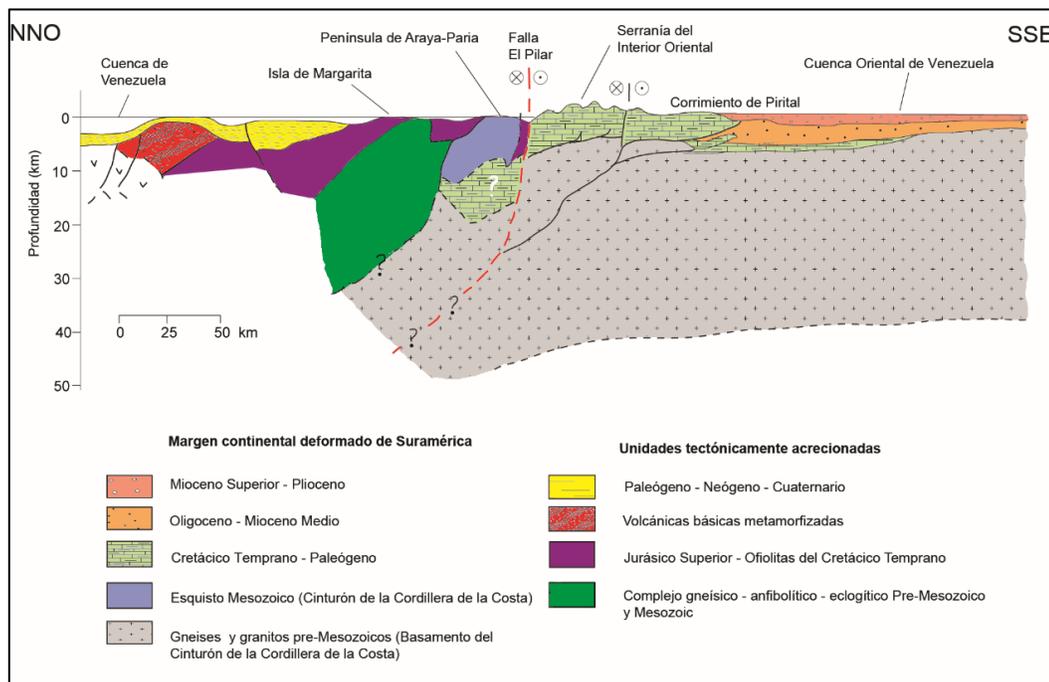


Figura 2.2. Corte geológico simplificado del margen sureste del Caribe. Basado en mapas y secciones compiladas de Bellizzia et al. (1976); Stéphan et al. (1980); Campos (1981); Beck (1986); Chevalier (1987).

Al norte de la FEP, en la región costa afuera nororiental de Venezuela, Pereira (1985) señala la presencia de tres provincias tectono-estratigráficas: Tuy-Cariaco, Carúpano y La Blanquilla. Los elementos estructurales más importantes, en particular para la Cuenca de Carúpano, están representados por la Plataforma Margarita-Los Testigos-Tobago, península de Araya-Paria, los altos de Margarita-Coche-Araya, Patao y San Juan de las Galdonas, las subcuencas Caracolito, Paria, Araya y Este de Margarita, además de la presencia de fallas prominentes de dirección este-oeste y fallas de orientación ENE–OSO a NO-SE (Figuras N° 2.3, 2.4). Otros autores han presentado una división de diferentes provincias genéticas identificadas con el propósito de comunicar las similitudes y diferencias entre áreas geográficas. Entre el SE de la Placa Caribe y la FEP, se disponen de norte a sur: La acreción del Caribe SE, la cuenca intra-arco de Los Testigos, el Arco de los Testigos, El ante arco de la cuenca de las Antillas, la asociación oceánica de Margarita, La cuenca de Carúpano y las Cordilleras Araya-Paria. Del lado sur de la FEP, se disponen de norte a sur: el Traspais de la SDI, el CPCM y la Cuenca Antepais de Maturín (Roure et al., 2003; Summa et al., 2003; Hung, 2005; Figura N° 2.5).

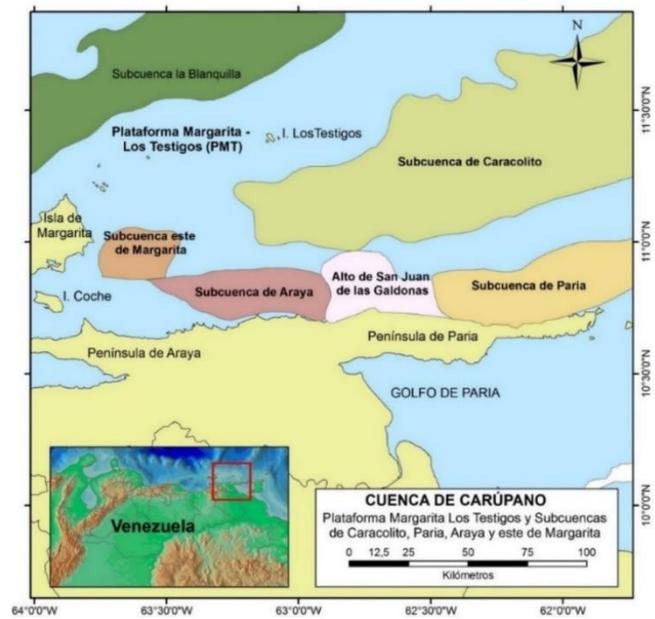


Figura 2.3. Ubicación relativa de la cuenca de Carúpano y sus elementos estructurales más importantes (Modificado de Pereira, 1985).

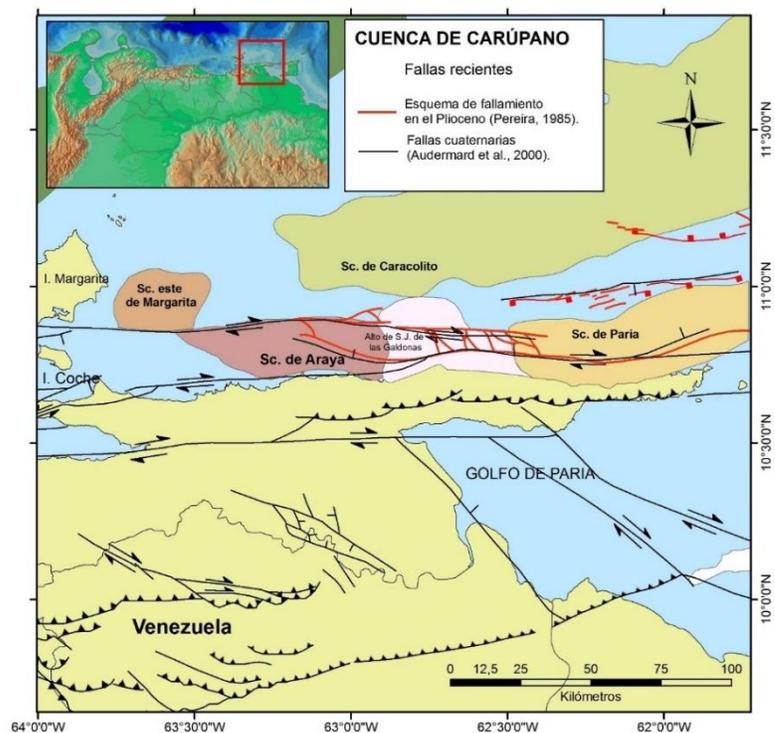


Figura 2.4. Presencia de Fallas prominentes de dirección este-oeste y fallas de orientación ENE–OSO a NO–SE. Sc: Sub-cuenca (Pereira, 1985; Beltrán, 1993; Audemard, et al., 2000).

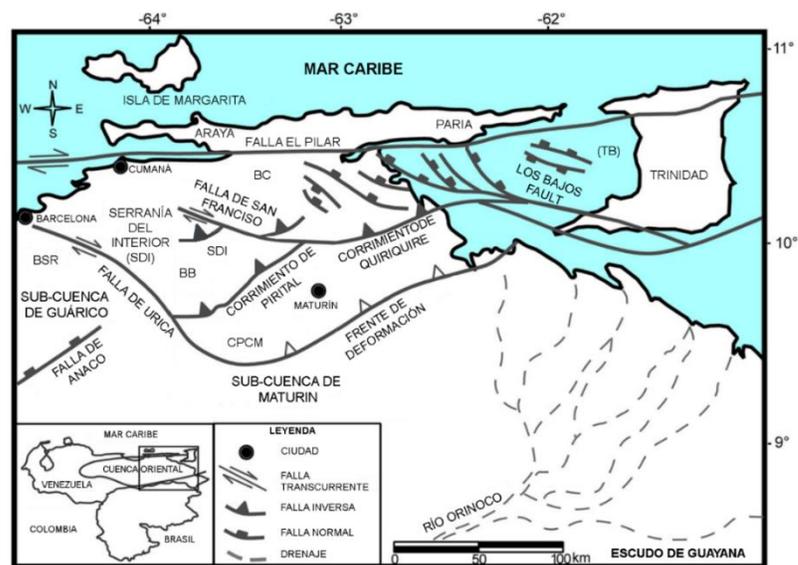


Figura 2.5. Mapa tectónico generalizado del Oriente de Venezuela. BB: Bloque Bergantín; BC: Bloque Caripe, BSR: Bloque Santa Rosa; CPCM: Cinturón de Pliegues y Corrimiento de Monagas; TB: Bloque de Trinidad. (Modificado de Parra et al., 2011).

2.2.1. La Serranía del Interior

La SDI está conformada por un cinturón de pliegues y corrimientos subparalelos con orientación N60°-70° E, constituido por sedimentos cretácicos y paleógenos no metamorfizados (Metz, 1965; Vierbuchen, 1984; Jacome et al., 1999). Está limitada al norte por la FEP, al sur por el sistema de fallas de corrimiento de Pirital y de oeste a este por las fallas dextrales de Urica y San Francisco respectivamente. Esta última falla divide la SDI en dos bloques: El bloque Bergantín al oeste y el bloque Caripe al este (Figura N° 2.5). En general, dos sistemas de fallas afectan principalmente la SDI: primero, las fallas de corrimiento paralelas al rumbo de la cordillera; y el segundo, un conjunto de fallas sintéticas conjugadas con rumbo NO-SE y NE-SO (Vivas y Macsotay, 1995). Las estructuras tectónicas están asociadas con fallas de despegue, inversas y transcurrentes, y están truncadas por las fallas de desgarre lateral derecho de orientación NO-SE como Urica, San Francisco y los Bajos (Hung, 2005).

El levantamiento de esta serranía ocurrió a partir del Eoceno Medio hasta el Mioceno (Locke y Garver, 2005; Sisson et al., 2005). Por su parte, la secuencia sedimentaria contiene los estratos pre-cretácicos y terciarios deformados por pliegues, los cuales son paralelos al eje longitudinal de la serranía (González de Juana et al., 1980; Vivas y Macsotay, 1995). Datos de huellas de fisión de Apatita indican que el acortamiento de SDI oriental cesó en ~12 Ma (Locke y Garver, 2005), reflejando el fin de la colisión. Después del fin de la colisión oblicua entre las placas Caribe y Suramérica en el Mioceno Tardío, la Placa Caribe adquirió su actual movimiento, y el límite de placas evolucionó a un margen casi puramente rumbo-deslizante (Audemard, 1993; 1998; Ysaccis, 1997; Pindell et al., 2005; Audemard, 2009). Debido a la falta de datos profundos en la SDI, las secciones o perfiles publicados presentan un amplio rango de modelos, que presentan acortamiento entre 16-120 km (Passalacqua et al., 1995; Jácome et al., 2003; Roure et al., 2003; Schneider, 2003; Hung, 2005; Clark et al., 2008). En el caso de Hung (2005), este autor propuso seis modelos estructurales, entre corteza-gruesa y corteza delgada. Estos modelos enfatizan la presencia de estructuras que involucran basamento, grábenes invertidos, múltiples despegues y

dúplex. Hay dos tipos de basamentos: un basamento pre-rift del Paleozoico y otro basamento precámbrico y metamórfico. Los modelados 1 al 3 presentados por estos autores son de tectónica de corteza gruesa, mientras que los modelos 4 al 6 son de corteza delgada.

En el marco del proyecto “Geodinámica Reciente del Límite Norte de la Placa Suramericana” (GEODINOS; Schmitz et al., 2014) con el propósito de investigar las estructuras relacionadas al límite de placas Caribe-Suramérica, una serie de datos de sísmica reflexión y refracción se realizaron a lo largo del límite de placas. El modelo de velocidad a través del perfil a lo largo de la longitud 64° O y con una profundidad de observación de 10 km muestra el adelgazamiento del margen pasivo de rocas sedimentarias bajo la SDI debido a la deformación del basamento pre-cretácico. Esta deformación fue el resultado de la reactivación de fallas normales pre-terciarias en fallas inversas como el Graben de Espino durante la transpresión del Mioceno que formó la SDI (Liuzzi et al., 2006). Este modelo es consistente con 4 de los modelos (Inversión del Jurásico) propuesto por Hung (2005). También este modelo coincide con uno propuesto por Rossi (1985) y Chevalier et al. (1987), donde el basamento pre-cretácico está involucrado en la deformación de la SDI. Adicionalmente, el modelo de velocidad sustenta una tectónica de capa delgada en la SDI (Figura N° 2.6).

Recientemente, Fajardo (2015) a partir de un estudio paleomagnético en los bloques de Caripe y Bergantín pertenecientes a la SDI, muestreó 27 lugares en sedimentos del Cretácico al Paleoceno. Los resultados de este trabajo han puesto en evidencia una componente paleomagnética estable inclinada hacia el NE con polaridades normal e inversa. Los análisis estadísticos de esta componente indican una adquisición posterior al plegamiento de la SDI (< 12 Ma). La declinación media en los Bloques de Caripe y Bergantín indican una rotación horaria de $R=37^{\circ}\pm 4^{\circ}$ alrededor del eje vertical. La tasa de rotación media post-Mioceno es cercana a $\sim 3,7^{\circ}/\text{Ma}$ y permanece probablemente activa. Esta autora propone relacionar la rotación horaria regional al desarrollo de un sistema de fallas tipo Riedel formado por la FEP y por las fallas de Urica y San Francisco. Al mismo tiempo, el sistema podría transferir algún

material desde la SDI hacia el CPCM, a través de diferentes corrimientos característicos de esta provincia.

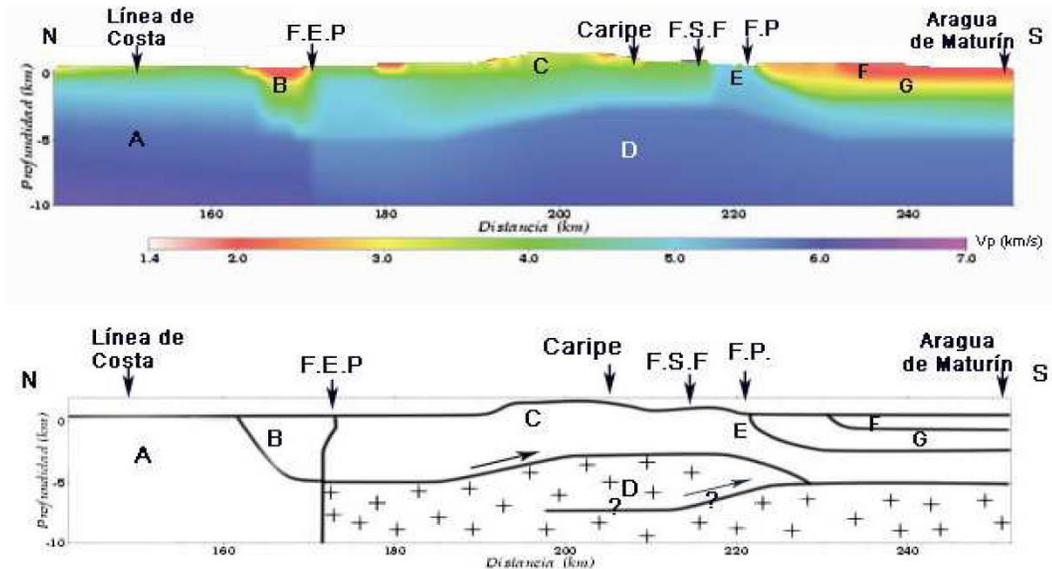


Figura 2.6. Modelo de velocidades del perfil 64° O. Se identifican las siguientes estructuras A: Complejo ígneo-metamórfico de Araya-Paria; B: Cuenca de Cariaco; C: Margen Pasivo y/o Jurásico de la SDI; D: Basamento cristalino y engrosado debajo de la SDI; E: Corrimiento de Pirital; F y G: Sedimentos no consolidados y consolidados de la Cuenca de Maturín. F.E.P.: Falla El Pilar, F.S.F.: Falla San Francisco, F.P.: Falla Pirital (Tomado de Liuzzi, 2006).

2.2.2. El cinturón de pliegues y corrimientos de Monagas

El CPCM conforma la transición entre la SDI y la cuenca antepaís de Maturín (Jácome et al., 2003). Más específico, Pirital y El Furrial son los principales corrimientos, los cuales parecen estar aún activos, pero con un decrecimiento en la tasa de desplazamiento desde el Mioceno tardío (Parra et al., 2011). Estas estructuras tienen diferentes niveles de despegue asociados con dos estados de deformación ocurridos durante el emplazamiento de la SDI: El primer momento involucra despegues someros intra-Cretácico a Terciario y profundos pre-cretácicos, donde el corrimiento de Pirital involucra una sección espesa que parece incluir rocas pre-cretácicas (Roure et al., 2003). Y el segundo estadio consiste en la reactivación de las estructuras más profundas del pre-Cretácico (Jácome et al., 2003); rocas que particularmente no afloran en la SDI

(Gallango y Parnaud, 1995). Adicionalmente, los corrimientos de Cotoperí y Furrial involucran una sección más delgada que el corrimiento de Pirital y están asociados con estructuras de pliegue en curvatura de falla (Márquez et al., 2003). Sin embargo, hacia el sur la evidencia de deformación por convergencia desaparece rápidamente y las fallas se combinan en características lutitas diapíricas y despegues dentro de la sucesión neógena (Roure et al., 1994). Parra et al. (2011) estimó para el CPCM un acortamiento total entre 43 y 59 km que se incrementa hacia el este.

La compresión en esta provincia ha sobrecorrido y plegado las rocas precretácicas sobre las terciarias, donde secuencias del Mioceno Superior al Plioceno-Pleistoceno solapan (*onlap*) hacia el cinturón de pliegues emergentes (Jácome et al., 2003). Adicionalmente, la tectónica del CPCM ha permitido enterrar las estructuras formadoras de los principales objetivos petroleros en esta área (Roure et al., 2003; Parra et al., 2011).

2.2.3. La Cuenca antepaís de Maturín

Por su parte la cuenca antepaís de Maturín está localizada en la Cuenca Oriental de Venezuela, entre las latitudes 9° N and 10° N. Formada en el Neógeno como consecuencia de la carga continental generada por la SDI, hacia el oeste está limitada por la Cuenca de Guárico, hacia el este por el Océano Atlántico, hacia el norte por el frente de deformación y al sur por el Río Orinoco (Figura N° 2.5). Esta cuenca contiene entre 5 a 12 km de sedimentos del Plioceno-Pleistoceno de diferentes fuentes: la SDI al norte, el escudo de Guayana al sur y el arco del Baúl hacia el oeste (Jácome et al., 2003; Sánchez et al., 2011). Estos sedimentos han sido afectados por la deformación del CPCM. Hacia el sur estos sedimentos descansan disconformemente sobre rocas del Precámbrico del Escudo de Guayana (Roure et al., 1994).

2.2.4. Fallas activas región nororiental de Venezuela

Se describen en esta sección las principales fallas activas utilizadas en el desarrollo del presente trabajo (Figuras N° 2.5, 2.7).

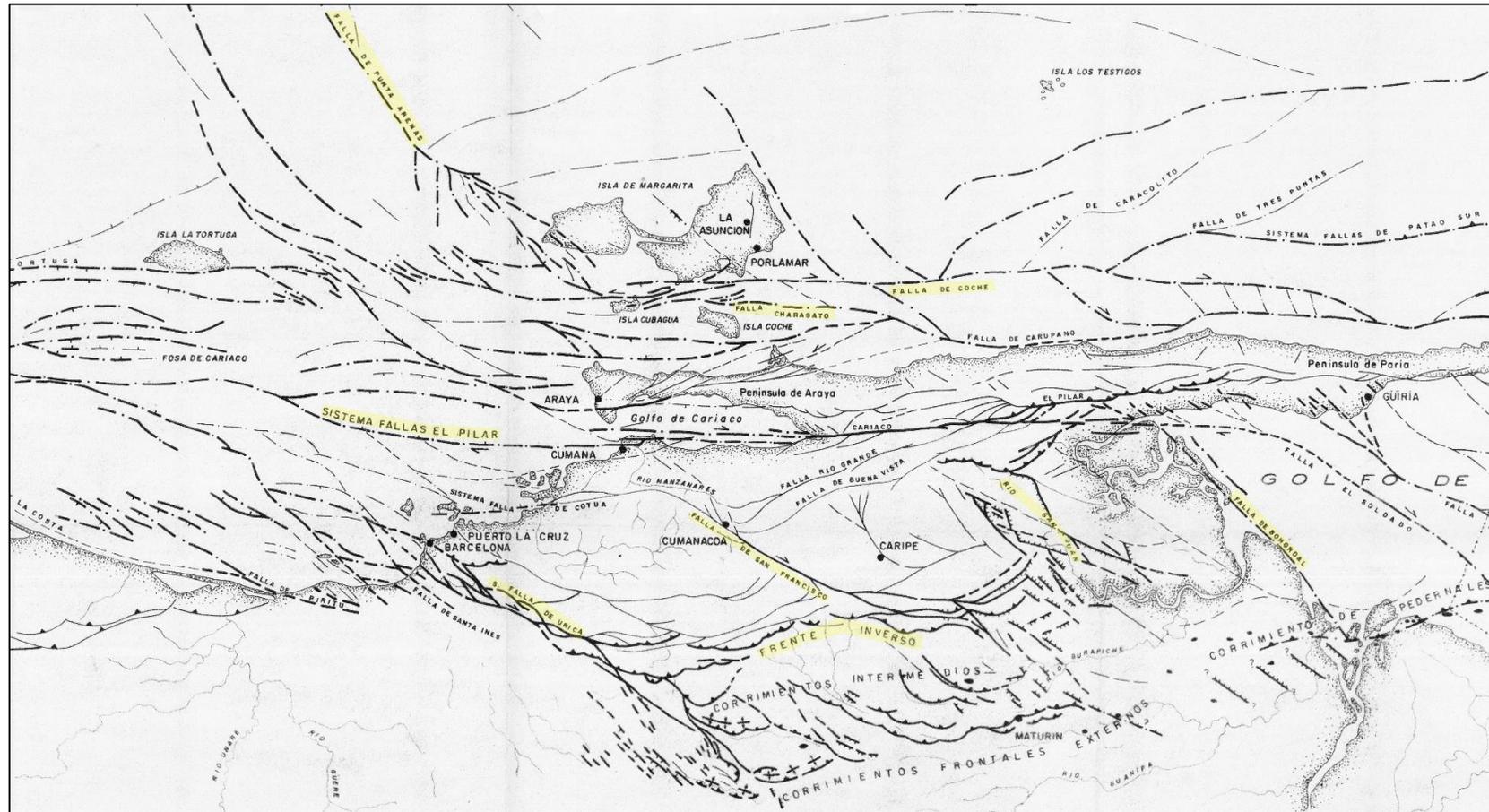


Figura 2.7. Extracto del mapa de fallamiento activo de la región nor-oriental (Tomado de Singer et al., 1994). Se resaltan en amarillo la mayoría de los accidentes descritos en esta sección.

2.2.4.1. La Falla El Pilar

La FEP es una falla transcurrente dextral que se extiende por unos 350 km (eg., Soulas, 1986; Beltrán, 1993, 1994; Audemard et al., 2000), desde la Fosa de Cariaco hasta el Golfo de Paria. La traza activa de la FEP ha sido subdividida en cuatro segmentos diferentes (Figura N° 2.8) de acuerdo al mapa de fallas cuaternarias presentado por Audemard et al. (2000): (1) La sección costa-afuera caracterizada por una traza submarina al oeste de Cumaná, que limita por el sur la fosa o cuenca de Cariaco y finaliza en los cerros de Caigüire, en Cumaná, en un relevo transpresivo (VE-13a), (2) la sección de Cumaná a Casanay, que incluye la superficie de ruptura de los eventos de 1929 y 1997, y se extiende desde el lado norte del relevo transpresivo en Cumaná hasta el poblado de Río Casanay (VE-13b). A partir de arreglos de sismica de alta resolución, la traza submarina de esta sección en el Golfo de Cariaco se ha sub-dividido en dos partes (Audemard et al., 2007; Van Daele et al., 2011) indicando una relevo transtensivo dextral de la FEP en la depresión de Guaracayal (Figura N° 2.9); (3) Una sección de 30 km entre los poblados de Casanay y El Pilar (VE-13c), que ligeramente diverge hacia el ENE conectándose con la falla de Tunapuy y (4) una última sección denominada Guaráunos, descrita como un segmento de dirección oeste-este, desde las Sabanas de Venturini hasta el sur de la Península de Paria en la parte costa-afuera (VE-13d), antes de conectarse con el sistema de fallas de Los Bajos-El Soldado de orientación NO-SE (VE-15) y sub-paralela al sur, respectivamente; y éste a su vez con las fallas de Warm Springs en territorio trinitario, al igual que con un sistema inverso de orientación este-oeste ubicado al sur de la costa sur de Trinidad.

Sin embargo, en lo que respecta a su profundidad, este es un rasgo que no está bien definido. Vierbuchen (1984) a partir de la fuerte pendiente de gravedad a través de la falla infirió que esta falla es casi vertical con una profundidad de 5 a 10 km. Schubert (1984) propuso una profundidad aproximada de 8 km a partir de perfiles de sismica reflexión, asumiendo una velocidad promedio de onda P de 5,2 km. Basado en una interpretación conjunta de datos sísmicos, gravimétricos y magnéticos, Rossi et al.

(1987) obtuvo una profundidad de 15 a 20 km. Más reciente, los trabajos relacionados al terremoto de Cariaco de 1997 de $M_w=6,9$ permitieron estimar la transición de frágil a dúctil para la FEP. Bambauch et al. (2004) muestra como la mayoría de las réplicas ocurrieron entre 1 y 14 km, siendo 9 km la profundidad más común (Figura N° 2.10).

Pérez et al. (2011) estimó una profundidad de 14 ± 2 km para la zona sismogénica a partir de observaciones geodésicas. Clark et al. (2008) producto del modelado a partir de sísmica de gran ángulo, determinó una profundidad del Moho de 48 km bajo la FEP. En esta posición en profundidad, bajo el sistema transcurrente dextral entre la Falla de Coche y la FEP, se incrementa la profundidad del Moho en unos 16 km. Esto coincide igualmente con una región somera (6 km) de velocidades relativamente altas ($>6,5$ km/s), la cual puede estar asociada con metamórficas exhumadas de la Isla de Margarita y la península de Araya-Paria. Sin embargo, esta región está caracterizada principalmente por una sismicidad somera intra-continental en los primeros 20 km asociada a la FEP. La actividad sísmica más profunda que 40 km está asociada al extremo sur de la subducción de las Antillas Menores bajo Trinidad y Tobago, la Península de Paria y al arco de islas activo de la Antillas Menores (e.g., Pérez y Aggarwal, 1981; Sobiesiak et al., 2005; Audemard et al., 2019; Figura 2.11, 2.12).

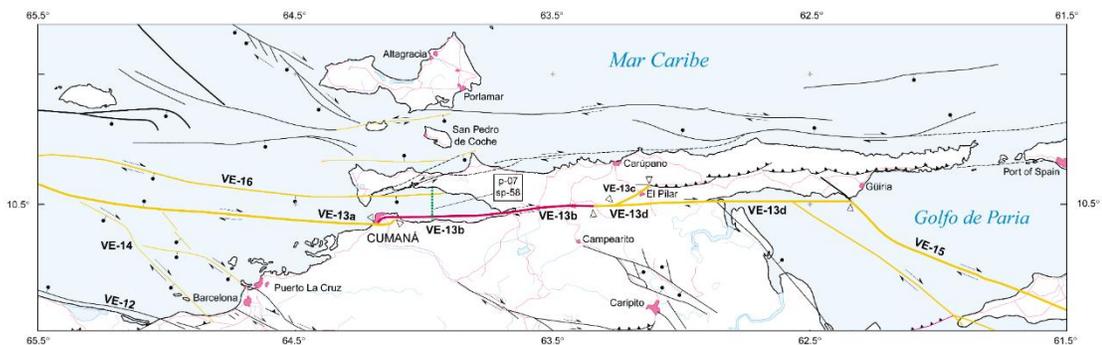


Figura 2.8. La FEP dividida en cuatro segmentos como se muestra en una porción del Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela (Tomado de Audemard et al., 2000). La nomenclatura original VE-13a, VE-13b, VE-13c, and VE-13d del documento representan los segmentos de oeste a este de la FEP. La Falla Los Bajos se muestra bajo el Código VE-15. La línea verde segmentada sobre el Golfo de Cariaco representa la ubicación de la sección sísmica de la Figura N° 2.9.

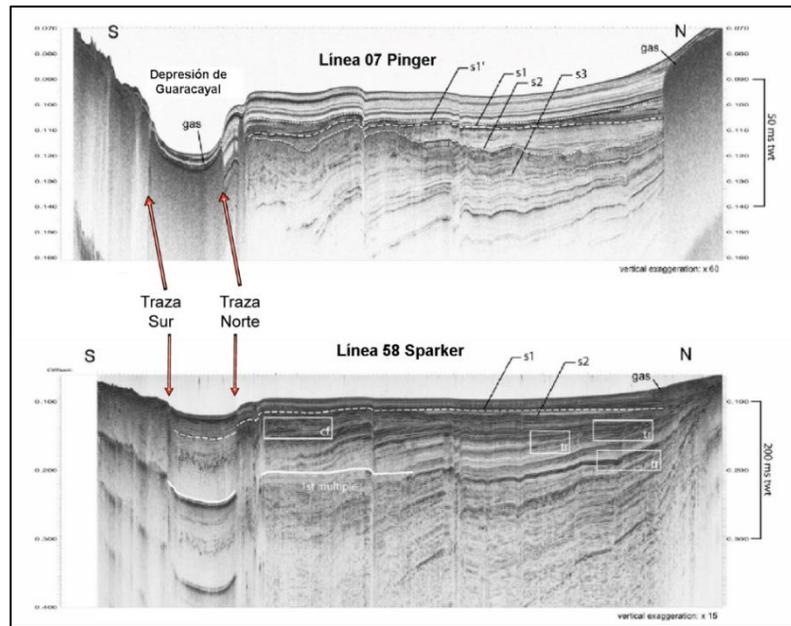


Figura 2.9. Perfiles de sísmica reflexión obtenidos con un perfilador de fango o pinger-3,5 kHz (Arriba) y un sparker-1,1kHz (Abajo). Se observan las trazas sur y norte de la FEP. Para la localización en planta de los perfiles ver la figura 2.6 (Van Welden, 2007).

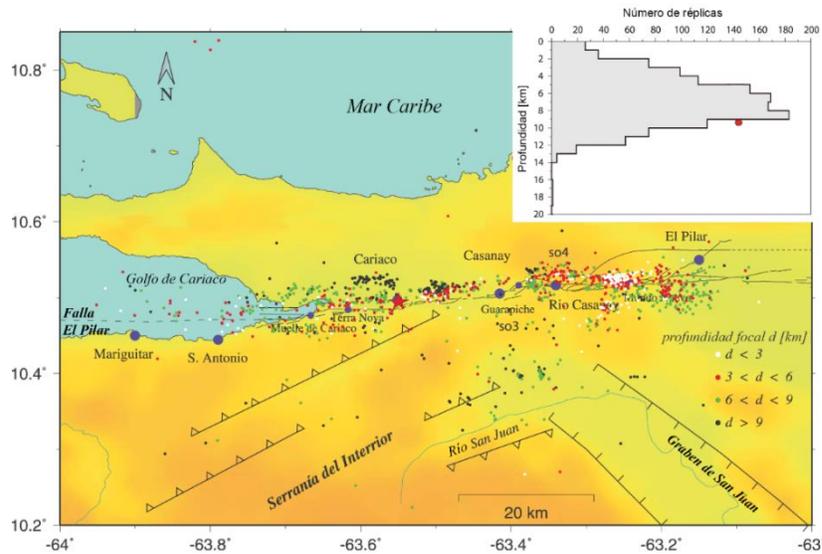


Figura 2.10. Distribución de 1306 réplicas del terremoto de Cariaco a lo largo de la zona de la FEP indicando la profundidad focal. En recuadro inserto arriba y a la derecha, número de réplicas versus profundidad; el círculo rojo muestra la profundidad focal del evento principal estimada por Romero et al. (1999) (Modificado de Baumbach et al., 2004).

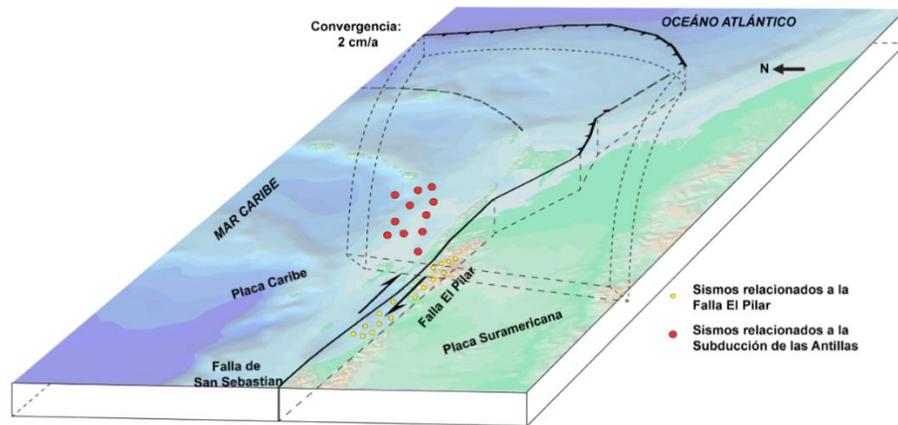


Figura 2.11. Esquema tridimensional y distribución de la sismicidad en el nororiente de Venezuela. Se indican dos tipos diferentes de sismicidad: una primera asociada a la actividad cortical de la FEP y una segunda sismicidad, relacionada con los terremotos más profundos principalmente relacionados con la subducción de las Antillas (Modificado de Jouanne et al., 2011).

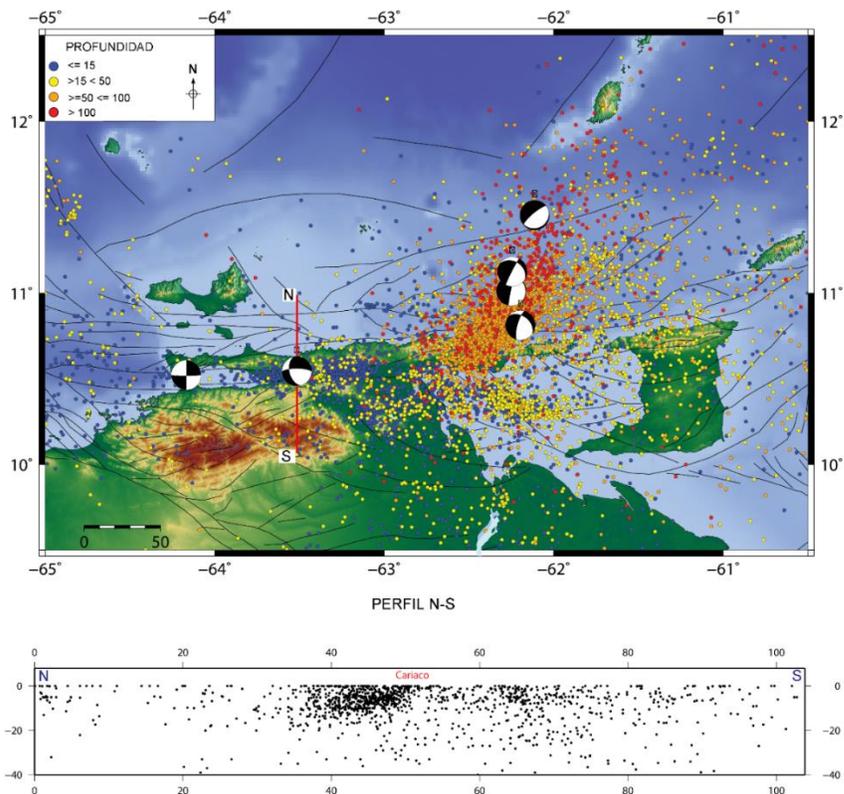


Figura 2.12. Distribución de la sismicidad en el nororiente de Venezuela desde 1910-2010 (Catalogo FUNVISIS). Las fallas activas son tomadas de Beltrán (1993) y los mecanismos focales de Audemard et al. (2005) y Palma et al. (2010).

La FEP separa dos provincias geológicas bastante diferentes (Figura N° 2.2). Del lado norte de la falla, la Cordillera Oriental de la Costa está compuesta de metasedimentos del Cretácico Inferior y rocas ígneas acumuladas en un ambiente tectónico y volcánico activo. Estas rocas presentan un grado metamórfico de facies de esquistos verdes, y se deformaron por la acción de pliegues imbricados y fallas de corrimiento. También se denota la presencia de rocas volcánicas y remanentes ofiolíticos metamorfizados en la facies de esquistos azules (Campos, 1981). Al sur de la FEP, la SDI consiste de un cinturón de pliegues y corrimientos, compuesto principalmente de sedimentos cretácicos no-metamorfizados y sedimentos del Paleógeno (e.g., Metz, 1965; Vierbuchen, 1984; Jácome et al., 1999). Por su parte, Grosser et al. (2001) con base en estudios tridimensionales tomográficos de velocidad, indicó que la resistencia al cizallamiento del material al norte de la FEP es mayor que el material al sur.

Específicamente relacionado con el contraste entre el norte y sur de FEP, Baumbach et al. (2004) indicó que para el terremoto de Cariaco de 1997 la distribución de réplicas se denotó muy marcada y clara al norte de la FEP, mientras que al sur el límite es más difuso. Asimismo, Clark et al. (2008) mostró una variación de la velocidad de 3,5 a 2,2 km/s, de norte a sur a través de la FEP. Christeson et al. (2008) igualmente presentó un perfil regional con sísmica de bajo ángulo indicando la transición de un terreno alóctono de afinidad antearco hacia un margen pasivo del norte de Suramérica (Figura N° 2.13).

El sentido de movimiento dextral de la FEP ha sido sugerido sobre la base de datos geológicos desde Metz (1965) y por algunos pocos mecanismos focales presentados por Pérez y Aggarwal (1981). Inclusive, la existencia de fallamiento o rasgones, una traducción aproximada para “*rents*”, había sido reportada mucho antes desde 1799 por Alejandro de Humbolt y la zona de falla había sido estudiada previamente (Maxwell y Dengo, 1951; Rod, 1956; Alberding, 1957; Christensen, 1961) e incluso ya había sido denominada como El Pilar por Liddle (1946), a partir del pequeño poblado en la región. Evidencias geomorfológicas de la actividad tectónica

como drenajes desplazados lateralmente hacia la derecha, lomos de presión, lagos de falla (*sag-ponds*), ensilladuras y escarpes de falla, han ayudado a establecer el sentido dextral de la FEP (FUNVISIS, 1994; Beltrán et al., 1996). Tras el terremoto de Cariaco de 1997, la dirección y sentido del desplazamiento de la falla fue inequívocamente confirmada por el carácter dextral de la ruptura en superficie (Audemard, 1997, 1999a, 2006), así como por las soluciones de los mecanismos focales de este evento y sus réplicas (Pérez, 1998; Baumbach et al., 1999, 2004; Romero et al., 2002; Audemard et al., 2005; Palma et al., 2010).

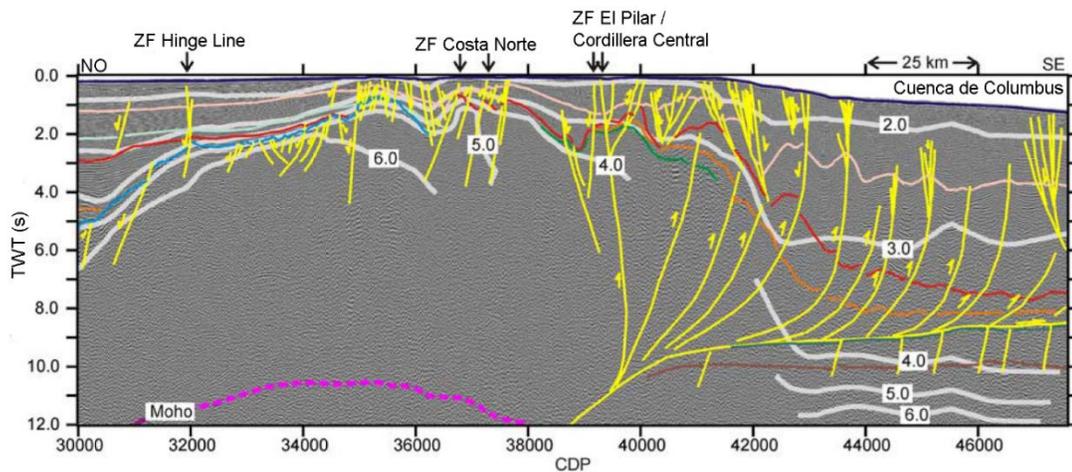


Figura 2.13. Perfil de sismica de reflexión al SE del Caribe cruzando la FEP. CDP: Punto de reflejo común; TWT: Tiempo de viaje doble; ZF: Zona de Falla (Modificado de Christeson et al., 2008).

Más aún, los recientes estudios geodésicos dejan una clara evidencia de que la FEP se desliza dextralmente (Pérez et al., 2001a, b; Weber et al., 2001; Jouanne et al., 2011; Reinoza et al., 2015; Pousse-Beltrán et al., 2016). A partir de modelos elásticos en un semi-espacio uniforme para simular velocidades recientes utilizando un conjunto de dislocaciones, Reinoza et al. (2015) complementando el trabajo de Jouanne et al. (2011), demostraron que los desplazamientos relativos entre Caribe y Suramérica, son acomodados casi en su totalidad por la FEP, así como igualmente mostraron una componente importante de desplazamiento asísmico en el segmento superior del plano de esta falla. Jouanne et al. (2011) indicó la falta de desplazamiento (especialmente acortamiento) en la SDI, y un movimiento hacia el este superior a los 22 mm/a (relativo

a la placa Suramérica Fija) de los puntos observados al norte de la FEP (Figura N° 2.14).

La actividad de esta falla ha sido manifestada por una importante sismicidad histórica, desde la llegada de los conquistadores españoles a comienzos del siglo XVI. El NE de Venezuela ha sufrido varios eventos en 1530, 1684, 1766, 1797, 1853, 1929, (Audemard, 1999b; 2007), siendo el más reciente el evento del 9 de julio de 1997 Mw=6,9, conocido como el terremoto de Cariaco. El reconocimiento en campo de las rupturas en superficie después del sismo, confirmaron que este evento tomó lugar sobre la porción en tierra de dirección ENE-OSO (~80 km) de la FEP, entre los Golfos de Cariaco y Paria (Audemard, 2006). La deformación asociada a las trazas activas de la FEP ha sido identificada utilizando sísmica de reflexión de alta resolución (Audemard et al., 2007; Van Daele et al., 2011) y las excavaciones de trincheras paleosísmicas (Beltrán et al., 1996; Audemard, 2011).

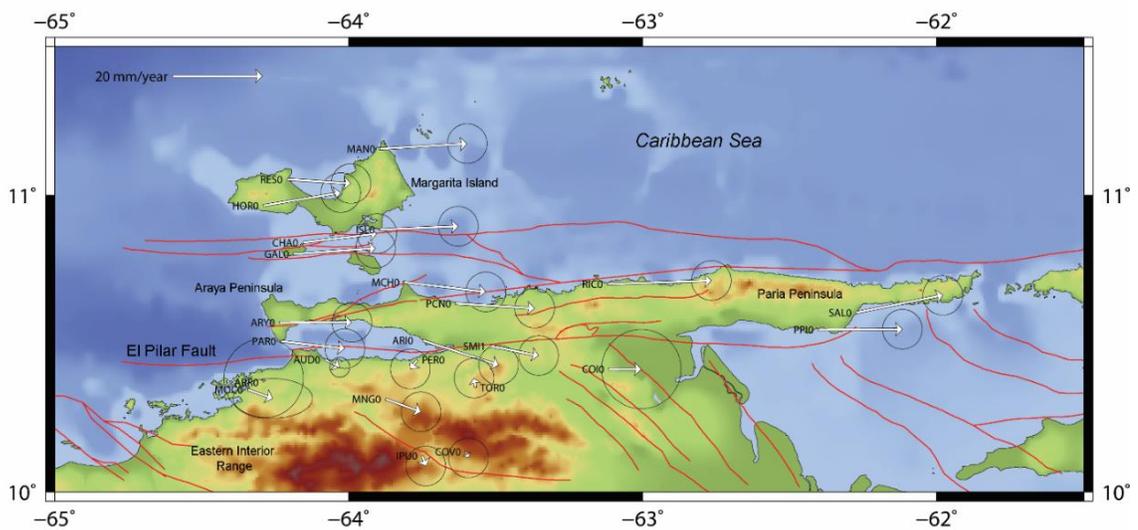


Figura 2.14. Velocidades observadas (blanco) con elipses de error de 66% obtenidas a partir de la comparación de campañas de observación geodésicas 2003 y 2005 (Jouanne et al., 2011). Las velocidades se representan relativas a la Placa Suramérica fija, utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi et al. (2007). Las fallas activas en el NE de Venezuela son tomadas de Beltrán (1993) y Audemard et al. (2000).

2.2.4.2. Falla de Urica

Esta falla constituye un accidente tectónico complejo considerado como una rampa lateral de carácter rumbo-deslizante dextral orientada NO-SE (Figura N° 2.5, 2.7) que entre sus segmentos norte y sur presenta unos 144 km de longitud, con velocidades de 0,75 y 0,5 mm/a respectivamente (Audemard et al., 2000; Audemard, 2001b). La traza y actividad reciente de la Falla de Urica se reconoce en el tramo NO-SE y sobre una distancia de unos 225 km entre el Golfo de Barcelona y el Campo Texas, al sur de la población de Urica, al amortiguarse este accidente estructural contra el corrimiento de Campo Texas-El Tejero (Singer et al., 1994). La Falla de Urica no atraviesa ni desplaza a la FEP al norte (Silver et al., 1975; Beltrán y Giraldo, 1989; Blanco y Giraldo, 1992). Por el contrario, información del subsuelo sugiere que diversos elementos estructurales que forman parte del extremo norte del sistema de Urica cambian progresivamente el rumbo general NO-SE para tomar la orientación característica de la FEP, uniéndose a esta cerca de los 10°30' N (Singer et al., 1994).

2.2.4.3. Falla de San Francisco

Este sistema de fallas atraviesa por completo y diagonalmente en sentido NNO-SSE la SDI (Figura N° 2.5, 2.7). Presenta una longitud de unos 140 a 165 km; en el que se reconocen tres tramos: Tramo al NO de la depresión de Cumanacoa, tramo NO-SE entre el río Manzanares y San Francisco y el tramo este-oeste Guanaguana-Quiriquire (Singer et al., 1994; Audemard et al., 2000). De oeste a este, los tres segmentos muestran velocidades de 0,1; 0,3 y 0,4 mm/a con un movimiento predominantemente transcurrente dextral como se muestra en las recopilaciones de Audemard (2001b) y Paolini et al. (2012). Este accidente estructural, al igual que la Falla de Urica constituye un Riedel de cizalla sintético a una estructura principal como es la FEP (Audemard et al., 2005).

2.2.4.4. Falla de Río San Juan

La configuración de las estructuras activas es de NO-SE a NNO-SSE (Figura N° 2.7) con características de fallas normal-dextral a dextral-normal (Audemard et al., 2005). De acuerdo a la compilación de Audemard (2001b), el sistema de fallas del Río San Juan está conformado por 5 segmentos: de los cuales los segmentos norte-occidente y norte-oriental están descritos con un movimiento dextral normal donde la componente horizontal domina sobre la vertical. Por el contrario, el sur-occidente, sur-centro y sur-oriental se caracterizan por su movimiento normal. Se le han asignado valores de 0,1 mm/a para los segmentos norte y 0,03 mm/a para los segmentos sur. En el informe de Singer et al. (1994), la depresión del río San Juan ha sido formada por la interacción de tres sistemas de falla de dirección NO-SE y ONO-ESE, formando una zona de deformación de más de 80 km de largo y 20 km de ancho. El sistema norte, se dispone “*en échelon*” con respecto a la porción intermedia de longitud y orientación ONO-ESE. En conjunto con otra falla menor de igual orientación, estos accidentes generan una cuenca de tracción compuesta. Por su parte, el sistema sur, reutiliza parte de la falla del río Caripe aparentemente no activa, que interfiere con la terminación oriental de la falla de Quiriquire pertenecientes al sistema de fallas de San Francisco. Se describen escarpes activos de tipo normal, de orientación NO-SE, asociados a bloques basculados.

2.2.4.5. Falla de Bohordal

Esta falla forma parte junto con los accidentes de Los Bajos y El Soldado del conjunto de fallas costa afuera de rumbo NO-SE (Figura N° 2.5, 2.7) con componentes normal y dextral, que se localiza luego de la terminación este de la FEP entre el Golfo de Paria y Trinidad (Audemard et al., 2000; 2005). La falla de Bohordal presenta una longitud de unos 90 km con un desplazamiento de unos 0,5 mm/a con un movimiento predominantemente vertical sobre el horizontal (Audemard, 2001b).

2.2.4.6. Falla Loma de Viento

Conocido también como el frente inverso del tramo Boquerón-Aparicio-Aragua de Maturín de rumbo ENE-OSO, alcanza una longitud de unos 75 km y un ancho máximo de 15 km. En la Figura N° 2.7 se identifica como el Frente Inverso al sur de la población de Cumanacoa. La complejidad estructural y actividad significativa está restringida al segmento occidental de Loma de Viento; el cual está constituido por tres fallas inversas. La tasa de desplazamiento vertical se estimó en 0,06 mm/a a partir de observaciones en el accidente más interno (40 km de longitud) entre Loma de Viento y Los Pozotes. Específicamente, en el río Areo (Hato San Juan) donde se muestra un escarpe de falla de 8 metros de desnivel en un conglomerado del Pleistoceno medio (Singer et al., 1994).

2.2.4.7. Falla Aragua de Maturín

Se reconocen tres segmentos oeste, centro y este con tasas de desplazamiento de 0,10 mm/a y movimiento de tipo inverso (Audemard, 2001b). La Falla Aragua de Maturín constituye el ramal occidental del frente inverso: Tramo Aragua de Maturín-Caripito, el cual presenta en su totalidad una extensión mayor de 40 km, adquiriendo mayor complejidad en sus cercanías a la falla transcurrente dextral de San Francisco. El segmento oeste corresponde a un accidente inverso de geometría muy curva de ~25 km. Por su parte, la porción este presenta una mayor actividad que se evidencia en los Cerros García y Velázquez al sur, generando escarpes de flexura en depósitos del Pleistoceno inferior. Este segmento, al igual que el occidental o este, es de forma curva o alabeada, y a su vez se puede subdividir en tramos más cortos de 5 a 10 km de longitud (Singer et al., 1994). En la Figura N° 2.7, al igual que la Falla Loma del Viento, se identifica como parte del Frente Inverso en su parte más este, al sur de la población de Caripe.

2.2.4.8. Falla Manzanillo-Cariaco

Con una longitud de 90 a 100 km, esta falla inversa presenta un segmento oeste y este con velocidades de 0,05 a 0,10 mm/a (Audemard, 2001b). Este accidente se reconoce por unos 35 km de largo en el tramo submarino del golfo de Cariaco de forma evidente en la batimetría. Al momento de penetrar en tierra, la falla pasa a una falla inversa de ángulo bajo, sin movimientos importantes desde el Pleistoceno medio. La porción oeste u occidental de esta falla es activa al denotarse la deformación del lecho marino; uniéndose al tramo activo de la falla de Laguna Grande en las cercanías de Punta Salazar (Singer et al., 1994). En la Figura N° 2.7 se denota como un alineamiento en la parte submarina norte del Golfo de Cariaco, al sur de la Península de Araya.

2.2.4.9. Falla de Laguna Grande

Esta falla presenta características de transcurrente sinistral de rumbo NE-SO (Audemard et al., 2005) con unos 110 de km de longitud, donde solo un tramo de 40 km se considera activo. Este tramo presenta una forma curvada, cuyo vértice se encuentra al sur del Cerro Barrigón, donde se observa un desplazamiento vertical de aproximadamente 70 metros del post-Pleistoceno inferior, de allí que se infiera una tasa de deformación de unos 0,1 mm/a. Hacia el este de la Laguna Grande, la falla se encuentra sellada por depósitos del Pleistoceno medio, evidenciándose una pérdida de su actividad (Singer et al., 1994). En la Figura N° 2.8 corresponde con un alineamiento NE-SO que atraviesa sinistralmente la Península de Araya.

2.2.4.10. Falla de Costa Norte

Esta falla presenta una longitud de casi 400 km en tres segmentos de oeste a este con un movimiento dextral de aproximadamente 0,35 mm/a y orientación NE-SO (Audemard et al., 2000; Audemard, 2001b). Señalada por una concentración de actividad sísmica, constituye la prolongación al Norte de Trinidad de las fallas de Coche y Carúpano. La zona de deformación presenta entre 7 y 15 km (Singer et al., 1994). Este accidente se muestra en la Figura N° 2.8 como un alineamiento casi oeste-

este desde la parte norte de la Península de Araya continuando por el norte de la población de Carúpano, y siguiendo en dirección este hacia Trinidad.

2.2.4.11. Falla de Tunapuy

Este accidente tectónico se caracteriza por ser una falla inversa de orientación ENE-OSO con un desplazamiento dextral menor (Audemard et al., 2005). En las compilaciones de Audemard (2001b) y Paolini et al. (2012), se denomina como Tunapuy-Arima, ya que se presume que se prolonga en la Falla Arima, ubicada al norte de Trinidad, siendo continuación una de la otra, y se muestra segmentada en cuatro porciones alcanzando una longitud total de 238 km, con un desplazamiento vertical de 0,2 mm/a. Según Singer et al. (1994), la actividad reciente se centra solo en el tramo occidental de 55 km, que deforma depósitos del Pleistoceno inferior. En la Figura N° 2.8 se muestra con simbología de falla inversa, extendiéndose a lo largo de la Península de Paria de oeste a este, y prosigue segmentada hacia Trinidad.

2.2.4.12. Falla de Charagato

Esta falla lateral sinistral presenta unos 40 a 50 km de longitud con un desplazamiento de 1,0 mm/a, afectando la punta de Charagato en la isla de Cubagua (Figura N° 2.7), deformando terrazas de 130 Ka con un desnivel vertical en el orden de 5 metros, y 100 metros mínimos en el horizontal (Singer et al., 1994; Audemard, 2001b). Junto con la Falla de Laguna Grande, estas fallas se consideran atípicas en orientación y desplazamiento con respecto al marco tectónico en el nororiente de Venezuela, de allí que requieran especial atención, al no obedecer el modelo de cizalla simple (Audemard et al., 2005).

2.2.4.13. Falla de Coche

Este accidente de tipo transcurrente dextral, alcanza una longitud de 180 km entre sus segmentos oeste (Figura N° 2.7) y este, con tasa de desplazamiento de 0,40 mm/a (Audemard, 2001b). En Singer et al. (1994) se describe como Fallas Norte y Sur

de Coche con longitudes cercanas a los 65 km, con una pequeña componente vertical en el Segmento sur y muy pequeña a media en el segmento norte.

2.2.4.14. Falla Punta Arenas

Presenta una longitud total de 134 km entre sus tres segmentos norte, centro y sur, con una tasa de desplazamiento dextral normal de 0,5 a 1,0 mm/a (Audemard, 2001b). Según Singer et al. (1994) se divide en un tramo norte, caracterizado por una sola falla de tipo transcurrente dextral de 80 km de longitud y un tramo sur, subdividido en varios ramales con una cierta componente vertical, alcanzando el tramo mayor 40 km de longitud (Figura N° 2.7).

2.2.4.15. Falla de Margarita

Esta falla homónima a la isla de Margarita, se encuentra al este de la misma con una orientación NO-SE. Presenta una longitud aproximada de 60 a 75 km con un desplazamiento dextral de 0,3 mm/a (Singer et al., 1994; Audemard et al., 2000; Audemard, 2001b). En la Figura N° 2.7 se identifica como un alineamiento NO-SE en la parte submarina, inmediatamente al este de la Isla de Margarita.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. INTRODUCCIÓN

La metodología empleada sigue tres aspectos básicos: (1) adquisición y recopilación de datos, (2) el procesamiento de los mismos y finalmente (3) el modelado numérico. La adquisición de datos GNSS incluye la recopilación de mediciones obtenidas a partir de campañas de observación en el Oriente venezolano (2003, 2005, 2013), así como la utilización de datos suplementarios con el fin de mejorar el procesamiento de datos geodésicos. Se tomaron datos de la Red de Estaciones de Monitoreo Satelital GPS (REMOS) del IGVS, de la Red de Estudios de Deformación del Servicio Geológico Colombiano (GEORED-SGC), estaciones del Servicio Internacional GNSS (International GNSS Service -IGS) y datos de redes asociadas al Consorcio Universidad NAVSTAR (University NAVSTAR Consortium -UNAVCO). Simultáneamente, se recopilaron datos de desplazamiento de superficie obtenidos por medio de la técnica InSAR (Pousse-Beltrán et al., 2016). Para el segundo aspecto, la estrategia de procesamiento sigue las fases de ordenamiento de los datos, pre-procesamiento y procesamiento mediante la utilización de programas simples, pero de gran utilidad como el Teqc (Traducción, edición y chequeo de calidad; Estey y Meertens, 1999), y definitivamente programas de cálculo científico más sofisticados como el Bernese Versión 5.2 (Dach y Walser, 2013). Posteriormente y de acuerdo al tipo de enfoque de modelado, el conjunto de datos de velocidades geodésicas, así como los datos de deformación de la superficie son utilizados como dato de entrada en la fase de modelado numérico. Se abordó en primer lugar, un modelado elástico simple (Chinnery, 1961; Weertman y Weertman, 1964; Savage y Burford, 1973), básicamente

un requisito casi obligatorio al momento de realizar un estudio de este tipo. Siendo el objetivo principal de esta disertación la aplicación del modelado de bloques tectónicos, el problema se abordó en dos etapas. Una primera fase de carácter más introductoria y exploratoria mediante el uso de un arreglo triangular bajo la herramienta de cálculo de la deformación para un triángulo de estaciones GPS (*GPS Triangle Strain Calculator*; Cronin y Resor, s.f.). Los resultados de este primer paso dieron las bases para una segunda etapa, para la cual se llevó a cabo un modelado de deformación de bloques tectónicos mediante el uso del código TDEFNODE (McCaffrey, 2009) que consiste en un programa en lenguaje Fortran para modelar elásticamente la deformación y rotación de bloques litosféricos, así como la cinemática de las fallas geológicas que limitan estos bloques: segmentos bloqueados, tasas de deformación, movimientos transitorios, etc.

3.2. RECOPIACIÓN DE DATOS GEODÉSICOS

3.2.1. Campañas de medición de datos

En el año 2003, investigadores del Departamento de Ciencias de la Tierra de FUNVISIS y la Universidad de Savoie-Mont Blanc, instalaron una red geodésica de 36 dispositivos de latón (aleación de cobre y zinc) para el montaje de la antena geodésica, plantados en afloramientos geológicos estables (Figuras N° 3.1 y 3.2) desde el cratón Precámbrico en el sur (sur del río Orinoco) hasta las islas de Coche, Cubagua y Margarita en el norte (Figura N° 3.3; Tabla N°3.1). A esta red se sumaron cuatro (4) vértices previamente instalados por otras instituciones y/o iniciativas (1 PDVSA, 2 REGVEN y 1 CARIVEN 94), en los cuales se sigue la metodología convencional de utilizar trípode para montar la antena geodésica (Figura N° 3.4). A la fecha, se han realizado tres campañas de observación de datos geodésicos en el oriente venezolano (2003, 2005, 2013). A finales de 2003, entre el 29 de noviembre y el 14 de diciembre se midieron 33 estaciones de las 40 posibles. A finales de 2005, del 3 de diciembre al 15 de diciembre, un equipo conjunto de las mismas instituciones, ocuparían 24 sitios. Desde el 16 de enero hasta el 02 de febrero de 2013, luego de una misión de reconocimiento, mantenimiento y recuperación de los sitios de la red geodésica de

oriente llevada a cabo por un equipo conformado por el autor y el tutor del presente trabajo, se llevó a cabo una nueva campaña de medición de 30 estaciones por investigadores de FUNVISIS con el apoyo de personal de PDVSA-INTEVEP y el IGVSB. Con esta última experiencia, se instaló un nuevo sitio (UVA0) en la Isla de Coche y se recuperaron dos sitios pre-existentes (MAN1- HOR1).



Figura 3.1. Dispositivos de latón plantados en afloramientos estables. (A) Modelo de rosca externa y (B) modelo de rosca interna (Tomado de Reinoza et al., 2017).



Figura 3.2. Antena modelo Choke Ring Ashtech instalada en el vértice MAN1 (Punta Manzanillo, Nueva Esparta). El dispositivo de rosca externa se encontró degradado por vandalismo en la misión de reconocimiento de 2013 (se observa ligeramente a la izquierda de la extensión de la antena) y fue sustituido por un modelo de rosca interna (Tomado de Reinoza et al., 2017).

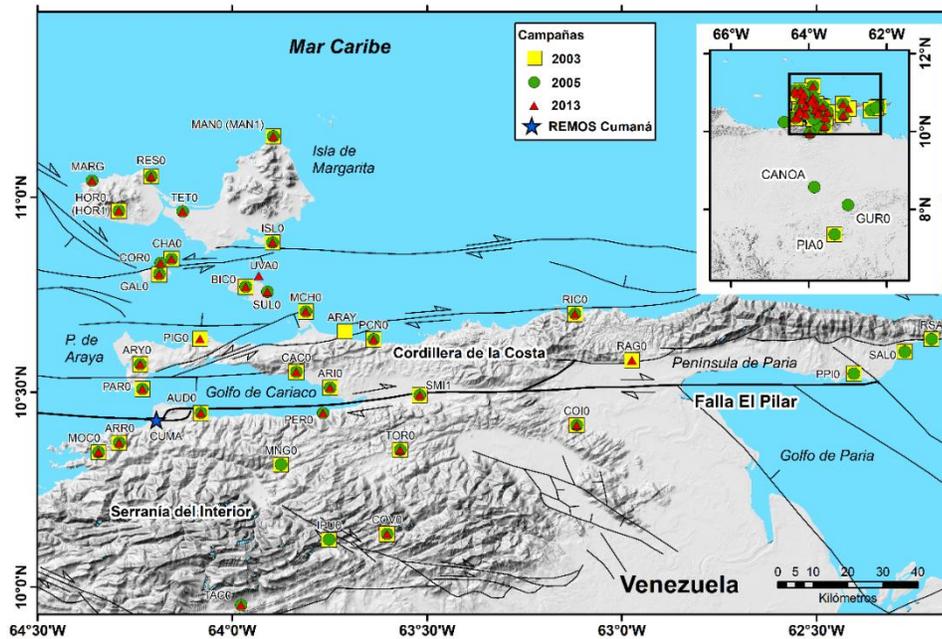


Figura 3.3. Distribución de estaciones en el oriente venezolano. Los recuadros amarillos, círculos verdes y triángulos rojos representan los sitios de medición en los años 2003, 2005 y 2013, respectivamente. La estrella azul corresponde a la estación cGNSS CUMA de la red REMOS-IGVSB. Las fallas activas en el NE de Venezuela son tomadas de Beltrán (1993) y Audemard et al. (2000).



Figura 3.4. Estación CHA0 (Charagato, Isla de Cubagua). Receptor: Trimble 5700 y antena: Zephyr Geodetic Trimble, instalada de forma convencional sobre un trípode topográfico. Crédito fotografía: Franck A. Audemard.

En las tres campañas de medición (2003, 2005 y 2013) los sitios fueron medidos con receptores GPS (Recientemente se han utilizado receptores GNSS) doble frecuencia y antenas geodésicas por un periodo de al menos dos sesiones continuas de 24 horas, extendiéndose a 72 h en algunos casos, mientras que la estación AUD0 fue medida de forma continua durante todas las campañas.

Tabla 3.1. Listado de puntos de la red geodésica oriental medida y sus respectivas ocupaciones en 2003, 2005 y 2013.

Estación	Long (grados)	Lat (grados)	2003	2005	2013
ARAY	-63,711	10,655	X	-	-
ARI0	-63,749	10,511	X	X	X
ARR0	-64,291	10,370	X	X	X
ARY0	-64,236	10,571	X	X	X
AUD0	-64,081	10,447	X	X	X
BIC0	-63,965	10,770	X	X	X
CAC0	-63,837	10,553	X	X	X
CANOA	-63,861	8,568	X	-	-
CHA0	-64,156	10,841	X	X	X
COI0	-63,116	10,415	X	X	X
COR0	-64,184	10,831	-	X	X
COV0	-63,603	10,136	X	X	X
GAL0	-64,188	10,802	X	X	X
GUR0	-62,995	8,112	-	X	-
HOR0*	-64,291	10,965	X	X	X
IPU0	-63,751	10,122	X	X	-
ISL0	-63,896	10,884	X	X	X
MAN0*	-63,895	11,156	X	X	X

MARG	-64,360	11,042	-	X	X
MCH0	-63,811	10,707	X	X	X
MNG0	-63,875	10,314	X	X	-
MOC0	-64,344	10,346	X	X	X
PAR0	-64,231	10,508	X	X	X
PCN0	-63,637	10,636	X	X	X
PDV0	-64,633	10,238	-	X	-
PER0	-63,767	10,446	-	X	X
PIA0	-63,337	7,358	X	X	-
PIG0	-64,083	10,637	X	-	X
PPI0	-62,404	10,547	X	X	-
RAG0	-62,974	10,582	X	-	X
RES0	-64,209	11,053	X	X	X
RIC0	-63,120	10,701	X	X	X
RSA0	-62,205	10,636	X	X	-
SAL0	-62,274	10,604	X	X	-
SMI1	-63,519	10,492	X	X	X
SUL0	-63,910	10,757	-	X	X
TAC0	-63,977	9,954	-	X	X
TET0	-64,127	10,963	-	X	X
TOR0	-63,569	10,352	X	X	X
UVA0	-63,932	10,798	-	-	X

(*) Los sitios recuperados en 2013, HOR0 y MAN0 fueron renombrados como HOR1 y MAN1 respectivamente.

3.2.2. Redes geodésicas permanentes

3.2.2.1. REMOS

Esta red perteneciente al IGVSb consiste de un conjunto de estaciones cGNSS distribuidas en el territorio venezolano. Los datos se encuentran disponibles a través de la dirección electrónica: <http://www.igvsb.gob.ve/remos.html>. Para el procesamiento se incluyeron los datos disponibles de al menos tres estaciones cGNSS entre 2007 y 2013: Caracas, Cumaná y Maracaibo (Tabla N°3.2; Figura N° 3.5).

Tabla 3.2. Listado de estaciones REMOS con sus coordenadas aproximadas, ubicación, ocupación en años (diferencia entre la primera y última observación) y disponibilidad de datos para diferentes años.

Estación	Long (grados)	Lat (grados)	Ubicación	Tiempo (año)	Años						
					2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
CARA	-66,914	10,503	Caracas	2,4				X	X	X	
CUMA	-64,195	10,429	Cumaná	5,0		X		X		X	X
MARA	-71,624	10,674	Maracaibo	6,0	X	X	X	X	X	X	X

3.2.2.2. GEORED - Servicio Geológico Colombiano

GEORED, es el nombre corto adoptado para el proyecto “Implementación de la Red Nacional de Estaciones Geodésicas Satelitales GPS con propósitos geodinámicos”, y es el acrónimo para “Geodesia: Red de Estudios de Deformación”. Esta iniciativa está basada en un proyecto de investigación y desarrollo para la instrumentación geodésica y su aplicación específica en el campo del estudio y análisis de la deformación cortical en Colombia, propuesto e iniciado por el SGC en el año 2007 bajo el marco de la Dirección Técnica de Geoamenazas. Se incluyeron para el procesamiento cinco estaciones listadas en la Tabla N° 3.3 (Figura N° 3.5).

Tabla 3.3. Listado de estaciones GEORED utilizadas en este trabajo con sus coordenadas aproximadas, ubicación, tiempo de ocupación, y datos disponibles por años.

Station	Long (grados)	Lat (grados)	Tiempo (año)	Years				
				2009	2010	2011	2012	2013
ALPA	-72,918	11,528	3,0	X	X	X	X	
CUC1	-72,513	7,932	1,3	-	-	X	X	
PAL1	-73,189	7,136	3,3	X	X	X	X	
UWAS	-72,391	6,451	2,8	X	X	X	X	
VMAG	-74,847	9,287	3,2		X	X	X	X

3.2.2.3. Servicio Internacional GNSS

El IGS es la comunidad internacional civil relacionada a los Sistemas de Posicionamiento Global de alta precisión. Esta es una federación voluntaria de más de 200 agencias alrededor del mundo para juntar recursos y datos de estaciones permanentes GPS y GLONASS con el fin de generar productos de dichas constelaciones. Las estaciones IGS que se incluyeron en el procesamiento se muestran en la Tabla N° 3.4, de las cuales se seleccionaron un conjunto como estaciones de referencia: BOGT, BRAZ, BRFT, BRMU, CIC1, CRO1, FORT, GLPS, GMAS, GUAT, MANA, MAS1, MDO1, SANT, SCUB y SSIA (Figura N° 3.5).

3.2.2.4. COCONet-UNAVCO

Este consorcio sin fines de lucro fue creado en 1984 en respuesta a los desafíos de las aplicaciones del GPS a las geociencias. Actualmente, UNAVCO facilita investigación y educación utilizando geodesia. Los datos y productos de estaciones geodésicas alrededor del mundo están disponibles a la comunidad científica y al público en general a través de la interfaz de archivos de datos (<https://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access-methods/dai2/app/dai2.html#>). A través de esta dirección se puede descargar información de estaciones geodésicas

permanentes y por campaña. Adicionalmente, UNAVCO lleva a cabo varios proyectos de largo alcance, entre ellos el proyecto Red de Observación de Operación Continua GPS del Caribe (Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network-COCONet) y el Observatorio de Límites de Placas (Plate Boundary Observatory – PBO). Así mismo, este consorcio es responsable de monitorear un gran conjunto de estaciones que comprende la red GPS Global de la NASA (NASA Global GPS Network -GGN) y la red IGS.

La red COCONet está conformada por un denso arreglo de estaciones permanentes geodésicas (cGPS) y meteorológicas. Este proyecto fue concebido con el propósito de desarrollar una infraestructura geodésica y atmosférica a gran escala para el Caribe, así como una cantidad amplia e importante de investigaciones. COCONet suministra datos GPS, GPS-PWV (Vapor de Agua Precipitable), mediciones meteorológicas en superficie, series de tiempo de las posiciones diarias, así como el campo de velocidad para cada estación, lo que soporta un amplio rango de investigaciones geocientíficas. Los productos y datos geodésicos están disponibles en el archivo de datos públicos de UNAVCO y en los tres Centros Regionales de Datos seleccionados a través de un concurso de propuestas: Instituto Caribeño de Meteorología e Hidrogeología ubicado en Barbados (CIMH), el SGC de Colombia y el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales en Managua (INETER).

En el marco del proyecto COCONet, se llevó a cabo la instalación de seis estaciones multipropósito (cGPS + Meteorología) en Venezuela. Sin embargo, estos datos no han sido considerados para el presente trabajo, debido a que estas estaciones están registrando datos desde 2015 y 2016 según su fecha de instalación, claramente muy posterior a la última campaña de adquisición de la red oriental en 2013. Para el procesamiento de los datos, se utilizaron 21 estaciones permanentes pertenecientes a la red COCONet (Figura N° 3.5; Tabla N° 3.4).

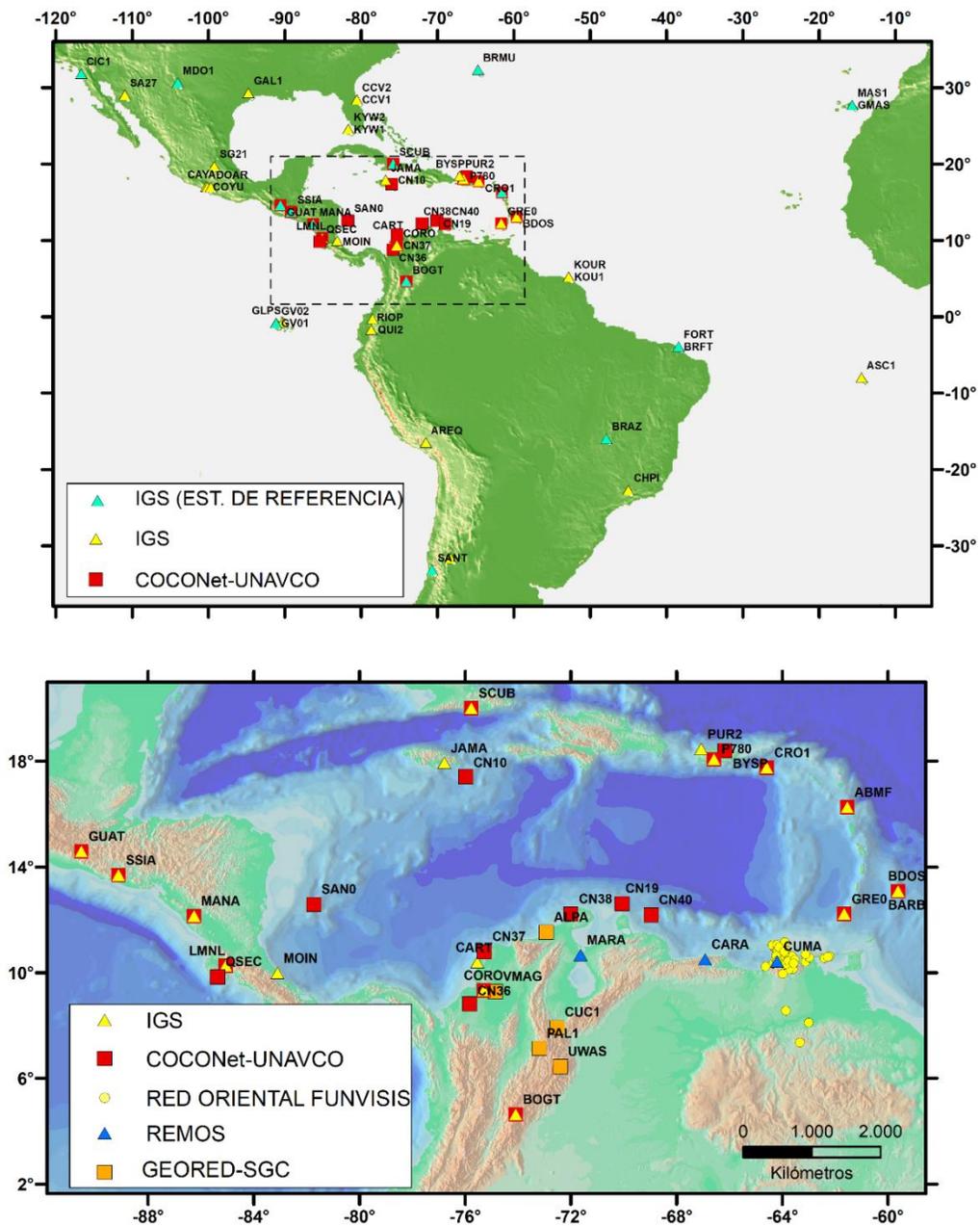


Figura 3.5. Ubicación de las estaciones IGS y COCONet-UNAVCO, utilizadas en el procesamiento de los datos. Se resaltan las estaciones IGS de referencia (Arriba). Acercamiento de la imagen, donde se denotan las estaciones IGS y UNAVCO, así como las estaciones de la red oriental medidas en campaña (2003, 2005, 2013) y las estaciones REMOS y GEORED-SGC (Abajo).

Tabla 3.4. Estaciones complementarias utilizadas en el procesamiento con sus coordenadas aproximadas, ubicación, red (es) y agencia (s) asociadas.

Estación	Long (grad)	Lat (grad)	Ubicación	Red	Agencia
ABMF	-61,528	16,262	Les Abymes, Guadeloupe	COCONet, IGS, PBO	IGN-SGN, UNAVCO
AREQ	-71,493	-16,466	Arequipa, Peru	IGS, GGN	JPL, UNAVCO
ASC1 ¹	-14,412	-7,9512	Ascension Island	IGS, GGN	
BARB	-59,609	13,088	Barbados	IGS	
BDOS ¹	-59,609	13,088	Barbados	COCONet, CORS IGS, PBO	UNAVCO, NOAA-NGS., CZMU
BOGT*	-74,081	4,640	Bogotá, Colombia	COCONet, IGS, PBO	JPL, UNAVCO, SGC
BRAZ*	-47,878	-15,947	Brazilia, Brasil	IGS	IBGE
BRFT*	-38,426	-3,877	Fortaleza, Brasil	IGS	IBGE, NOAA-NGS
BRMU*	-64,696	32,370	Bermuda, UK	IGS	NOAA-NGS
BYSP ¹	-66,161	18,408	Bayamon, Puerto Rico	COCONet, IGS, PBO	UNAVCO,
CART ¹	-75,534	10,391	Cartagena, Colombia	IGS, MAGNA-ECO, TOS	IGAC, DIMAR, CIOH, DGFI
CAYA ¹	-100,267	17,048	Cayaco, Mexico	IGS	UNAM
CCV1 ¹	-80,543	28,460	Cape Canaveral, USA	CORS, IGS	USCG-NOAA
CCV2 ¹	-80,543	28,460	Cape Canaveral, USA	CORS, IGS	USCG-NOAAA
CFAG ¹	-68,233	-31,602	Caucete, Argentina	IGS	CERI
CHPI	-44,985	-22,687	Cachoeira Paulista, Brazil	IGS	JPL
CIC1*	-116,666	31,871	Ensenada, Mexico	IGS08, RGNA-INEGI	SCIGN, JPL, UNAVCO, CICESE
CN10	-75,971	17,415	Jamaica	COCONet, PBO	UNAVCO
CN19	-70,049	12,612	Aruba	COCONet, PBO	UNAVCO
CN36	-75,821	8,82	Montería, Colombia	COCONet, PBO	UNAVCO
CN37	-75,263	10,793	Galerazamba, Colombia	COCONet, PBO	UNAVCO
CN38	-71,988	12,222	Cerrejon, Colombia	COCONet, PBO	UNAVCO
CN40	-68,958	12,180	Curacao	COCONet, PBO	UNAVCO
CORD	-64,470	-31,528	Cordoba, Argentina	GGN, IGS	JPL
CORO	-75,288	9,328	Corozal, Colombia	COCONet, PBO	UNAVCO
COYU ¹	-100,081	17,008	Coyuca, Mexico	IGS	UNAM
CRO1*	-64,584	17,757	St. Croix, VI, USA	COCONet, GGN, IGS, PBO	UNAVCO, JPL
DOAR ¹	-99,651	17,021	Dos Arroyos, Mexico	IGS	UNAM
FORT ¹ *	-38,426	-3,877	Fortaleza, Brasil	IGS	-
GAL1 ¹	-94,737	29,330	Galveston, USA	CORS, IGS	
GALA ¹	-90,304	-0,743	Galapagos Island, Ecuador	IGS	
GLPS*	-90,304	-0,743	Galapagos	IGS	JPL

GMAS* ¹	-15,634	27,765	Maspalomas, Spain	IGS	JAXA
GRE0	-61,640	12,222	Grenada	CHPGN, COCONet, PBO,	UNAVCO
GUAT*	-90,520	14,590	Guatemala city, Guatemala	COCONet, CORS, IGS, PBO	IGN-GT, UNAVCO
GV01 ¹	-91,113	-0,782	Isabella Island, Ecuador	IGS	-
GV02 ¹	-91,133	-0,815	Isabella Island, Ecuador	IGS	-
JAMA ¹	-76,781	17,939	Jamaica	CORS, IGS	USCG - NOAA
KOU1 ¹	-52,806	5,252	Kourou, French Guyana	IGS	-
KOUR	-52,806	5,252	Kourou, French Guyana	IGS	ESOC
KYW1 ¹	-81,653	24,582	Key West, Florida, USA	CORS, IGS	USCG , NOAA
KYW2 ¹	-81,653	24,582	Key West, Florida, USA	CORS, IGS	USCG , NOAA
LMMF	-60,996	14,595	Le Lamentin, Martinique	COCONet, IGS	IGN-SGN, UNAVCO
LMNL ¹	-85,053	10,268	Limon, Costa Rica	IGS, PBO	UNAVCO
MANA*	-86,249	12,149	Managua, Nicaragua	COCONet, IGS, PBO	INETER, UNAVCO
MAS1*	-15,633	27,764	Maspalomas, Spain	IGS	ESOC
MDO1*	-104,015	30,681	Texas, USA	IGS	JPL
MOIN ¹	-83,094	9,987	Moin, Costa Rica	GGN, IGS	JPL, UNAVCO
P780	-66,579	18,075	Cerrillos, Puerto Rico	COCONet, PBO	UNAVCO
PUR2 ¹	-67,067	18,463	Puerto Rico	CORS, IGS	USCG, NOAA
PUR3 ¹	-67,067	18,463	Puerto Rico	CORS, IGS	USCG, NOAA
QSEC	-85,357	9,840	Quebrada Seca, Costa Rica	COCONet, PBO	UNAVCO
QUI2 ¹	-78,494	-0,215	Quito, Ecuador	IGS	NGA
RIOP	-78,651	-1,651	Riobamba, Ecuador	IGS	IG
SA27 ¹	-110,961	29,082	Sonora, Mexico	IGS, SuomiNet	-
SAN0	-81,716	12,580	San Andreas, Colombia	CHPGN, COCONet, PBO	UNAVCO
SANT*	-70,669	-33,150	Santiago, Chile	IGS	JPL
SCUB*	-75,762	20,012	Santiago, Cuba	IGS, COCONet, PBO	CENAI, UNAVCO
SG21 ¹	-99,189	19,741	Teoloyucan, Mexico	IGS, SuomiNet	SNG-UCAR
SSIA*	-89,117	13,697	San Salvador, El Salvador	COCONet, IGS, PBO	CNR, UNAVCO

¹ Estaciones IGS que no se muestran listadas al 26 de febrero de 2018 en el sitio del IGS: www.igs.org/network

* Estaciones IGS utilizadas como estaciones de referencia en el procesamiento.

Esta tabla está basada en el sitio del IGS, el archivo de datos UNAVCO: <https://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access-methods/dai2/app/dai2.html#>, el sitio del proyecto del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS): <http://www.sirgas.org/es/>, y el sitio del Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC): <http://sopac.ucsd.edu/>

Abreviaturas de redes: **CHPGN:** Caribbean Hurricane Prediction and Geodetic Network, **COCONet:** Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network, **CORS :** Continuously Operating Reference Station, **GGN :** GPS Global Network, **IGS:** International GNSS Service, **MAGNA-ECO:** Marco Geocéntrico Nacional de Referencia - Estaciones Continuas (Colombia), **PBO:**

Plate Boundary Observatory, **RGNA-INEGI**: Red Geodésica Nacional Activa-Instituto Nacional de Geografía y Estadística (Mexico), **TOS**: Tide Gauge Observing Station.

Abreviaturas de agencias: **CENAI**S: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cuba), **CERI**: Center for Earthquake Research and Information at the University of Memphis (USA), **CNR**: Centro Nacional de Registros (El Salvador), **CICESE**: Center for Scientific Research and Higher Education at Ensenada, Baja California, **CZMU**: Coastal Zone Management Unit (Barbados), **ESOC**: European Space Operation Center, **GA**: Geoscience Australia, **IBGE**: Brazilian Institute of Geography and Statistics, **IGAC-DIMAR-CIOH-DGFI**: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Dirección General Marítima - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (Colombia) - German Geodetic Research Institute, **IG**: Instituto Geofísico de Ecuador, **IGN-GT**: Instituto Geográfico Nacional (Guatemala) **IGN-SGN**: l'Institut national de l'information géographique et forestière français- le Service de Géodésie et de Nivellement, **INETER**: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, **JAXA**: Japan Aerospace Exploration Agency, **JPL**: NASA Jet Propulsion Laboratory, **NGA**: National Geospatial-Intelligence Agency, **NOAA-NGS**: National Oceanic and Atmospheric Administration - National Geodetic Survey, **SCIGN**: Southern California Integrated GPS Network, **SGC**: Servicio Geológico Colombiano, **SNG-UCAR**: SuomiNet Geodetic- University Corporation for Atmospheric Research **UNAM**: Universidad Autónoma de México, **UNAVCO**: University NAVSTAR Consortium, **USCG-NOAA**: United States Coast Guard-NOAA.

3.2.3. Interferometría Radar por Satélite

Para obtener el mapa de velocidades de la superficie (Figura N° 3.6) para la línea de vista (Line-of-sight –LOS), así como el mapa de desplazamientos acumulados para la LOS en cada fecha de adquisición, Pousse-Beltrán et al. (2016) aplicaron un análisis de las series de tiempo utilizaron un modelo basado en López-Quiroz et al. (2009), Doin et al. (2011) y Jolivet et al. (2012). El tamaño de pixel final para cada mapa fue de aproximadamente 30 m. El error de mínimos cuadrados para cada pixel se determinó a partir del modelo de análisis de series de tiempo y es calculado entre la fase del interferograma observado y uno reconstruido a partir de los retardos de fase sucesivos e invertidos (López-Quiroz et al., 2009).

Para el presente trabajo, se utilizaron valores LOS proyectados en componentes horizontales paralelas a la FEP (descartando los desplazamientos verticales) y remuestreados a 400 m de espaciamiento. Los datos se restringieron a un área de 5 km de la falla, lo que indica una cobertura total de una banda de 10 km de ancho con el propósito de denotar más claramente el fenómeno de reptación y mitigar la perturbación atmosférica.

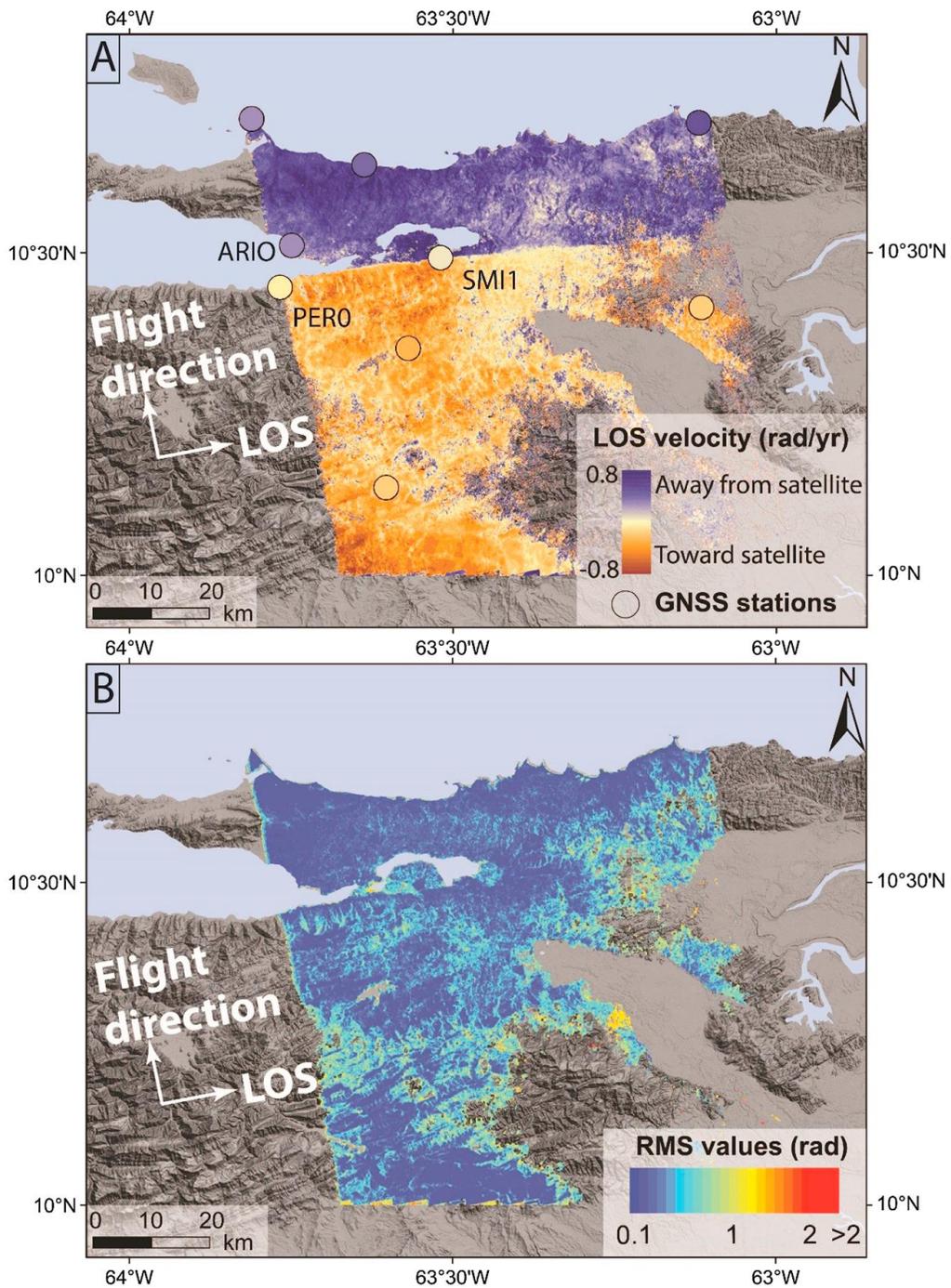


Figura 3.6. (A) Velocidades LOS estimadas (rad/año) para 3,5 años (2007-2011) a partir de datos InSAR con 30 m de resolución. Los círculos representan estaciones GNSS. (B) Valores de mínimos cuadrados (Root Mean Squares –RMS) estimados para el mismo periodo (2007-2011) (Tomado de Pousse-Beltrán et al., 2016).

3.3. ESTRATEGIA DE PROCESAMIENTO

Los datos de 33 estaciones han sido procesados, así como las observaciones complementarias de estaciones de REMOS, IGS, COCONET-UNAVCO y GEORED. Desde las primeras mediciones en el Proyecto CASA UNO (e.g.: Drewes et al., 1995; Pérez et al., 2001b, 2011; Jouanne et al., 2011), se ha utilizado el paquete Bernese desarrollado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (AIUB; Rothacher et al., 1993; Hugentobler et al., 2005, Dach y Walser, 2013) incluidos los parámetros IGS, a fin de procesar los datos obtenidos en Venezuela. La mayoría de los autores han referenciado los resultados al ITRF96, ITRF97, ITRF2005 e ITRF 2008 (Boucher et al., 1999; Altamimi et al., 2007; Altamimi et al., 2012), excepto para el proyecto CASA debido a que el ITRF no existía para el momento (Drewes et al., 1995).

El procesamiento científico y análisis de los datos geodésicos en el presente trabajo está previsto realizarse con el mencionado programa Bernese GNSS en su más reciente versión 5.2 (Dach y Walser, 2013), utilizando modelos de desplazamientos absolutos del centro de fase a la antena, así como órbitas precisas finales del IGS (Beutler et al., 1999) y parámetros de rotación terrestre IGS. Las velocidades serán estimadas de acuerdo a dos soluciones, una para el marco de referencia IGB08 (una interpretación específica del IGS para el ITRF2008; Altamimi et al. 2012) y otro, para el reciente ITRF2014 (Altamimi et al., 2017).

3.3.1. Ordenamiento de datos

Luego de adquiridos los datos, viene una fase inicial de ordenamiento y manipulación de los datos con la herramienta Teqc. Este ejecutable, simple pero bastante poderoso, tiene un enfoque unificado para resolver muchos problemas de procesamiento en casi todos los sistemas de posicionamiento (e.g., GPS, GLONASS, Galileo, etc.), especialmente para los formatos RINEX o BINEX. Para el procesamiento se requiere que los archivos RINEX de cada estación estén dispuestos por días, es decir, ej.: la estación AUD0 medida el 01 y 02 de enero de 2013, debería presentarse en un par de archivos diferentes AUD00010.13O y AUD00020.13O,

respectivamente. Cada archivo debe contener al menos el nombre del sitio, tipo de receptor y antena, y altura de la antena (Figura N° 3.7). Las convenciones para el nombramiento de receptores se especifican en la dirección IGS: ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/rcvr_ant.tab. Posteriormente, utilizando el programa RNXCMP, cada archivo RINEX debe ser comprimido a un formato de archivo conocido como Hatanaka, un formato ASCII de menor tamaño (Hatanaka, 2008).

2.11	OBSERVATION DATA				M (MIXED)	RINEX VERSION / TYPE			
teqc	2013Mar15				20130611 15:17:26	UTCPGM / RUN BY / DATE			
AUDO						MARKER NAME			
AUDO						MARKER NUMBER			
LO-CM-CR	PDVSA FUNVISIS					OBSERVER / AGENCY			
4711129602	TRIMBLE R8				3.30	REC # / TYPE / VERS			
4711129602	TRM5800.00					ANT # / TYPE			
2742007.5760	-5642072.9459	1148882.3689			APPROX POSITION XYZ				
0.1500	0.0000	0.0000			ANTENNA: DELTA H/E/N				
1	1				WAVELENGTH FACT L1/2				
4	C1	L1	L2	P2	# / TYPES OF OBSERV				
30.0000					INTERVAL				
16					LEAP SECONDS				
MSXP Iax86-PII bcc32	5.0 MSWin95->XP 486/DX+				COMMENT				
teqc	2013Mar15				20130611 15:14:15	UTCOMMENT			
teqc	2013Mar15				20130611 15:13:49	UTCOMMENT			
GPP.DLL V3.02					11 - JUN - 13 15:10	COMMENT			
2013	1	16	16	10	0.0000000	GPS	TIME OF FIRST OBS		
END OF HEADER									
13	1	16	16	10	0.0000000	0	15G02G04G05G08G12G15G26G29R05R06R07R16	R19R20R21	
21140304.781	-89232.26617	-58262.15258	21140302.441						
23510298.758	54871.84016	40087.91057	23510308.008						
22358596.305	55035.12116	36598.86758	22358595.852						
25123952.406	-12800.11315	-8298.99656	25123963.957						
24175441.703	44161.92615	28856.77757	24175458.219						
21077132.430	-184734.75416	-120654.98458	21077134.391						
20030222.383	-39130.82417	-25459.10258	20030222.641						
23603657.109	-186356.54715	-128934.49657	23603658.777						
23429236.398	116290.66414	80776.34418	23429245.648						
21241144.430	62970.98817	43900.73819	21241148.355						
22373949.047	-41315.33216	-28617.17618	22373957.730						
23394997.039	-102580.07815	-63743.03918	23395012.523						
21549911.313	166512.39816	111323.47318	21549922.945						
19282068.773	-24217.10916	-16617.34419	19282072.234						
21303559.750	-191666.89817	-132959.52018	21303563.289						
13	1	16	16	10	30.0000000	0	14G02G04G05G09G12G15G26G29R06R07R16R19	R20R21	
21134330.547	-120629.492	7	-82727.63348	21134328.438					
23516677.719	88394.750	6	66209.40247	23516687.633					

Figura 3.7. Visualización de un archivo RINEX perteneciente a medición del día 16 de enero de 2013 en la estación AUD0. Se resalta el nombre del vértice (marker name), el tipo de receptor “Trimble R8” y antena “TRM5800.00”.

3.3.2. Preprocesamiento – Procesamiento

El preprocesamiento y procesamiento permite obtener las coordenadas y las velocidades para cada uno de los puntos de observación con el fin de mostrar el campo geodésico de velocidades, así como construir los archivos de entrada para la fase de modelado. La estrategia de procesamiento con el programa Bernese se detalla en la Figura N° 3.8.

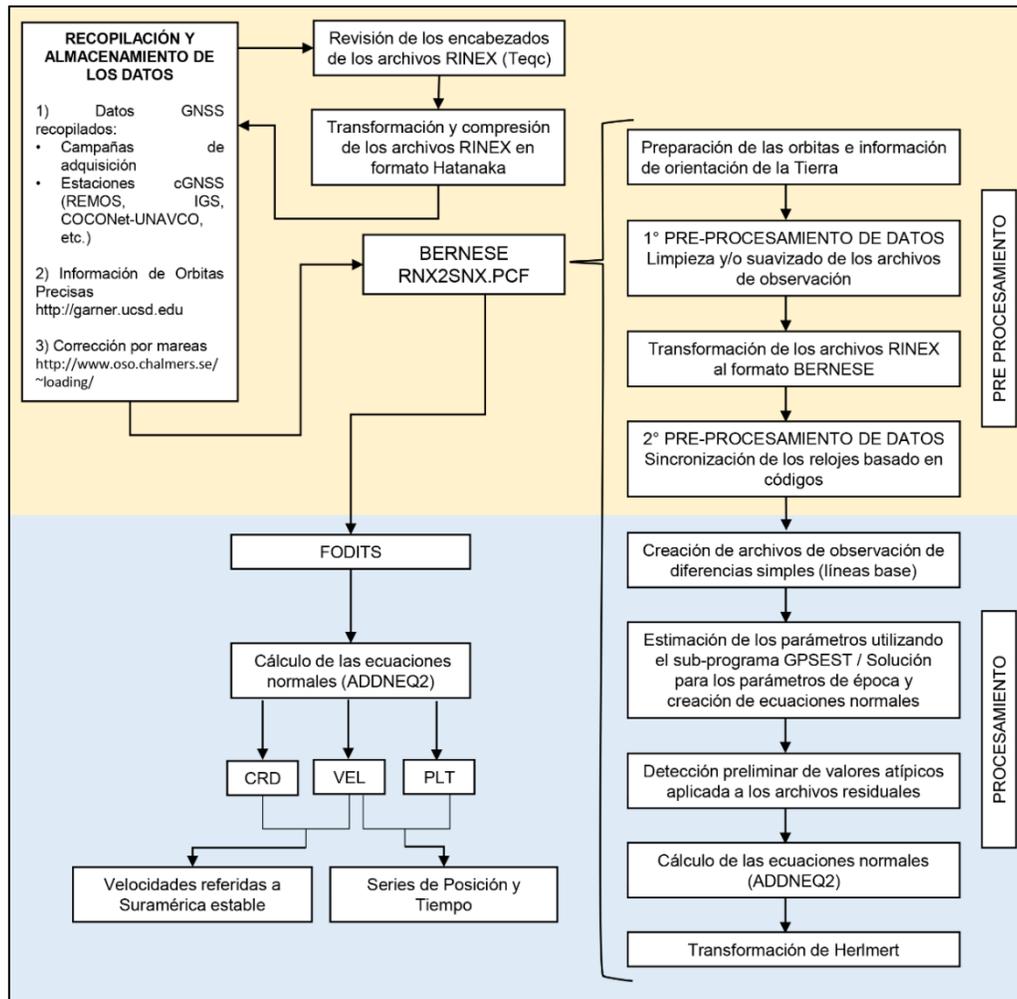


Figura 3.8. Diagrama de flujo de la estrategia de procesamiento con el programa Bernese GNSS incluyendo a partir de la propia recopilación de datos, preprocesamiento. PCF: Archivo de Control de Procesos (Process File Control), CRD: extensión para designar el archivo de coordenadas de estaciones, VEL: extensión para designar el archivo de velocidades de estaciones y PLT: archivo de series de tiempo residuales

Este programa de procesamiento científico es una herramienta sofisticada con los estándares de mayor calidad para aplicaciones geodésicas. Para el procesamiento de los datos, este programa dispone de tres sub-directorios localizados en el directorio $\${HOME}/GPSDATA$: (a) el segmento DATAPOOL, una interfaz donde todos los archivos externos que sirven como dato de entrada pueden ser depositados, (b) el subdirectorio CAMPAIGN52 que contiene todas las datos producto de la campaña de adquisición, en el formato requerido luego de un riguroso pre-procesamiento, (c) y finalmente el área SAVEDISK, donde se recopilan los archivos de los resultados finales (Dach et al., 2007; Dach y Welser, 2013).

3.3.2.1. Determinación de orbitas precisas

Las orbitas precisas son un pre-requisito para todas las aplicaciones en las cuales se requiere una alta precisión GNSS. Para el presente trabajo se tomaron en cuenta orbitas finales IGS expresadas en el marco de referencia Igb08, y para las observaciones más antiguas se consideraron orbitas recalculadas en el marco Igb08 provisto por el Centro de Determinación de Orbitas para Europa (Center for Orbit Determination for Europe -CODE). Los archivos de orbitas precisas vienen provistas en el formato de Orbita de Producto Estándar 3 (Standard Product 3 Orbit -SP3) que son transformados al formato de orbita tabular. Esta conversión incluye la transformación de la información de la órbita a partir del marco fijo a la Tierra a un marco inercial. La órbita estándar es el resultado de una integración numérica de las ecuaciones de movimiento.

Por su parte el archivo de orbita estándar (extensión STD) es un archivo binario que contiene la información de órbita del satélite como una representación polinomial de las posiciones inerciales cartesianas. Esta orbita estándar es estimada por el sub-programa ORBGEN que soporta diferentes modelos de fuerza: potencial de la Tierra hasta un grado y orden seleccionable, las atracciones gravitacionales del Sol, Luna y los planetas mayores (Júpiter, Venus y Marte), los cambios en el potencial gravitacional debido a la Tierra sólida y las mareas oceánicas, así como las mareas de polo

relacionadas de acuerdo a las convenciones IERS 2010 (Petit y Luzum, 2010), y las correcciones relativistas generales de relevancia. Adicionalmente, se considera la fuerza inducida por la rotación terrestre con el uso del archivo de Parámetros de Rotación de la Tierra provisto por los archivos precisos del IGS o CODE y la influencia de la presión de la radiación solar en la órbita (Dach y Walser, 2013).

3.3.2.2. Módulo de preprocesamiento

Luego de la conversión de los archivos de observación RINEX a los archivos de observación Bernese, se realiza la sincronización de los relojes de los receptores con el tiempo GPS y la determinación de las coordenadas aproximadas de cada estación utilizando las mediciones de código de diferencia cero, siendo ésta una de las principales tareas del subprograma CODSP. En este paso, las observaciones con altos residuales son detectadas y marcadas en los archivos de observación (Dach y Walser, 2013).

3.3.2.3. Módulo de procesamiento de los datos

Los datos son procesados utilizando la corrección de centro de fase tomando en consideración el tipo de antena, la elevación y el azimut de los satélites. En el programa Bernese GNSS, las distancias de centro de fase externas y patrones (formato NGS o ANTEX hasta la versión 1.4 disponible en <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/index.xhtml>) se convierten al formato interno del programa por correcciones de centro de fase. La influencia de las mareas oceánicas sobre la posición se estimó utilizando el modelo de mareas oceánicas FES2004 (Lyard et al., 2006) mediante la herramienta disponible en internet de Hans–Georg Scherneck (<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>), mientras que la carga por marea atmosférica es estimada en una rutina propia del Bernese.

3.3.2.4. Formación de archivos de diferencias simples

Los archivos de observación de diferencias simples (líneas base) son creados a partir de archivos de observación de códigos o fases de diferencias cero. Debido a que el programa Bernese GNSS utiliza solo líneas base seleccionadas, éstas deben ser escogidas con cuidado. La estrategia propuesta es seleccionar líneas base con el máximo de observaciones simultáneas y como segundo criterio, seleccionar de acuerdo la longitud de la línea base con el conjunto de datos restantes; de preferencia más cortas. Con el propósito de limpiar y/o suavizar los archivos de observación de fase, las observaciones sin pares o con valores anómalos se detectan y reparan.

3.3.2.5. Estimación de la solución diaria

El programa Bernese GNSS, basado en el ajuste de mínimos cuadrados utilizando mediciones de código de diferencia cero o diferencia doble, puede estimar diferentes parámetros como: coordenadas de la estación, ambigüedades, parámetros de compensación de la antena del receptor, parámetros troposféricos para estaciones individuales, la diferencia de retraso instrumental entre dos frecuencias diferentes pertenecientes al satélite y sitio respectivamente (Differential Code Biases –DCB), parámetros de rotación de la Tierra, parámetros de compensación de la antena del satélite, coordenadas geo-céntricas, parámetros ionosféricos estocásticos, variaciones del centro de fase de la antena geodésica, parámetros de modelos ionosféricos globales (y de estaciones específicas), coordenadas de la estación para épocas específicas, factores de escala para el archivo del mallado de Viena, relojes de estaciones y satélites para épocas específicas, variaciones de centro de fase para la antena del satélite, parámetros de desviaciones por rango, factor de escala para correcciones ionosféricas del más alto rango, transformación a estaciones GNSS específicas, y desviaciones por causas troposféricas.

Para determinar las ambigüedades, coordenadas y desviaciones troposféricas, la estrategia seguida en el presente trabajo sigue: (a) el análisis inicial de ionósfera-libre con cálculo de residuales, (b) análisis de residuales, (c) resolución de

ambigüedades de banda ancha basado en código con todas las líneas base (Melbourne, 1985; Wübbena, 1985), utilizando archivos DCB, (d) resolución de ambigüedades banda ancha (L5) basado en la fase para líneas base < 200 km y cálculo de la solución libre de ionósfera con la introducción de las ambigüedades resultantes, (e) resolución de ambigüedades sin resolver previamente para líneas base < 2000 km utilizando la estrategia de resolución de cuasi ionósfera libre, (f) resolución de ambigüedades directas L1/L2 para líneas base < 20 km y (g) cálculo de las ecuaciones normales.

Como paso final, las soluciones diarias GNSS son transformadas al marco de referencia IGB08 (Altamimi et al., 2012) con una solución de seis parámetros Helmert (tres parámetros de translación y tres parámetros de rotación) utilizando estaciones IGS (e.g.: BOGT, BRAZ, BRFT, BRMU, CIC1, CRO1, FORT, GLPS, GMAS, GUAT, MANA, MAS1, MDO1, SANT, SCUB y SSIA, para el presente trabajo). Con el fin de realizar el ajuste estadístico para reducir la discrepancia entre el modelo funcional y las series de tiempo se utiliza la herramienta que posee el programa Bernese GNSS para la búsqueda de valores anómalos y discontinuidades en Series de Tiempo (Find Outliers and Discontinuities in Time Series –FODITS; Ostini et al., 2008). Es importante mencionar que el programa Bernese 5.2 subestima los errores de las coordenadas diarias debido a errores sistemáticos o a parámetros mal ajustados que no son incluidos en el error formal. Por esta razón, los errores formales son re-escalados o ajustados multiplicando por un factor de 10 con el fin de obtener un error estimado más realístico (Hugentobler et al., 2001). Este ajuste permite observar gráficamente los valores de error para cada sitio de observación con el fin de establecer comparaciones entre ellos.

3.3.2.6. Estimación de velocidades

Las ecuaciones normales diarias son analizadas en conjunto para determinar coordenadas y velocidades. Durante esta estimación, las coordenadas y velocidades son definidas en sus valores IGB08. Como se mencionó, los valores atípicos y las discontinuidades son detectados con la herramienta FODITS. En el caso de las series

de tiempo, las discontinuidades bien conocidas como terremotos o cambios en el instrumental pudiesen ser detectados, y esta información ser introducida en el análisis. De esta manera, los resultados obtenidos a partir de FODITS pueden ser utilizados como información previa para una subsecuente solución en el subprograma ADDNEQ2. Las soluciones finales del procesamiento son dadas en dos archivos principales: “.CRD” y “.VEL” que contienen las coordenadas y velocidades respectivamente. Un archivo de salida con la extensión “.PLT” complementa la solución. Éste se presenta como un archivo ASCII que contiene una serie de datos para construir diagramas de series de tiempo. Estos diagramas muestran la progresión en la posición en mm/a versus el tiempo en años, lo que permite estimar saltos, tendencias y variaciones temporales en las estaciones permanentes. Finalmente, las velocidades han sido estimadas en el marco de referencia IGB08 y después expresadas relativamente al marco de referencia Suramérica fijo.

Desde diciembre de 2016, el programa BERNESE está completamente adaptado para manejar el nuevo sistema de referencia ITRF2014 y su realización IGS (IGS14). Es por ello, entre los objetivos específicos del presente trabajo, se planteó la actualización del mapa de velocidades geodésicas a este marco de referencia.

3.3.2.7. Marco de referencia Suramérica

Las velocidades estimadas en el marco de referencia IGB08 y IGS14 se expresaron en el marco de referencia Suramérica estable utilizando el polo de rotación absoluto ITRF2008 e ITRF2014 propuesto por Altamimi et al. (2012) y Altamimi et al. (2017), respectivamente. Este procedimiento se llevó a cabo mediante la herramienta de cálculo de movimiento de las placas (*Plate Motion Calculator*) disponible en <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html#references>. Para completar el campo de velocidad angular se utilizaron los valores expresados en la Tabla N° 3.5, mientras que la velocidad angular de referencia se fijó en cero (0) para las componentes x, y, z.

Tabla 3.5. Polo de rotación absoluto ITRF2008 (Altamimi et al., 2012) e ITRF2014 (Altamimi et al., 2017) para Suramérica

Marco de Referencia	Placa Suramérica				VCMP (mm/a)	
	ω_x (mas/a)	ω_y (mas/a)	ω_z (mas/a)	ω ($^{\circ}$ /Ma)	E	O
ITRF2008	$-0,243 \pm 0,009$	$-0,311 \pm 0,010$	$-0,154 \pm 0,009$	$0,118 \pm 0,002$	0,44	0,34
ITRF2014	$-0,270 \pm 0,006$	$-0,301 \pm 0,006$	$-0,140 \pm 0,003$	$0,119 \pm 0,001$	0,34	0,35
Transformación a componentes cartesianas ($^{\circ}$ /Ma)						
	Comp.-x	Comp.-y	Comp.-z			
ITRF2008	-0,0675	-0,0864	-0,0428			
ITRF2014	-0,0751	-0,0835	-0,0389			
VCMP: Valor cuadrático medio ponderado						

3.4. MODELADO NUMÉRICO

Los modelados numéricos basados en observaciones geodésicas han sido utilizados para estudiar las principales fallas transcurrentes alrededor del mundo (e.g. Falla de San Andrés, Falla Nor-Anatoliana, Falla de Altyn Tagh), así como la propia FEP, responsable de acomodar la mayor parte del movimiento entre las placas Caribe y Suramérica en el NE de Venezuela (e.g., Mendoza, 2000; Pérez et al. 2001a; 2001b; Jouanne et al., 2011; Reinoza et al., 2015; Pousse-Beltrán et al., 2016). De igual forma, las simulaciones numéricas han sido utilizadas para estudiar la deformación en bloques tectónicos en diferentes regiones del mundo (McCaffrey, 2002; Meade et al., 2002).

Previo al advenimiento del GPS, las mediciones geodésicas dado el caso de triangulaciones, daban información sobre tasas de deformación y levantamiento. Sin embargo, calcular el movimiento de bloques rígidos, rotantes de la litósfera no era un asunto fácilmente medible (McCaffrey, 2002). Matsu'ura et al. (1986) modeló la translación de bloques corticales en un sistema de coordenadas cartesianas deformado en sus bordes por la interacción de fallas, pero sin incluir rotaciones. Prawirodirdjo et

al. (1997) mediante el uso del programa computacional DEF-NODE (McCaffrey, 1995) modeló el problema de tres placas de partición de esfuerzos en Sumatra utilizando polos de Euler esféricos para describir la cinemática del movimiento de bloques y el desplazamiento relativo sobre fallas que limitan bloques. El retro-desplazamiento fue aplicado para estimar la contribución del bloqueo de falla para el campo de velocidades total. Meade y Hager (1999) y McCluskey et al. (2001) invirtieron para translaciones y rotaciones cartesianas de bloques corticales. McCaffrey et al. (2000a; 2000b) y Savage et al. (2000) utilizaron datos geodésicos de Oregon, un estado del NO de Estados Unidos, para invertir rotaciones de bloques sobre una esfera (utilizando polos de Euler) y analizar el bloqueo sobre la subducción de Cascadia. De nuevo, Meade y Heager (2005) describieron la deformación cortical del sur de California asumiendo una serie de microplacas o bloques, aun cuando una versión simplificada ya había sido previamente descrita por Murray y Segall (2001). Generalmente, los datos de entrada para estos modelados se construyen a partir de observaciones geodésicas que incluyen principalmente el uso de GNSS e InSAR.

3.4.1. Modelado elástico homogéneo

La distribución del desplazamiento de una falla en profundidad puede ser inferida a partir de la deformación observada en superficie. La forma más clásica de interpretar el campo de velocidades geodésicas a través de una falla transcurrente es utilizar el modelo de dislocación tipo tornillo (Chinnery, 1961; Weertman y Weertman, 1964; Savage y Burford, 1973). Un modelo de primer-orden para estudiar la deformación intersísmica viene dado por la Ecuación 3.1:

$$v(x) = \frac{V_T}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{x}{D}\right) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde $v(x)$ es la velocidad a una distancia x de la falla, V_T es la velocidad a lo largo de la dislocación en profundidad y D es la profundidad de bloqueo de la falla (Figuras N° 3.9 y 3.10).

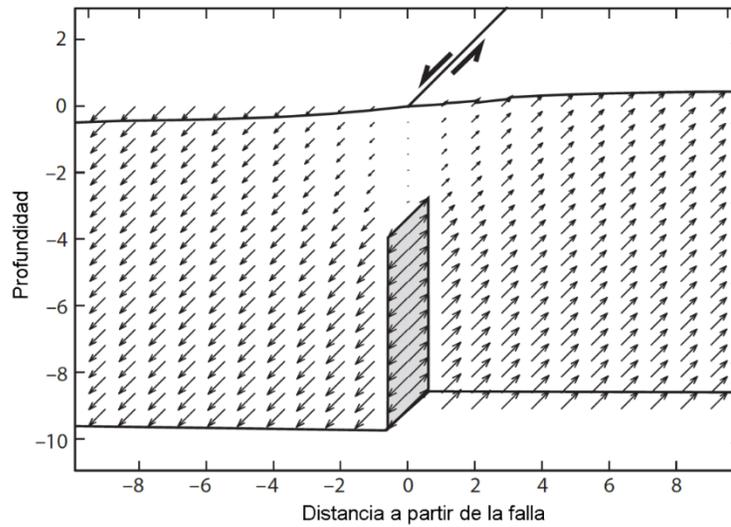


Figura 3.9. Falla bloqueada desde la superficie hasta una profundidad $D=3$ km. La dirección de los desplazamientos simula una perspectiva tridimensional (Modificado de Segall, 2010).

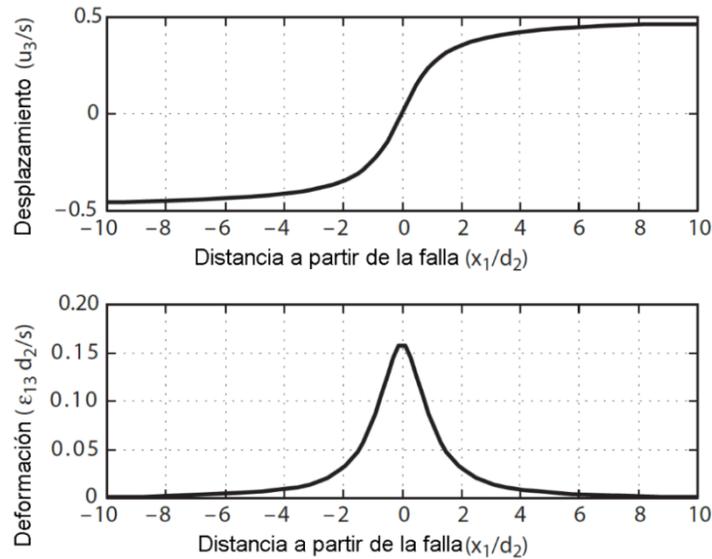


Figura 3.10. Desplazamiento y deformación (strain) intersísmico (Modificado de Segall, 2010).

3.4.2. Modelado de bloques

En una primera etapa, a partir de las velocidades geodésicas de tres puntos geodésicos se construye un arreglo triangular utilizando la herramienta para el cálculo de la deformación de un triángulo GPS (Cronin y Resor, s.f.). Esta metodología permite

de una forma sencilla, calcular la velocidad de translación, velocidad rotacional y parámetros asociados a la deformación (strain) para cada uno de los polígonos estudiados.

Posteriormente, con un enfoque más complejo y basado en los resultados del modelado anterior, se empleó el código TDEFNODE (McCaffrey, 2009). La cinemática de los bloques y al mismo tiempo los efectos de las fallas inter-sísmicamente bloqueadas que los limitan, se puede determinar a partir de velocidades angulares terrestres (Polos de rotación Euler) utilizando un enfoque de retro-desplazamiento. Los datos de entrada consisten básicamente de velocidades y desplazamientos basados en datos geodésicos, series de tiempo, vectores de desplazamientos co-sísmicos, tasas de desplazamiento de las fallas y datos InSAR. La velocidad en cualquier punto sobre la superficie es la suma de dos contribuciones: la rotación de un cuerpo rígido y la acumulación de deformación elástica sobre las fallas. Así que el modelado dependerá de la profundidad de bloqueo de las fallas geológicas, la proporción de acoplamiento de las mismas, e igualmente, sus tasas de desplazamiento.

A pesar de no ser un aspecto desarrollado en la presente disertación. El actual código TDEFNODE, a diferencia de su predecesor DEFNODE incluye el estudio de movimientos dependientes del tiempo y utiliza series de tiempo. La versión previa DEFNODE se limitaba al modelado de desplazamientos continuos, utilizando velocidades lineales. Basado en el hecho de que los campos de velocidades resultan de la superposición de múltiples señales, rotaciones, tasas de deformación y ruido, entre otros aspectos, se hace necesario incluir las series de tiempo, las cuales muestran fuertes efectos no-lineales (movimientos transitorios).

3.4.2.1. Rotación de un cuerpo rígido

Para el cálculo de la rotación de un cuerpo rígido el modelado utiliza la velocidad horizontal y lineal de un punto X_i dentro de un bloque b en el marco de referencia R (Ecuación 3.2):

$${}_R\vec{V}_b(X_i) = {}_R\vec{\Omega}_b \times \vec{X}_i \quad (\text{Ec. 3.2})$$

donde Ω es el vector de rotación (o polo de Euler) que describe la rotación de un punto X_i en un bloque b en el marco de referencia R (R puede ser otro bloque u otro marco de referencia geodésico). El valor de \vec{X}_i es el vector apuntando desde el centro de la Tierra hacia el punto X_i , en el cual la velocidad va a ser estimada (Figura N° 3.11).

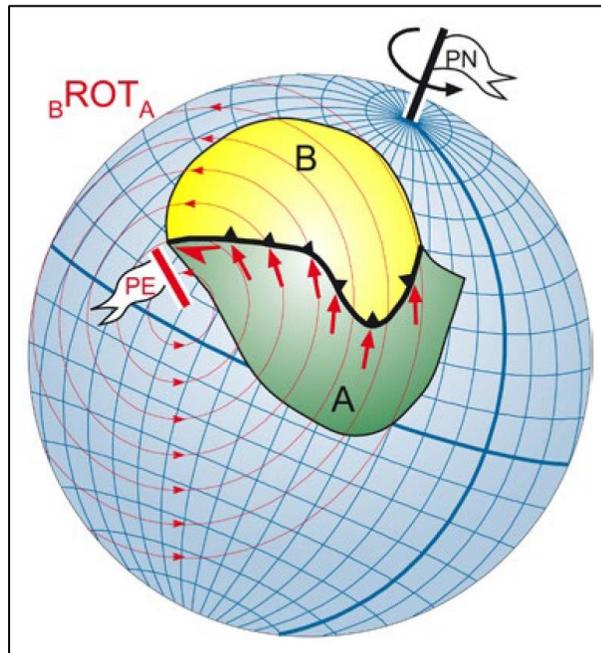


Figura 3.11. Se muestran dos placas litosféricas (A y B) cuyo movimiento relativo puede ser descrito mediante una rotación ${}_B\text{ROT}_A$ o ${}_B\vec{V}_A$ (Siguiendo la nomenclatura de la Ecuación 3.2) alrededor de un polo de Euler (PE). Se indican las trayectorias (círculos rojos) de diversos puntos de la placa A en su movimiento relativo con respecto a la placa B. Las flechas rojas muestran cómo dichas trayectorias pueden dispersarse desde ortogonales a paralelas en relación con el límite entre ambas placas. PN: Polo Norte (Tomado de Alfaro et al., 2013).

3.4.2.2. Acumulación de deformación elástica

Para el cálculo de este aspecto, las fallas son discretizadas en parches o pequeños segmentos. La acumulación de la deformación se modela como la suma de las contribuciones de cada segmento de la falla. Un porcentaje del acoplamiento puede estar asociado a cada segmento (0 a 1). La contribución a cada segmento p sobre una

falla f en la posición de un punto X_i es modelado de la siguiente manera según la Ecuación 3.3:

$$\vec{V}_{fp}(X_i) = \sum_{j=1}^2 \Phi_{fp} \cdot G_{j(x_i, x_{fp})} \cdot \vec{S}_{fpj} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde \vec{S}_{fpj} es la tasa de deslizamiento y Φ_{fp} es la proporción de acoplamiento sobre cada segmento p de la falla f , G es la función de Green que describe el efecto en X_i de una unidad de deslizamiento.

3.4.2.3. Tasa de deslizamiento de la falla

El deslizamiento sobre un segmento dado viene dado por la Ecuación 3.4:

$$\vec{S}_{fpj} = {}_h \vec{\Omega}_f \times \vec{X}_p \quad (\text{Ec. 3.4})$$

donde ${}_h \vec{\Omega}_f$ es el vector rotación que describe la rotación de un cuerpo rígido del bloque deprimido f con respecto al bloque levantado h y \vec{X}_p es la posición del segmento p . El polo Euler ${}_h \vec{\Omega}_f$ viene dado por la siguiente Ecuación 3.5:

$${}_h \vec{\Omega}_f = {}_h \vec{\Omega}_R - {}_f \vec{\Omega}_R \quad (\text{Ec. 3.5})$$

donde ${}_h \vec{\Omega}_R$ es el vector rotación del marco de referencia R relativo al bloque techo h y por consiguiente, ${}_f \vec{\Omega}_R$ es el vector de rotación de R con respecto al bloque deprimido f .

3.4.2.4. Modelado final

La velocidad de cualquier punto dado es la diferencia entre (1) el movimiento del cuerpo rígido del bloque que contiene dicho punto y (2) el desplazamiento debido a la acumulación de la deformación elástica sobre las fallas. La velocidad en un punto X_i sobre la superficie de un bloque b viene dado por la siguiente Ecuación 3.6:

$$\vec{V}_{X_i} = {}_R \vec{V}_b(X_i) - \sum_{p=1}^P \vec{V}_{fp} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Para más de dos bloques y más de una falla, el modelo se presenta como (Ecuación 3.7):

$$\vec{V}_{X_i} = \sum_{b=1}^B {}_R \vec{V}_b - \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \vec{V}_{fp} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

O, bien sustituyendo algunos valores (Ecuación 3.8):

$$\vec{V}_{X_i} = \sum_{b=1}^B [{}_R \vec{\Omega}_b \times \vec{X}_i] \cdot H(X_i \in b) - \sum_{f=1}^F \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^2 \{ \Phi_{fp} \cdot G_{j(x_i, x_{fp})} \cdot [{}_h \vec{\Omega}_f \times \vec{X}_{fp}]_j \} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

donde B es el número de bloques, F es el número de fallas, P es el número de segmentos, $H=1$ si X_i pertenece al bloque b , y $H=0$ si X_i no pertenece al bloque b . En modelos lineales, las variables desconocidas Ω y Φ_{fp} se resuelven por mínimos cuadrados y las tasas de desplazamiento de las fallas se derivan de Ω .

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. CAMPO DE VELOCIDADES GEODÉSICAS

Se muestran las coordenadas y velocidades precisas de 33 estaciones incluyendo la estación CUMA del IGVSb expresadas en los marcos de referencia Igb08 e IGS14 (Tabla N° 4.1). Seguidamente, se presentan los valores de velocidad relativos a Suramérica para cada estación geodésica (Tabla N° 4.2) mediante el uso del polo de rotación absoluta de las placas ITRF2008 (Altamimi et al. 2012) e ITRF2014 (Altamimi et al. 2017).

En la Figuras N° 4.1 y N° 4.2 se representan los valores de velocidades absolutas con sus elipses de error de 95 por ciento de confianza para los marcos de referencia Igb08 e IGS14, respectivamente. El campo de velocidades geodésicas a través de la FEP muestra dos patrones bien diferenciados en ambas figuras. En los mapas de velocidades absolutas, los vectores al norte de la FEP muestran un sentido predominante NE; mientras al sur de la FEP las flechas siguen más bien una orientación N-NO. Para el caso de los mapas de velocidades referenciadas a Suramérica fija (Figuras N°4.3 y 4.4) los vectores del bloque norte tienen una orientación predominante E-NE, mientras que en el bloque sur las velocidades se muestran predominantemente orientadas hacia el NE. Los sitios al sur de la FEP muestran desplazamientos mucho menores que aquellos al norte de la falla.

Al generar los mapas de velocidades absolutas y referenciadas a Suramérica fija, no se encontraron diferencias significativas entre los resultados para cada uno de los marcos de referencia (Igb08 e IGS14). Sin embargo, es importante indicar que para

el momento del procesamiento no se encontraban disponibles las órbitas y las correcciones a los centros de fase de las antenas para el ITRF 2014, y la solución alcanzada respondió simplemente a la utilización de los modelos y parámetros de transformación con respecto al ITRF08. De allí que, si bien no existen mayores diferencias entre ambos resultados, las velocidades obtenidas para el marco de referencia ITRF2008 y por consiguiente la realización IGB08, son de mayor confiabilidad. De allí que, en las siguientes secciones para el análisis de resultados, así como la utilización de velocidades observadas como dato de entrada para el modelado, se utilizó el marco de referencia IGB08.

Tabla 4.1. Velocidades absolutas expresadas en el Marco de Referencia IGB08 e IGS14.

Estación	Long (grados)	Lat (grados)	IGb08		IGS14	
			Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	Ve (mm/a)	Vn (mm/a)
ARI0	-63,749	10,511	11,07±0,2	12,32±0,2	10,16±0,1	10,65±0,1
ARR0	-64,291	10,370	0,80±0,3	13,18±0,2	-0,44±0,1	11,75±0,1
ARY0	-64,236	10,571	10,75±0,2	14,28±0,2	9,81±0,1	12,99±0,1
AUD0	-64,081	10,447	1,32±0,1	14,29±0,1	0,29±0,1	12,82±0,1
BIC0	-63,965	10,770	13,52±0,2	14,95±0,2	12,51±0,1	13,56±0,1
CAC0	-63,837	10,553	11,63±0,3	12,80±0,3	11,63±0,1	11,51±0,1
CHA0	-64,156	10,841	13,69±0,3	15,08±0,2	12,55±0,1	13,64±0,1
COI0	-63,116	10,415	-1,59±0,4	14,99±0,4	-3,44±0,1	13,59±0,1
COR0	-64,184	10,831	13,88±0,3	15,10±0,2	12,79±0,1	13,41±0,1
COV0	-63,603	10,136	-2,74±0,2	13,16±0,2	-3,90±0,1	12,00±0,1
CUMA*	-64,195	10,429	1,17±0,1	15,03±0,1	2,47 ±0,1	16,49±0,1
GAL0	-64,188	10,802	13,69±0,2	14,90±0,2	12,67±0,1	13,37±0,1
HOR0	-64,291	10,965	14,61±0,2	15,62±0,2	13,67±0,1	14,30±0,1
IPU0	-63,751	10,122	-2,91±1,0	12,00±0,9	-4,07±0,2	11,62±0,2

ISLO	-63,896	10,884	14,66±0,2	14,72±0,2	13,61±0,1	13,31±0,1
MAN0	-63,895	11,156	14,99±1,0	14,61±0,9	14,88±0,1	14,10±0,1
MARG	-64,360	11,042	16,65±0,2	16,48±0,2	14,12±0,1	14,42±0,1
MCH0	-63,811	10,707	13,24±0,2	14,95±0,2	12,15±0,1	13,48±0,1
MOCO	-64,344	10,346	-1,27±0,2	15,26±0,2	-2,08±0,1	14,14±0,1
PAR0	-64,231	10,508	8,67±0,2	14,36±0,2	7,70 ±0,1	13,07±0,1
PCNO	-63,637	10,636	14,03±0,2	13,94±0,2	13,23±0,1	12,56±0,1
PER0	-63,767	10,446	-2,42±0,4	13,30±0,3	-2,39±0,1	11,79±0,1
PIGO	-64,083	10,637	11,86±0,3	13,81±0,2	10,73±0,1	12,46±0,1
PPI0	-62,404	10,547	12,67±1,0	14,02±0,9	12,59±0,3	12,60±0,2
RAG0	-62,974	10,582	15,00±0,4	15,10±0,4	16,39±0,4	16,51±0,4
RES0	-64,209	11,053	14,73±0,2	15,17±0,2	13,89±0,1	13,67±0,1
RIC0	-63,120	10,701	15,01±0,2	15,33±0,2	13,41±0,1	13,77±0,1
SAL0	-62,274	10,604	12,60±1,5	17,78±1,3	12,46±0,3	16,84±0,3
SMI1	-63,519	10,492	2,78±0,2	14,54±0,2	3,42±0,1	12,79±0,1
SUL0	-63,910	10,757	14,13±0,3	14,65±0,2	13,12±0,1	13,00±0,1
TACO	-63,977	9,954	-3,75±0,3	16,30±0,3	-4,66±0,1	14,78±0,1
TETO	-64,127	10,963	14,94±0,3	15,66±0,3	14,26±0,1	13,65±0,1
TORO	-63,569	10,352	-3,82±0,2	16,88±0,2	-5,08±0,1	15,39±0,1

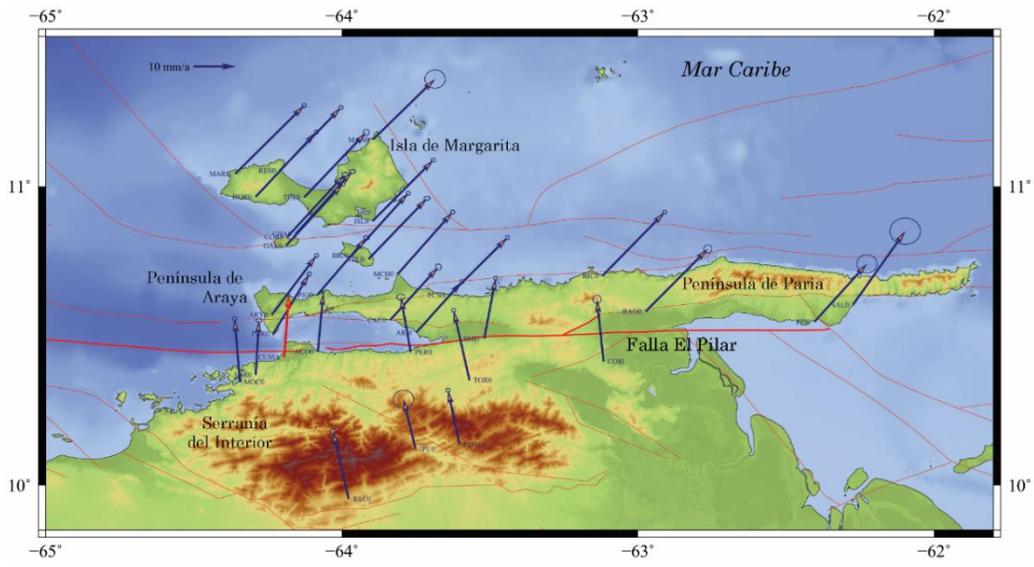


Figura 4.1. Campo de velocidades absolutas (flechas azules) expresadas en el Marco de Referencia IGB08 derivadas de la comparación de campañas de adquisición geodésica 2003, 2005 y 2013 con elipses de error para un 95% de nivel de confianza. El vector rojo corresponde a la estación Cumaná (CUMA) de REMOS-IGVSB. Las fallas activas en el noreste de Venezuela son tomadas de Beltrán (1993) y Audemard et al. (2000). Los datos topográficos y batimétricos son tomados de Jarvis et al. (2008) y Weatherall et al. (2015) respectivamente.

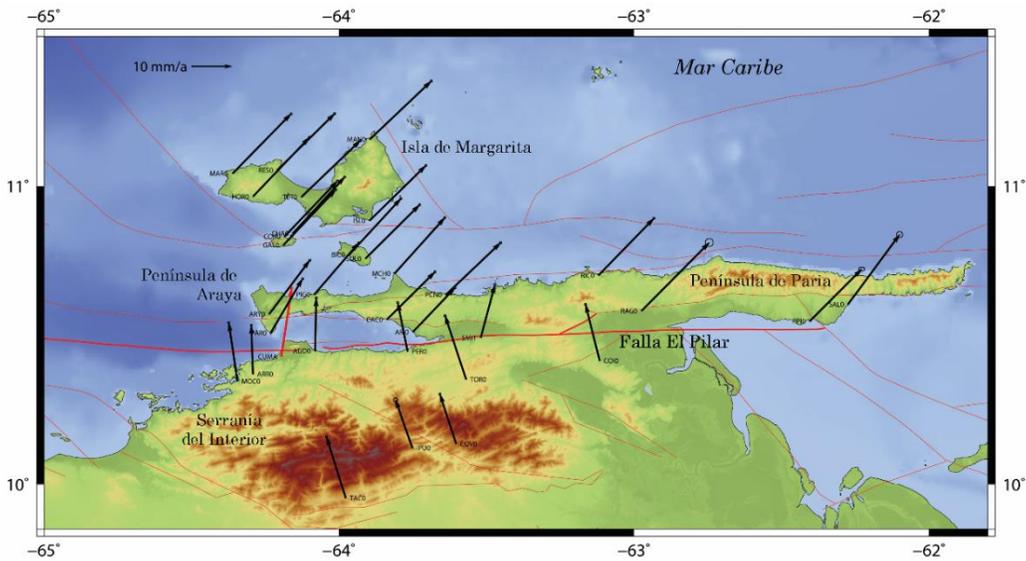


Figura 4.2. Campo de velocidades absolutas (flechas negras) expresadas en el Marco de Referencia IGS14 derivadas de la comparación de campañas de adquisición geodésica 2003, 2005 y 2013 con elipses de error para un 95% de nivel de confianza. El vector rojo corresponde a la estación Cumaná (CUMA) de REMOS-IGVSB.

4.1.1. Mapa de velocidades relativas a Suramérica fija

Al describir los puntos localizados al sur de la FEP, se muestra que las velocidades relativas de los puntos IPU0 y COV0 no exceden los 2,88 mm/a y 3,59 mm/a respectivamente. El sitio TAC0 (5,65 mm/a en sentido NE) más al sur, aun cuando presenta una magnitud relativamente mayor que COV0 y los sitios próximos, no alcanza los valores de los vectores del lado norte de la FEP. De allí, que al analizar el vector TAC0 con respecto al vector IPU0 (de menor magnitud y ubicado al NE), se infiere una compresión dentro del bloque tectónico Bergantín. En general, las velocidades en los sitios próximos a la FEP presentan de ~4mm/a a ~8mm/a cerca de los segmentos de falla. Donde, el vértice SMI1 con una velocidad de ~9,12 mm/a, es el más cercano a la zona de ruptura del terremoto de Cariaco de 1997.

En contraste, inmediatamente al cruzar al FEP de sur a norte, los puntos ARI0 y PAR0 muestran velocidades de ~15mm/a y ~17 mm/a respectivamente. Este patrón de incremento de las velocidades continua en dirección norte hasta la Isla de Margarita, donde se observan velocidades de hasta ~21 mm/a en el punto MAN0 con respecto a Suramérica. Al igual, como indicaron Jouanne et al. (2011) con base en los resultados de las campañas 2003 y 2005, se observa un fuerte gradiente de desplazamiento a través de algunos pocos kilómetros a ambos lados de la falla, lo cual sugiere una profundidad de bloqueo somera o una componente asísmica a lo largo de la parte superior de la FEP. De igual forma, la asimetría de los gradientes de desplazamiento a ambos lados de la FEP sugiere que esta falla no es vertical a una escala litosférica. La parte dúctil de la FEP que buza al norte bajo la península de Araya-Paria y las islas de Margarita, Coche y Cubagua, constituiría una zona con desplazamiento asísmico.

De oeste a este, en la Península de Araya-Paria, se observa un incremento en las velocidades entre sitios de observación. Desde la estación ARI0, más al oeste, hasta la estación RAG0, hay un incremento de ~15 mm/a hasta ~21 mm/a. Luego, un poco más hacia el este, en las estaciones medidas sobre la propia Península de Paria (PPI0 y SAL0), hay una leve disminución de ~1,5-2,5 mm/a en las magnitudes de las

velocidades con respecto a los sitios RAG0 y RIC0. Los vectores de las islas de Cubagua y Coche rondan los ~20 mm/a y hacia el norte en la Isla de Margarita, tanto en la parte oeste (Península de Macanao) como en la parte este, los valores alcanzan ~21 mm/a (Tabla N° 4.2, Figuras N° 4.3 y N° 4.4).

Table 4.2. *Velocidades expresadas en el Marco de Referencia ITRF2008 e ITRF2014 estable de Suramérica.*

Estación	ITRF2008 (Altamimi et al., 2012)			ITRF2014 (Altamimi et al., 2017)		
	Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	V (mm/a)	Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	V (mm/a)
ARI0	16,71±0,2	1,33±0,2	16,76	15,26±0,1	-0,96±0,1	15,29
ARR0	6,45±0,3	2,24±0,2	6,83	4,67±0,1	0,19±0,1	4,67
ARY0	16,41±0,2	3,33±0,2	16,74	14,93±0,1	1,42±0,1	15,00
AUD0	6,97±0,1	3,33±0,1	7,72	5,40±0,1	1,24±0,1	5,54
BIC0	19,19±0,2	3,98±0,2	19,60	17,63±0,1	1,97±0,1	17,74
CAC0	17,28±0,3	1,82±0,3	17,38	16,73±0,1	-0,09±0,1	16,73
CHA0	19,37±0,3	4,13±0,2	19,81	17,69±0,1	2,07±0,1	17,81
COI0	4,02±0,4	3,94±0,4	5,63	1,63 ±0,1	1,93±0,1	2,53
COR0	19,56±0,3	4,15±0,2	20,00	17,93±0,1	1,84±0,1	18,02
COV0	2,87±0,2	2,15±0,2	3,59	1,17 ±0,1	0,38±0,1	1,23
CUMA*	6,82±0,1	4,08±0,1	7,95	7,58 ±0,1	4,92±0,1	9,04
GAL0	19,37±0,2	3,95±0,2	19,77	17,80±0,1	1,80±0,1	17,89
HOR0	20,31±0,2	4,68±0,2	20,84	18,82±0,1	2,74±0,1	19,02
IPU0	2,70±1,0	1,01±0,9	2,88	1,00±0,2	0,01±0,2	1,00
ISL0	20,34±0,2	3,74±0,2	20,68	18,74±0,1	1,71±0,1	18,82
MAN0	20,69±1,0	3,63±0,9	21,01	20,03±0,1	2,50±0,1	20,19
MARG	20,46±0,2	5,32±0,2	21,14	19,28±0,1	2,86±0,1	19,49

MCH0	18,90±0,2	3,96±0,2	19,31	17,26±0,1	1,88±0,1	17,36
MOC0	4,38±0,2	4,32±0,2	6,15	3,03±0,1	2,58±0,1	3,98
PAR0	14,33±0,2	3,41±0,2	14,73	12,82±0,1	1,50±0,1	12,91
PCN0	19,68±0,2	2,94±0,2	19,90	18,33±0,1	0,94±0,1	18,35
PER0	3,22±0,4	2,31±0,3	3,96	2,71 ±0,1	0,18±0,1	2,72
PIG0	17,52±0,3	2,85±0,2	17,75	15,85±0,1	0,88±0,1	15,87
PPI0	18,27±1,0	2,91±0,9	18,50	17,64±0,3	0,89±0,2	17,66
RAG0	20,62±0,4	4,04±0,4	21,01	21,46±0,4	4,84±0,4	22,00
RES0	20,43±0,2	4,22±0,2	20,86	19,04±0,1	2,10±0,1	19,16
RIC0	20,65±0,2	4,28±0,2	21,09	18,50±0,1	2,11±0,1	18,62
SAL0	18,20±1,5	6,66±1,3	19,38	17,51±0,3	5,12±0,3	18,24
SMI1	8,41±0,2	3,53±0,2	9,12	8,51±0,1	1,16±0,1	8,59
SUL0	19,80±0,3	3,67±0,2	20,14	18,24±0,1	1,41±0,1	18,29
TAC0	1,86±0,3	5,33±0,3	5,65	0,41±0,1	3,19±0,1	3,22
TET0	20,63±0,3	4,70±0,3	21,16	19,40±0,1	2,07±0,1	19,51
TOR0	1,81±0,2	5,87±0,2	6,14	0,00±0,1	3,77±0,1	3,77

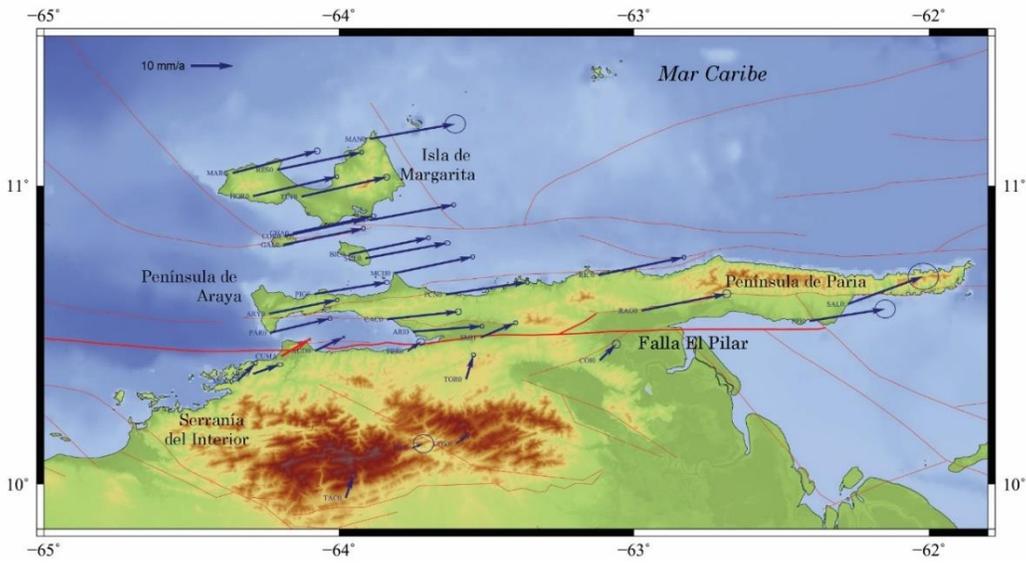


Figura 4.3. Velocidades observadas (flechas azules) expresadas dentro del Marco de Referencia ITRF2008 para la Placa Suramérica utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi et al. (2012), con elipses de error para un 95% de nivel de confianza. El vector rojo corresponde a la estación Cumaná (CUMA) de REMOS-IGVSB.

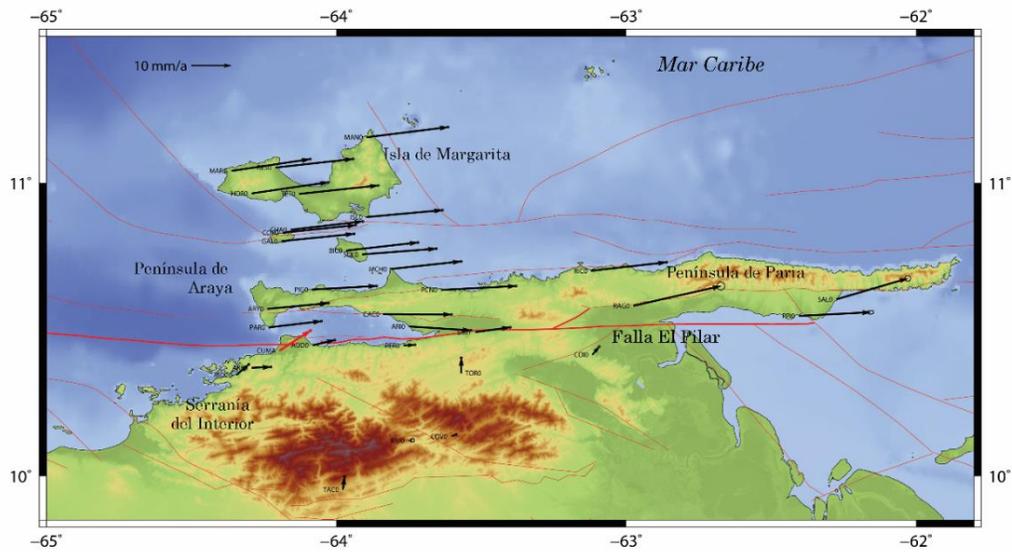


Figura 4.4. Velocidades observadas (flechas azules) expresadas dentro del Marco de Referencia ITRF2014 para la Placa Suramérica utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi et al. (2017), con elipses de error para un 95% de nivel de confianza. El vector rojo corresponde a la estación Cumaná (CUMA) de REMOS-IGVSB.

4.2. MODELADO

4.2.1. Modelado de deformación intersísmica de primer orden

Los resultados del modelado elástico homogéneo (Sección 3.4.1) se muestran en la Figura N° 4.5. Para evaluar la calidad de los modelos, se calculó el Error Cuadrático Promedio (ECM) expresado en la Ecuación 4.1:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{(Ve_{obs} - Ve_{modelo})^2}{\sigma_{Veobs}^2} \right)} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

donde σ_{Veobs}^2 es la varianza de las observaciones, Ve_{obs} es la componente este de las velocidades intersísmicas en el nororiente de Venezuela, Ve_{modelo} es la velocidad simulada y N es el número de estaciones geodésicas a lo largo de la FEP. Se presentan los mejores resultados para un primer modelo sin restringir los parámetros V_T y D. El mejor ajuste para este modelo simple (ECM= 0,533) sugiere una velocidad de campo lejano de 21,2 mm/a con una profundidad de bloqueo de 5 km. Con el fin, de realzar la robustez del resultado de este modelo, se evaluó una relación de intercambio (*trade-off*) entre la profundidad de bloqueo y la tasa de desplazamiento (Figura N° 4.6).

En el mismo sentido, se evaluaron dos posibilidades alternativas: Un modelo con velocidad a lo largo de la dislocación en profundidad fijada en 20 mm/a de acuerdo al valor más aceptado para el movimiento relativo entre las placas Caribe y Suramérica (DeMets et al., 2000; Pérez et al., 2001a, b; Weber et al., 2001), y un siguiente modelo fijando la profundidad de bloqueo en 12 km. Este valor se determinó a partir de la transición de las dislocaciones dúctil a frágil de la FEP, según la distribución de réplicas del terremoto de Cariaco de 1997 (Baumbach et al., 2004). El segundo modelo tiene su mejor ajuste (ECM=0,576) con una profundidad de bloqueo de 3,1 km, y para el tercer modelo, el mejor ajuste (ECM=0,687) lo alcanza con una velocidad de 22,9 mm/a para la dislocación en profundidad. Los perfiles de velocidades paralelos a la FEP muestran un buen ajuste para todos los modelos (Figura N° 4.5).

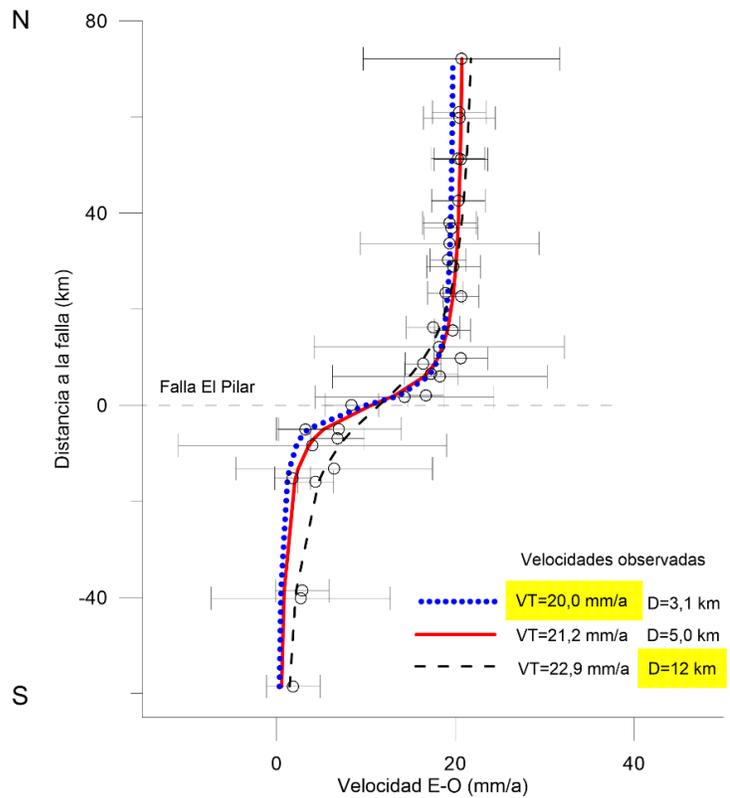


Figura 4.5. Perfiles de velocidad paralela a la FEP donde se muestran los modelos más aceptables a partir del modelado de dislocación clásico para un semi-espacio, así como las velocidades observadas E-O a partir de las campañas de medición 2003, 2005 y 2013 (Se incluye la estación continua CUMA).

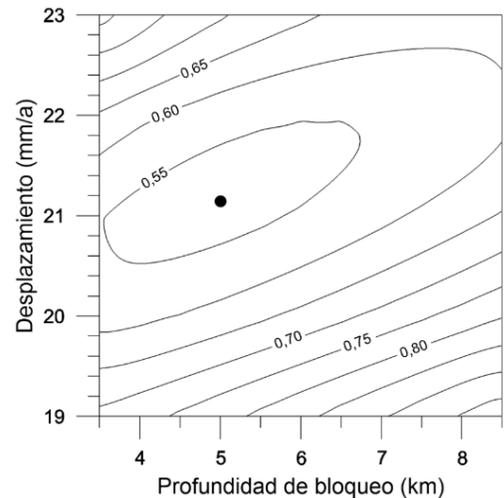


Figura 4.6. Relación de intercambio entre la profundidad de bloqueo y la tasa de desplazamiento para el modelo homogéneo simple (Resultados: $V_T=21,2$ mm/a, $D=5,0$ km). Los contornos corresponden a valores de ECM y el punto negro indica el mejor modelo de 0,533.

Con el fin de comparar los diferentes modelos, se evaluaron las diferentes soluciones utilizando la prueba de varianza de Fisher-Snedecor. Esta evaluación, basada en diferentes grados de libertad y diferentes valores de ECM, se usa para estimar la probabilidad de diferencias entre dos modelos comparables (Tabla N° 4.3). Para el caso del modelo 1 (VT y D libres) con respecto al modelo 2 ($V_T=20$ mm/a fija), el primero se muestra ligeramente como un mejor modelo con un 55%; aunque ambos son comparativamente buenas soluciones. Sin embargo, el modelo 1 es sustancialmente mejor que el modelo 3 ($D=12$ km fija) con una probabilidad de 73 por ciento. De esto, igualmente se deduce que el modelo 3, aun cuando muestra un buen ajuste de acuerdo a la Figura N° 4.5, es el que presenta mayores residuales entre las velocidades observadas y simuladas.

Tabla 4.3. Selección del mejor modelo de acuerdo a la prueba de varianza Fisher-Snedecor.

Modelo	Datos N	Parámetros N	Grados de libertad	ECM*
1 VT=21,2 mm/a; D=5,0	33	2	31	0,533
2 VT=20 mm/a ; D=3,1 km	33	1	32	0,576
3 VT=22,9 mm/a; D=12 km	33	1	32	0,687
Comparación de modelos	Prueba F	Probabilidad	Resultados	
¿El modelo 1 mejor que el modelo 2?	1.047	55%	Tal vez	
¿El modelo 1 mejor que el modelo 3?	1.249	73%	Si	
¿Es mejor el modelo 2 que el modelo 3?	1.193	69%	Si	

(*) Error cuadrático medio

4.2.2. Modelado de bloques

4.2.2.1. Deformación infinitesimal a partir de un arreglo triangular

Se seleccionaron ocho arreglos triangulares de los posibles a partir de las estaciones en el NE de Venezuela medidas en 2003, 2005 y 2013. Cada uno de los polígonos (Tabla N° 4.4; Figura N° 4.7) están definidos por tres puntos que se corresponden con tres estaciones geodésicas, ubicados en algunos casos dentro de

algunos bloques tectónicos definidos claramente en la literatura geológica por fallas principales y/o secundarias (e.g. Bloque 1-Bergantín y 2-Bloque Caripe). El propósito de colocar al menos 3 puntos de observación en cada bloque tectónico es una premisa asumida desde la concepción de la red geodésica para el Oriente del país en 2003. Otros arreglos triangulares responden más a la inquietud de determinar si dos arreglos forman o no parte de mismo bloque tectónico, como es el caso de los bloques 7-Península de Macanao y la parte este de la 8-Isla de Margarita. En el mismo sentido, y a pesar de no contar en algunos casos con límites o bordes claramente definidos para la definición de los arreglos ubicados en el 3-Golfo de Cariaco, 4-Puente de Tierra, 5-Península de Paria, y 6-Península Norte; se seleccionaron tres estaciones parcialmente delimitadas por fallas geológicas principales primarias y secundarias para definir estos bloques.

Tabla 4.4. Distribución de polígonos a partir de los sitios de observación. Se muestra la latitud y longitud del centroide de cada arreglo triangular más su velocidad de translación.

N°	Descripción	Vértices	Longitud	Latitud	Vector de translación (mm/yr)			
					Ve	σ Ve	Vn	σ Vn
1	Bloque Bergantín	MOCO, TACO, IPU0	-64,024	10,140	2,98	0,4	3,55	0,3
2	Bloque de Caripe	CUMA, COV0, PER0	-63,855	10,337	4,30	0,2	2,85	0,1
3	Golfo de Cariaco	PAR0, CACO, ARI0	-63,939	10,524	16,11	0,1	2,19	0,1
4	Pte. de Tierra	RIC0, PCN0, SMI1	-63,425	10,610	16,25	0,1	3,58	0,1
5	Pen. De Paria	SAL0, PPI0, RAG0	-62,551	10,578	19,03	0,6	4,54	0,5
6	Península Norte	ARY0 GALO PIG0	-64,169	10,670	17,77	0,1	3,38	0,1
7	Pen. de Macanao	MARG, RES0, HOR0	-64,287	11,020	20,40	0,1	4,74	0,1
8	Margarita (Este)	TET0, MAN0, ISL0	-63,973	11,001	20,55	0,4	4,02	0,3

Resultados

Los resultados de las velocidades de translación (Tabla N° 4.4; Figura N° 4.7) confirman lo visto en los mapas de velocidades geodésicas (Figuras N° 4.3 y N° 4.4). Al considerar velocidades con respecto a la placa Suramérica fija, en el lado norte de la FEP se observan desplazamientos en sentido E-NE con acimuts de $\sim 76^\circ$ hasta $\sim 83^\circ$, con una fuerte componente este de velocidad y una componente norte bastante menor. En el lado sur, los vectores pertenecientes a los bloques Bergantín y Caripe presentan

componentes este y norte de magnitud muy similares con azimuts de 40° y $56,5^\circ$ respectivamente.

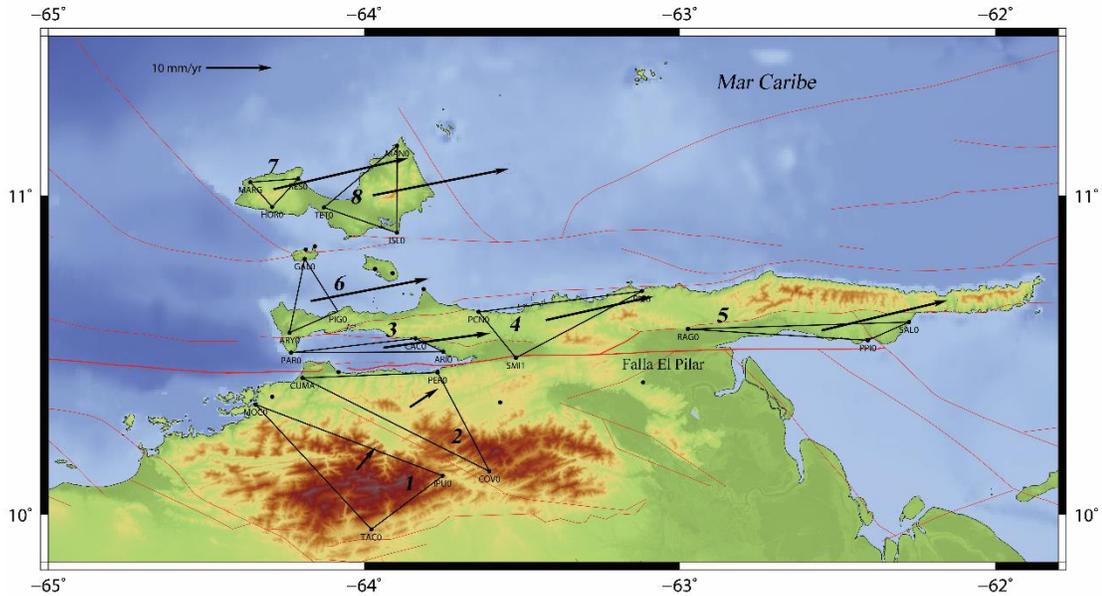


Figura 4.7. Distribución de los polígonos a partir de las estaciones geodésicas. Las flechas negras corresponden a los vectores de translación para cada uno de los arreglos triangulares. La numeración corresponde con la de las tablas 4.4 y 4.5.

Se obtuvo la velocidad rotacional para cada uno de los arreglos (Tabla N° 4.5, Figura N° 4.8) en grados por millones de años ($^\circ/\text{Ma}$) y en nano-radianes por año. Para la mayoría de los polígonos se hallaron rotaciones que van desde ~ 0 a $\sim 7^\circ/\text{Ma}$ (4-128 nanorad/a); el signo negativo (-) indica el sentido horario de las rotaciones. A diferencia del resto de arreglos, el bloque 4 denominado Puente de Tierra en este estudio presenta un valor comparativamente mucho más alto $\sim 18^\circ/\text{Ma}$ (~ 315 nanorad/a) en sentido horario. La posible respuesta ante esta diferencia está relacionada con el vértice SMI1 que forma parte de este arreglo. Este sitio de observación está localizado a escasos metros al sur, de la ruptura del terremoto de Cariaco de 1997. De esta forma, este punto formaría parte de un bloque diferente a los vértices PCN0 y RIC0, y la fuerte rotación exhibida estaría más relacionada al carácter transcurrente dextral de los bloques en contacto a través de la FEP, que a la propia rotación del bloque 4 ubicado inmediatamente al norte de la FEP entre las penínsulas de Araya y Paria.

Tabla 4.5. Datos de velocidad rotacional y deformación (strain) para cada uno de los arreglos triangulares.

N	Rotación (°/Ma)	Rotación (nanorad/a)	Sentido	e_{1H} (ns)	e_{2H} (ns)	Azimet e2H	DCM (ns)	DA (ns)
1	-4,177 ± 0,946	-72,908 ± 16,504	Horario	-1,77	-112,56	10,64	110,79	-114,33
2	-0,227 ± 0,516	-3,957 ± 9,006	Horario	-0,12	-90,42	66,25	90,30	-90,54
3	-7,344 ± 2,129	-128,178 ± 37,162	Horario	123,22	-55,33	138,31	178,54	67,89
4	-18,065 ± 0,452	-315,290 ± 7,890	Horario	300,88	-383,02	132,92	683,90	-82,14
5	-1,420 ± 7,779	-24,783 ± 135,774	Horario	562,81	-36,50	93,90	599,32	526,31
6	-4,439 ± 0,571	-77,477 ± 9,974	Horario	61,41	-9,79	128,87	71,20	51,62
7	-2,362 ± 0,914	-41,228 ± 15,957	Horario	34,23	-21,52	54,65	55,76	12,71
8	-1,461 ± 1,081	-25,494 ± 18,865	Horario	8,60	-19,29	49,26	27,89	-10,68

e1H: Extensión horizontal máxima, e2H: Extensión horizontal mínima, DCM: Deformación de cizalla máxima DA: Deformación del Área. El signo negativo (-) de las rotaciones se corresponden con el sentido horario.

Como resultado de la deformación que es reflejada por los vectores GPS, se pueden identificar los ejes: mayor (e_{1H}) y menor (e_{2H}) de la elipse de deformación horizontal expresados en nano-strain (Tabla N° 4.5; Figura N° 4.9). Del lado sur de la FEP, los arreglos 1-Bergantín y 2-Caripe presentan una casi inexistente compresión horizontal máxima en su eje mayor; sin embargo, presentan valores similares en su eje menor asociada a una compresión o contracción en sentido NE-SO, aun cuando, la orientación de los ejes para cada uno de los polígonos difiere en unos $\sim 56^\circ$. Del lado norte de la FEP, el resto de los polígonos muestran una distribución de signos similar para los ejes mayor (+) y menor (-), donde el segundo eje presenta una orientación acimutal entre $\sim 50^\circ$ y $\sim 140^\circ$. Los arreglos 3-Golfo de Paria, 4-Puente de Tierra y 6-Península Norte, más cercanos a la zona de deformación de la FEP, presentan una componente extensional NE-SO y compresional NO-SE. Para el caso del polígono 5, ubicado en la Península de Paria del lado norte y este de la FEP, presenta un eje mayor con una fuerte componente extensional casi norte-sur y el eje menor muestra una compresión menor en sentido E-SE con un azimet de $93,90^\circ$. Los tensores de deformación en los polígonos 7 y 8 de la Isla de Margarita muestran signo positivo en el eje mayor y negativo en el eje menor con valores de azimuts muy similares, lo que indica una componente de extensión NO-SE y compresión NE-SO. Adicionalmente, se obtuvo la deformación de cizalla máxima (DCM; Tabla N° 4.5), correspondiéndose a

un valor medido a 45° de la deformación horizontal máxima y es igual a la diferencia entre e_{1H} y e_{2H} en nano-strain. Los mayores valores se corresponden con los arreglos 4 y 5; y la menor diferencia está asociada al arreglo 8 en la parte este de la Isla de Margarita. Con respecto a la última columna de la Tabla N° 4.5, los valores de Deformación del Área (DA) reflejan el cambio en el área durante la distorsión, siendo igual a la suma de $e_{1H} + e_{2H}$ medida en nano-strain. Los arreglos 1, 2, 4 y 8 reflejan un decrecimiento en su área mientras que el conjunto restante 3, 5, 6 y 7 muestran un incremento. Ambos arreglos al sur de la FEP, 1 y 2 que muestran disminución en su área al igual que los polígonos 3, 6 y 7 del segundo conjunto ubicado al norte de la FEP y en su parte más oeste. Por su parte, el valor más elevado lo presenta el polígono 5- Península de Paria con una DA de 526,31 ns.

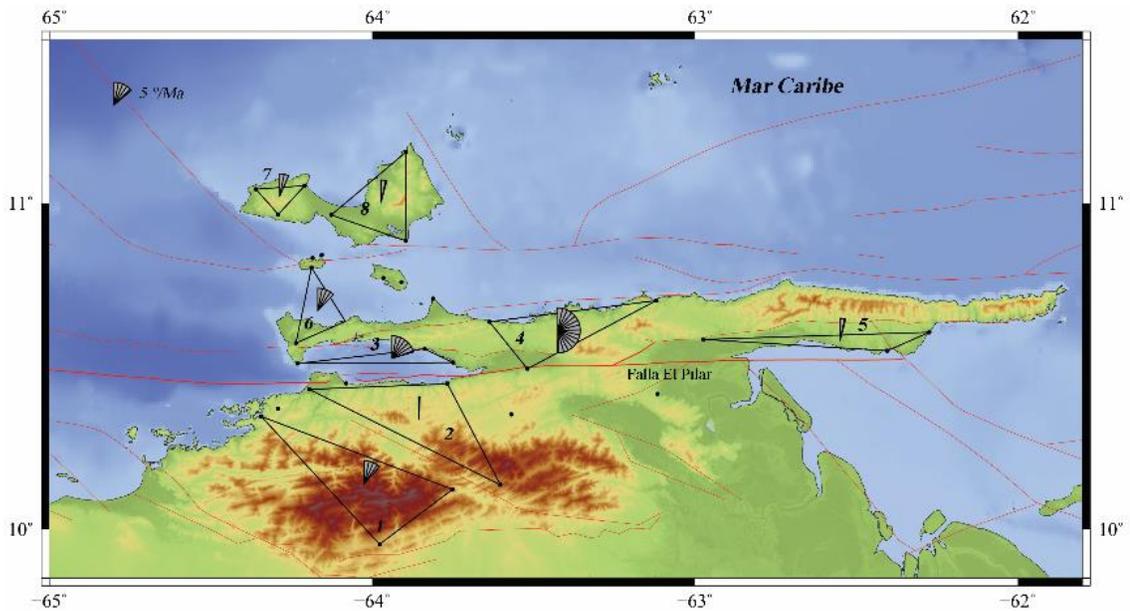


Figura 4.8. Distribución de los polígonos con sus respectivas velocidades rotacionales en $^{\circ}/Ma$ (Tabla N° 4.5). Todas éstas son negativas (grises; en sentido horario).

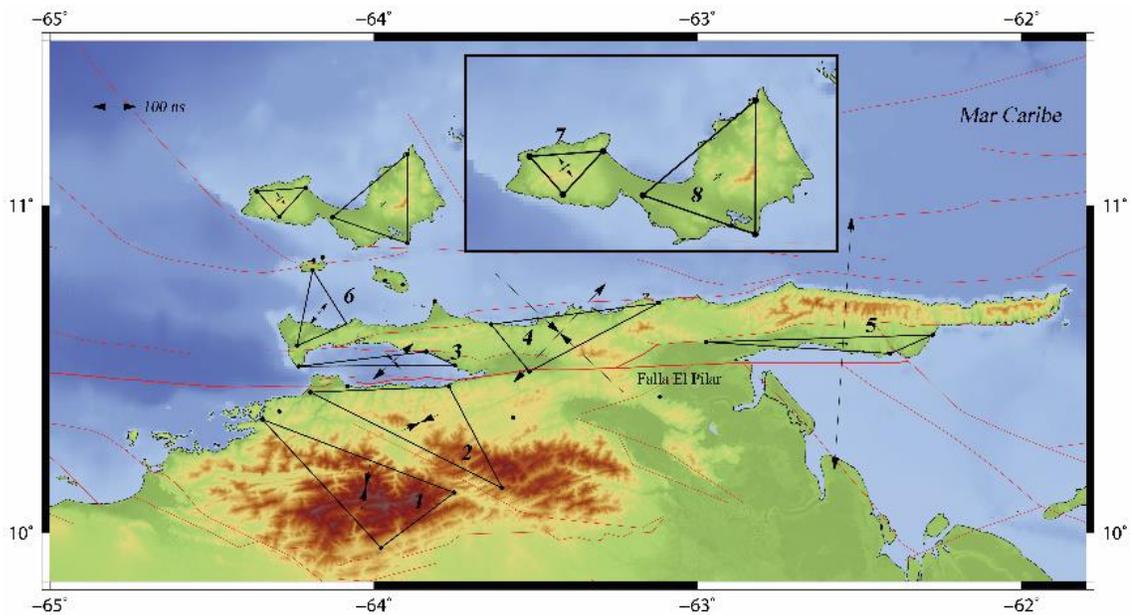


Figura 4.9. Distribución de polígonos con sus respectivas tasas de deformación en nano-strain.

4.2.2.2. Modelado elástico litosférico de bloques

Con base en los buenos resultados del estudio de la deformación infinitesimal a partir de un arreglo triangular, se decidió analizar la problemática con una herramienta más compleja, con el fin de estudiar la rotación de bloques litosféricos y tasas de deformaciones internas de dichos bloques tectónicos limitados por fallas, cubriendo un área superficial mayor que la supuesta por un polígono determinado por solo tres estaciones.

Datos de entrada

Para la ejecución del código TDEFNODE (McCaffrey, 2009), se utilizaron las velocidades geodésicas relativas a Suramérica fija (Tabla N° 4.2) como dato de entrada para un modelo de bloques donde las velocidades en la superficie resultan de la rotación de bloques rígidos limitados por fallas. Para la construcción y numeración de los polígonos que representan los bloques tectónicos, se tomó en consideración los resultados de la sección previa para la localización de la mayoría de los polígonos. Con respecto a la delimitación de los bloques (Tabla N° 4.6), se seleccionaron límites

naturales como son algunas fallas geológicas principales y secundarias presentes en la zona de estudio (Beltrán, 1993; Audemard et al., 2000; Audemard, 2001b; Paolini et al., 2012). En algunos casos los polígonos se completaron con bordes libres, una opción que permite el código empleado (Figura N° 4.10).

Tabla 4.6. Distribución de bloques tectónicos para el modelado de bloques.

N°	Descripción	Vértices
1	Bergantín	ARR0, IPU0, MOC0, TAC0
2	Caripe	AUD0, COV0, CUMA, PER0, SM11, TOR0
3	Golfo de Cariaco	ARI0, CAC0, PAR0
4	Puente de Tierra	PCN0, RIC0
5	Paria	PPI0, RAG0, SAL0
6	Península Norte	ARY0, BIC0, GAL0, MCH0, PIG0, SUL0
7	Margarita	CHA0, COR0, HOR0, ISL0, MAN0, MARG, RES0, MARG
*	Graben de San Juan	COI0

Por su parte, las fallas y los bordes libres se especifican por coordenadas de latitud, longitud y profundidad que constituyen nodos a lo largo de los planos de falla. En sentido horario, para la definición del bloque 1-Bergantín se seleccionó la FEP al norte, se unió por un borde libre hasta la Falla San Francisco al este, la Falla Loma de Viento al sur y Falla de Urica al oeste. El bloque 2-Caripe está igualmente definido por la FEP al norte, se une por medio de un borde libre hasta la Falla Río San Juan al este, La Falla Aragua de Maturín al sur y la Falla San Francisco al oeste, compartida con el bloque 1. El bloque 3 nombrado como Golfo de Cariaco, en su parte norte está constituido por una porción de la Falla Laguna Grande y la Falla Manzanillo- Cariaco, al este presenta un borde libre continuando al sur a través de una buena parte de la porción sumergida de la FEP, y el límite oeste se definió mediante un borde libre. Para el bloque 4 denominado Puente de Tierra, se seleccionaron las fallas de Laguna Grande y Costa Norte para su parte septentrional, el este está limitado por un borde libre, al sur se une por un segmento de la Falla Tunapuy y continua por el segmento Casanay-El Pilar de la FEP, luego sigue por el segmento Cumaná-Casanay de la FEP, hasta que se une por medio de un borde libre hacia la Falla Manzanillo-Cariaco en el oeste.

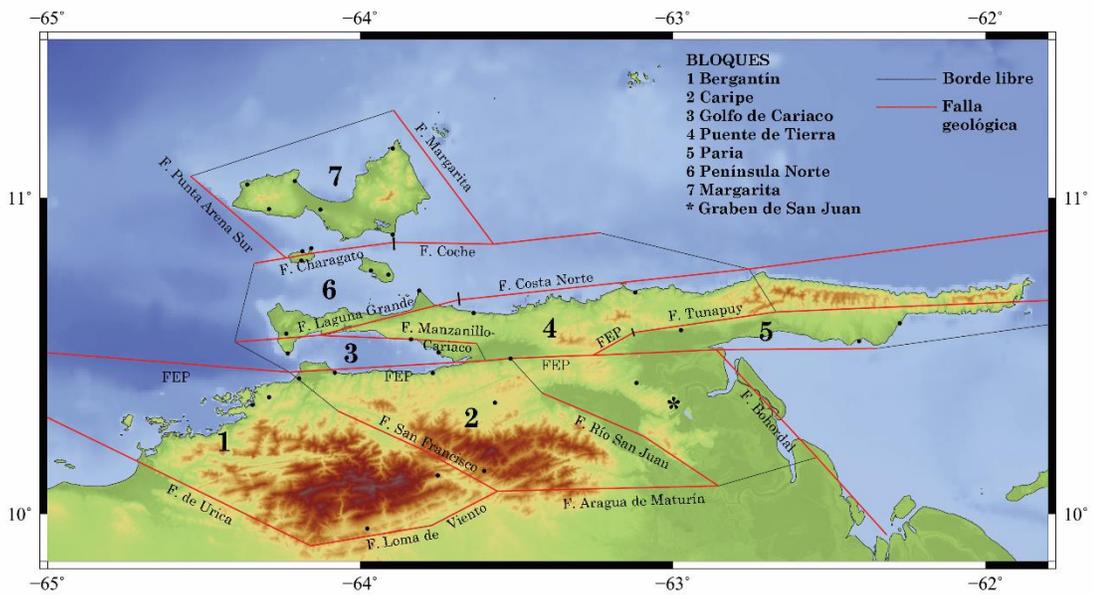


Figura 4.10. Definición de los bloques tectónicos utilizados en el modelado de bloques tectónicos. Los polígonos están delimitados a partir de las trazas de fallas geológicas (rojo) y se complementan con bordes libres (negro).

El bloque 5-Paria está limitado en su parte norte por el segmento Casanay-Pilar de la FEP, continua por la Falla Tunapuy, luego se une mediante un borde libre este hasta el segmento Guaráunos del FEP al sur. Siguiendo con la delimitación de los polígonos, el bloque 6, denominado Península Norte, está definido por las fallas de Charagato y Coche al norte, al este presenta un borde libre que se une al sur con las fallas Costa Norte y Laguna Grande, y el oeste del polígono se complementó con un borde libre. Para El bloque 7 localizado en la Isla de Margarita, el norte se delimitó con un borde libre unido a la Falla Margarita al este, en su parte sur comparte las fallas de Coche y Charagato con el bloque 6, hasta la Falla Punta Arena Sur que representa el límite oeste. Finalmente, en la definición de los bloques, a pesar de tener una sola estación geodésica, lo cual limita su contribución en general al modelado, se planteó desde el inicio el bloque denominado Graben de San Juan. Este bloque estaría definido por la FEP al norte, la Falla Bohordal al este, se delimitó al sur por un borde libre y continúa hacia el oeste por la Falla Río San Juan. En la tabla N° 4.7 se muestra los

valores de tasa de desplazamiento promedio en mm/a que se utilizaron como dato de entrada para ajustar el modelo (Tabla N° 4.7).

Tabla 4.7. Tasa de movimiento promedio de fallas geológicas en mm/a, utilizados como data de entrada en el código TDEFNODE.

N°	Descripción	Código actualizado (Paolini et al., 2012).	Velocidad promedio (mm/a) *
1	San Mateo	VE04-14a	0,8
2	Urica Norte	VE04-15a	0,8
3	Loma de Viento (Norte)	VE04-19a	0,1
4	San Francisco (Centro)	VE04-24b	0,3
5	Aragua de Maturín	VE04-20a	0,1
6	FEP (Costa afuera oeste)	VE04-12a	5,0
7	FEP (Cumaná-Guaracayal)	VE04-12b	9,0
8	FEP (Guaracayal-Casanay)	VE04-12c	12,0**
	Río S. Juan (Occidente)	VE04-25a	0,1
10	Costa Norte (Occidente)	VE04-11a	0,4
11	Tunapuy (Occidente)	VE04-13a	0,2
12	Tunapuy (Centro)	VE04-13b	0,2
13	FEP (Casanay-El Pilar)	VE04-12d	10,0**
14	Bohordal	VE04-27	0,5
15	Charagato	VE04-03	1,0
16	Coche (Occidente)	VE04-04a	0,4
17	Coche (Este)	VE04-04b	0,4
18	Punta Arena (Sur)	VE04-02c	0,8
19	Margarita	VE04-05	0,3
20	Manzanillo-Cariaco (Oeste)	VE04-09a	0,1

(*) Las velocidades se tomaron de Audemard et al. (2000) y Paolini et al. (2012).
(**) Exceptuando estos valores tomados de Jouanne et al. (2011) y Reinoza et al. (2015).

El código TDEFNODE permite asignar más de un bloque a un mismo polo, para el caso de bloques que roten juntos. Sin embargo, cada bloque solo puede ser asignado a un polo. Las velocidades angulares son relativas al centro de la tierra y obedecen la regla de la mano derecha. Viendo desde arriba, las rotaciones negativas se consideran horarias. Para cada uno de los bloques de la zona de estudio se determinó la posición y valores de las velocidades angulares terrestres o PE (Tabla N° 4.8); con excepción del bloque Graben de San Juan por las limitaciones de cálculo al contar con una sola estación geodésica de control. Como se observa en la Figura N° 4.11, los

diferentes polos están representados en su totalidad en el hemisferio sur; recordar que estos no tienen que coincidir con los polos de rotación de la Tierra alrededor de su eje (Polo Norte).



Figura 4.11. Localización de los polos de Euler para cada uno de los bloques de la zona de Estudio.

Parámetros de salida

Los parámetros son estimados por el método del algoritmo de recocido simulado y/o búsqueda en rejillas o grillas. La Figura N° 4.12 muestra una malla de vectores de translación simulados para la totalidad del área de los polígonos utilizados en el modelado numérico. Los bloques del lado sur de la FEP: 1-Bergantín y 2-Caripe presentan velocidades con sentido NE con azimuts de $\sim 45^\circ$, lo que supone componentes de velocidad este y norte similar para cada uno de los vectores. En el bloque Bergantín se observa cierta disminución de las magnitudes hacia el este y sur

del polígono; por su parte el bloque Caripe se muestra más homogéneo con una leve disminución en magnitud hacia el borde sur. El Bloque Graben de San Juan muestra una fuerte heterogeneidad en sus vectores, sin embargo, como se ha señalado previamente, este bloque cuenta con una sola estación para su ajuste. Del lado norte de la FEP, los bloques del lado oeste, 3-Golfo de Cariaco, 6-Península Norte y 7-Margarita, muestran vectores en dirección NE, pero con una componente norte mucho menor y este más importante que sus pares del lado sur de la falla. Los vectores del bloque 4-Puente de Tierra muestran una variación de oeste a este, de vectores orientados E-NE y progresivamente hacia el este cambian su sentido hacia el SE. Para el caso del bloque conocido como 5-Paria, los vectores se muestran con una orientación NE pero varía de oeste a este, con una fuerte componente norte al oeste que prácticamente va desapareciendo hacia Trinidad.

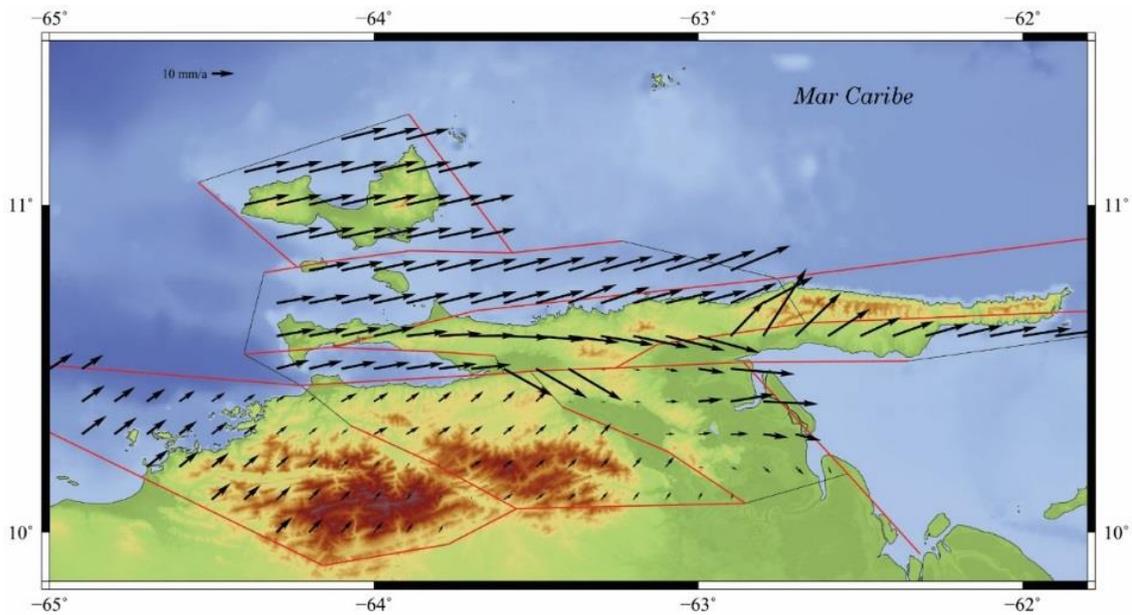


Figura 4.12. Malla o grilla de velocidades simuladas cubriendo la extensión de los bloques tectónicos utilizados en el modelado numérico de bloques.

Como para la mayor parte de los modelados numéricos utilizando velocidades geodésicas como datos de entrada, la correlación entre las velocidades observadas y simuladas a partir del propio modelado permite determinar si la simulación utilizada

presenta un buen ajuste. En la Figura N° 4.13 se muestra un perfil comparando la componente perpendicular a la FEP (N-S) de velocidad en mm/a contra la distancia a la falla (izquierda), así como un perfil típico de velocidades geodésicas paralelas a la falla en mm/a versus distancia a la falla (derecha). En el perfil de velocidad E-O se observa una buena correspondencia entre las velocidades observadas y simuladas relativas a la placa Suramérica fija, que dibujan el desplazamiento intersísmico de la FEP. Se observa el fuerte gradiente entre el lado sur y norte de la falla. La sección con velocidades N-S, no parece mostrar una marcada diferenciación entre los lados contrarios a la FEP, por lo que no puede extraerse un resultado concluyente si existe compresión o extensión a partir de los vectores resultantes.

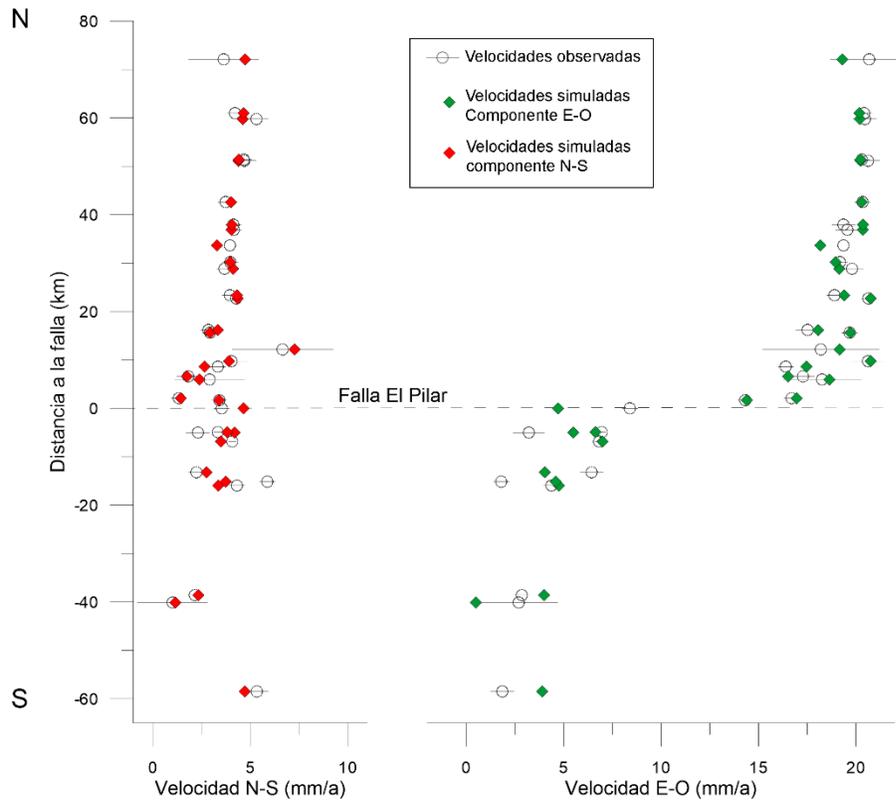


Figura 4.13. (Izquierda) Componente N-S (ortogonal a la FEP) de velocidades observadas (círculos negros) y velocidades simuladas a partir del modelado de bloques (rombos rojos). (Derecha) Comparación de la Velocidad E-O (paralela a la FEP; círculos negros) con respecto a las simuladas a partir del modelado de bloques (rombos verdes).

En el mismo sentido, la comparación de las velocidades observadas y simuladas a partir de la simulación numérica ha sido representada en un mapa del campo de velocidades geodésicas (Figura N° 4.14) e igualmente los valores residuales se han representado de manera similar (Figura N° 4.15). Se observa la significativa correlación de las velocidades, lo que demuestra el buen ajuste del modelo seleccionado.

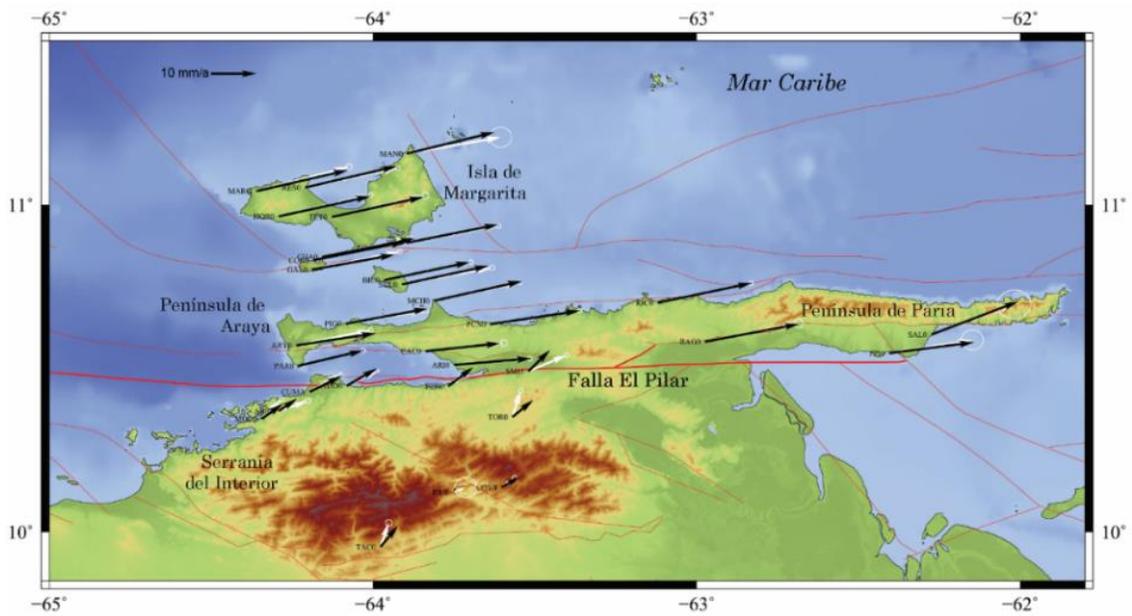


Figura 4.14. Velocidades observadas (flechas blancas) con elipses de error para un 95% de nivel de confianza y velocidades simuladas (flechas negras) de acuerdo al modelado de bloques. Los desplazamientos están expresados al Marco de Referencia para la Placa Suramérica utilizando el polo de rotación propuesto por Altamimi et al. (2012).

Las tasas de rotación resultantes indican rotación horaria para la totalidad de bloques (Tabla N° 4.8). Los bloques 1-Bergantín y 2-Caripe al sur de la FEP presentan velocidades angulares (Ω) de 0,09 y 0,06 °/Ma. Al norte de la FEP, los bloques exhiben vectores de rotación muy similares. El bloque 3-Golfo de Cariaco muestra una velocidad angular de 0,20 °/Ma; el bloque 4-Puente de Tierra presenta un valor de 0,22 °/Ma y finalmente, para el caso de los bloques 5-Paria, 6-Península Norte y 7-Margarita no muestran mayor variación con respecto a los bloques vecinos del lado norte de la FEP con un valor de 0,19 °/Ma.

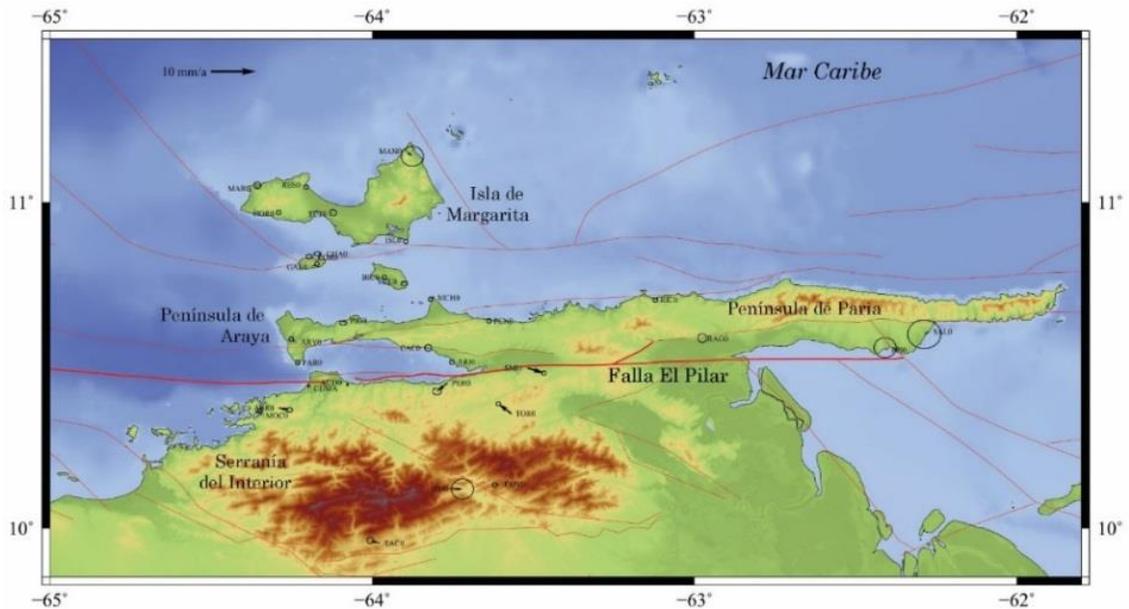


Figura 4.15. Velocidades residuales (flechas negras) con elipses de error de 95% de confianza para el modelo de bloques.

Tabla 4.8. Parámetros de rotación de los bloques a partir del modelado con TDEFNODE.

Nº	Bloque	Long. PE	Lat. PE	Ω (°/Ma)	Azimut	REV	Wx	Wy	Wz
1	Bergantín	-28,129	-28,927	-0,09	180	-0,05	-0,0689	0,0368	0,0432
2	Caripe	-22,595	-25,439	-0,06	180	-0,04	-0,0515	0,0214	0,0265
3	Golfo de Cariaco	-55,538	-33,735	-0,20	180	-0,14	-0,0955	0,1392	0,1127
4	Puente de Tierra	-81,908	-49,787	-0,22	180	-0,10	-0,0204	0,1436	0,1716
5	Paria	-35,952	-62,896	-0,19	180	-0,05	-0,0704	0,0511	0,1700
6	Península Norte	-37,936	-57,729	-0,19	180	-0,06	-0,0780	0,0608	0,1566
7	Margarita	-24,832	-69,061	-0,19	180	-0,02	-0,0602	0,0278	0,1733

REV: Rotación del Eje Vertical. Wx, Wy, Wz: Componentes cartesianas del vector de velocidad angular en °/Ma.

El signo negativo (-) de las rotaciones se corresponden con el sentido horario.

Con respecto a los parámetros de deformación (Tabla N° 4.9; Figura N° 4.16), del lado sur de la FEP el bloque 1-Bergantín al oeste presenta valores negativos en el eje mayor y menor pero con cierta diferencia en sus magnitudes, lo que indica una compresión más fuerte en sentido NE-SO. Por el contrario el bloque 2-Caripe, vecino hacia el este, muestra compresión en el eje mayor (NO-SE) y extensión en el eje menor (NE-SO). Hacia el lado norte de la FEP, los bloques del este: 4-Puente de Tierra y 5-Paria muestran componentes extensionales en sus ejes mayor y menor. Ambos bloques

muestran una fuerte componente extensional casi norte-sur (muy ligeramente inclinada al NO-SE) si se compara con la componente igualmente extensional prácticamente este-oeste. Con respecto a los bloques del lado oeste: 3-Golfo de Cariaco, 6-Península Norte, y 7-Margarita muestran valores de eje mayor y menor, compresivos (-) y extensionales (+) respectivamente, pero con importantes diferencias en la orientación de los esfuerzos. El bloque 3 muestra compresión NE-SO y extensión de mayor magnitud en el sentido NO-SE. El bloque 6 presenta compresión mínima en el sentido NO-SE y una extensión más importante en el sentido NE-SO; por su parte el bloque de Margarita indica extensión en el sentido norte-sur con una prácticamente inexistente componente compresional este-oeste.

Tabla 4.9. Parámetros de deformación (strain) de los bloques a partir del modelado con TDEFNODE.

N	Bloque	Long.	Lat.	Exx	Eyy	Exy	E1	E2	A1
1	Bergantín	-64,387	10,233	-93,88	-91,82	-65,98	-158,84	-26,86	45,45
2	Caripe	-63,554	10,275	-41,44	68,04	22,58	-45,91	72,51	101,21
3	G. de Cariaco	-63,971	10,523	34,72	-8,48	-23,43	-18,75	44,99	23,66
4	P. de Tierra	-63,414	10,573	65,81	1013,18	-76,37	59,7	1019,29	85,42
5	Paria	-62,545	10,578	60,71	1176,87	-61,16	57,37	1180,22	86,87
6	P. Norte	-63,841	10,759	34,7	11,7	35,81	-14,41	60,81	143,9
7	Margarita	-64,048	11,018	-1,05	18,75	-0,06	-1,05	18,75	89,82

Exx, Eyy, Exy: tensor de deformación en nanostrain/año.
E1: Tasa máxima de deformación, E2: Tasa mínima de deformación, A1: Azimut de la máxima deformación.
La contracción es negativa.

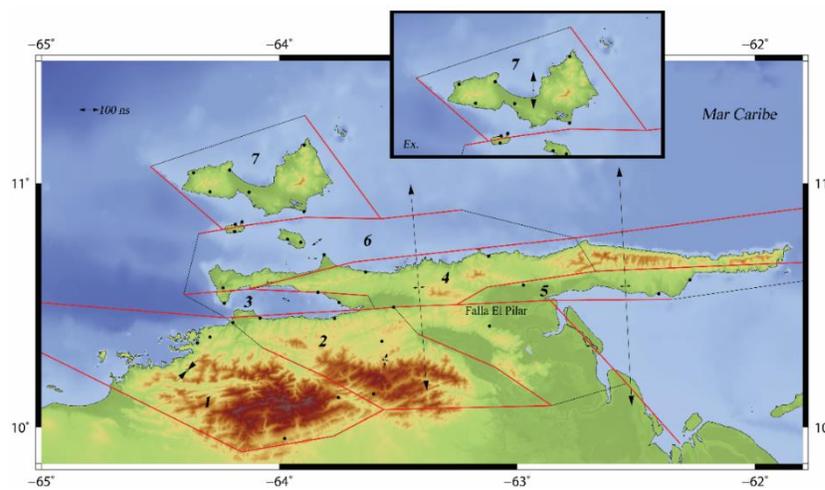


Figura 4.16. Distribución de polígonos con sus respectivas tasas de deformación en nano-strain a partir del modelado numérico de bloques.

4.3. ANÁLISIS

A partir del modelo de deformación intersísmica de primer orden, se estimó que el mejor modelo probalísticamente hablando con base en los resultados de la prueba Fisher-Snedecor, es el que sugiere una velocidad a lo largo de la dislocación en profundidad de 21, 2 mm/a y una profundidad de bloqueo de 5 km. El valor de V_T obtenido es coherente al valor más aceptado 20 mm/a de movimiento relativo entre las placas Caribe y Suramérica; lo cual además hace suponer que la FEP acomoda en profundidad gran parte, sino bien todo el movimiento entre dichas placas en la región nororiental de Venezuela. El fuerte gradiente de desplazamiento observado en el campo geodésico de velocidades al cruzar la traza de la FEP, sugiere una profundidad de bloqueo somera, la cual es confirmada por el valor de 5 km. En el modelo con la velocidad fija en 20 mm/a, el valor de la profundidad de bloqueo disminuye hasta 3,1 km. En el mismo orden, una profundidad de bloqueo somera indica igualmente la presencia de reptación a lo largo de la FEP; fenómeno que ha sido observado en campo (Audemard, 1999a, 2006) y estudiado previamente con otros enfoques en la zona de estudio (Jouanne et al., 2011; Reinoza et al., 2015; Pousse-Beltrán et al., 2016).

Los resultados del modelado de bloques a partir de (1) la deformación infinitesimal a partir de un arreglo triangular y (2) con base en un modelado elástico de bloques tectónicos presentan ciertas similitudes en sus resultados; sin embargo, es importante indicar que hay una notable diferencia entre la rigurosidad de los datos de entrada y la complejidad de los cálculos en ambas herramientas. De allí, que sea normal, encontrar igualmente ciertas diferencias entre los resultados que presentan ambos enfoques. El primer método resulta una herramienta útil desde el punto de vista exploratorio y que además permite considerar varios aspectos que sirven de punto de partida para el segundo enfoque, mucho más complejo y riguroso, como lo es el modelado de bloques con el código TDEFNODE.

Las velocidades de traslación obtenida por la herramienta de cálculo de la deformación de un triángulo GPS representa un promedio de las velocidades

observadas (Figura N° 4.7). Por el contrario, las iteraciones del modelo elástico de bloques permiten obtener valores de velocidades simuladas para ser comparadas con las velocidades observadas resultantes del procesamiento geodésico (Figuras N° 4.13, N° 4.14 y N° 4.15). Adicionalmente, se puede generar una malla o grilla de velocidades simuladas para toda el área de cada uno de los polígonos con el fin de estudiar la homogeneidad o variaciones dentro de un mismo bloque (Figura N° 4.12). En general, al analizar las velocidades observadas y simuladas se observa claramente que los bloques del lado sur de la FEP (Bergantín y Caripe) presentan velocidades con sentido NE con un ángulo acimutal de $\sim 45^\circ$; lo cual indica y como se ha señalado previamente, las velocidades presentan componentes de velocidad este y norte similar. Del lado norte de la FEP, igualmente el sentido de las velocidades es hacia el NE, pero con un fuerte componente este, lo que resulta en vectores más claramente inclinados hacia el este con azimuts superiores a los 75° . Para el caso de los bloques denominados 4-Puente de Tierra y 5-Península de Paria; en la Figura N° 4.12 se visualiza una mayor heterogeneidad en las velocidades simuladas, donde los vectores muestran cierta variación de oeste a este, y de norte a sur.

De acuerdo con los resultados de ambos métodos, el sentido de las rotaciones para la superficie total de los bloques tectónicos, así como de los arreglos triangulares dentro de estos bloques, es horario. Sin embargo, la herramienta de arreglos triangulares genera valores mucho más altos (desde $0,227 \pm 0,516$ a $7,344 \pm 2,129$ $^\circ/\text{Ma}$) si se compara con los estimados en el modelo de bloques ($0,09$ a $0,22$ $^\circ/\text{Ma}$). Adicionalmente, como se mencionó previamente la rotación del triángulo 4 presenta un valor de ~ 18 $^\circ/\text{Ma}$; este valor claramente elevado pudiese estar más relacionado a la utilización del sitio SMI1 para formar el arreglo, localizado solo unos metros al sur de la ruptura del terremoto de Cariaco de 1997, en contraste con los otros vértices RIC0 y PCNO, localizados a más de 10 km al norte de la FEP. Por lo que, más allá de cuantificar la rotación del bloque 4, se estaría cuantificando el movimiento relativo entre los bloques al norte y sur de la FEP. Los resultados demuestran que no hay evidencias de rotaciones rápidas en los datos geodésicos recientes (2003, 2005, 2013).

Por otro lado, considerando los resultados de los arreglos 7-Península de Macanao y 8-Margarita, los valores de rotación son muy similares $2,362 \pm 0,914$ y $-1,461 \pm 1,081$ °/Ma; por lo que no se puede afirmar con certeza que se trate de bloques diferentes.

A partir del modelo de bloques se determinaron valores de Rotación del Eje Vertical (REV) que varían entre 0,02 y 0,14 °/Ma. Por su parte, Fajardo (2015) halló valores de paleo-rotaciones de 3,7 °/Ma para los bloques 1-Bergantín y 2-Caripe al sur de la FEP; estos valores son comparativamente más elevados que los resultados de las rotaciones actuales, 0,05 y 0,04 respectivamente. Las paleo-rotaciones estarían más relacionadas a la subducción oblicua, y las REV actuales responden más a movimientos de transpresión. Los bloques del norte se desplazan casi en sentido este franco con respecto a los bloques del sur de la FEP, con una ausencia de una fuerte compresión como se pudo observar en los perfiles de velocidad observada norte-sur (Figura N° 4.13). De allí, que es posible que la traslación sea un fenómeno más representativo que la rotación en la cinemática actual de los bloques tectónicos al norte y sur de la FEP.

Con respecto a las tasas de deformación, al sur de la FEP, para el bloque Bergantín se muestra una importante componente de compresión NE-SO con respecto a una casi despreciable componente de compresión NO-SE, de acuerdo a las dos metodologías empleadas. Para el bloque Caripe en el eje NO-SE se observa una mínima compresión de acuerdo a los dos enfoques, sin embargo, los tensores de deformación difieren en la componente NE-SO. Para el arreglo triangular se observa una importante componente de compresión para dicha componente mientras que el modelado de bloques basado en 5 estaciones para este polígono indica extensión.

Del lado norte de la FEP, en el bloque del Golfo de Cariaco no hay correspondencia en los resultados entre ambas metodologías. Con respecto al bloque Puente de Tierra, hay diferencias entre los resultados de los dos enfoques, sin embargo, como se ha mencionado, el arreglo triangular considera tres sitios de observación incluyendo el vértice SMI1 sobre la zona de ruptura de la FEP y con claras diferencias con los otros dos puntos de observación; por otro lado, para el modelado de bloques

litosféricos solo se consideran los dos vértices PCN0 y RIC0 para el bloque 4-Puente de Tierra, lo cual limita los cálculos para este bloque.

El bloque Paria muestra una fuerte componente de extensión casi norte-sur según los distintos enfoques; sin embargo, difieren en el eje este-oeste, pero con valores casi despreciables de compresión según el arreglo triangular y extensión de acuerdo al modelado de bloques. Para el bloque 6-Peninsula Norte hay una fuerte similitud en una componente de extensión NO-SE así como en su magnitud, e igualmente en el eje NE-SO que indica una mínima compresión. Para el caso de Margarita, dos arreglos triangulares se fusionaron en un solo bloque tectónico de acuerdo al enfoque del modelado. Este último indica una fuerte extensión norte-sur, mientras que los arreglos tanto de Macanao como de Margarita (Este) muestran una componente de extensión NO-SE y compresión NE-SO.

Audemard y Castilla (2016) presentaron una compilación de 16 tensores de esfuerzos actuales a lo largo del margen sur de la Placa Caribe. Estos tensores se calcularon a partir de la inversión de 125 soluciones de mecanismos focales aplicando el método diedro recto de Angelier y Mechler (1977). Los tensores numerados como 12 y 13 en dicho trabajo se localizan en el Bloque Bergantín y Caripe respectivamente, mostrando en ambos casos una compresión en sentido NO-SE. Aun cuando los resultados del arreglo triangular muestran un valor compresivo en el mismo sentido, los valores son bastante reducidos, caso similar para el modelado de bloques. Sin embargo, los tensores a partir de mecanismos focales se calcularon muy cercanos a la zona falla, mientras que los calculados a partir de datos geodésicos consideran estaciones distribuidas cubriendo toda el área de los bloques tectónicos.

Por otro lado, de un grupo de tensores de esfuerzos Plio-Cuaternario calculados a partir de datos geológicos (Audemard et al., 2005), se menciona el tensor N°66 localizado en el Bloque 5-Paria, el cual muestra una componente de distensión NNO-SSE, que se ajusta muy bien a los resultados de los tensores calculados con ambas metodologías de modelado, arreglo triangular y TDEFNODE, en el presente trabajo.

Por su parte, los tensores 60, 62, 64 y 65 muestran una componente compresiva NO-SE que coincide con el arreglo triangular 4-Puente de Tierra. Adicionalmente, los tensores 60 y 64 muestran un esfuerzo distensivo NE-SO que igualmente se correlaciona con los resultados del mencionado arreglo. Finalmente, una componente compresiva NO-SE en el tensor 58 es igualmente observada en el arreglo 3.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de la geodesia de alta resolución por satélites ha permitido estudiar la deformación de los bloques tectónicos en el NE de Venezuela. En el mismo sentido, los bloques tectónicos están delimitados por fallas geológicas, por lo que ha sido necesario validar datos relevantes sobre el comportamiento y geometría de las mismas. Del presente trabajo se extraen las siguientes ideas concluyentes:

Como parte de los objetivos específicos de la investigación está el generar el campo de velocidades geodésicas actualizado al marco de referencia ITRF2014. Sin embargo, para la fecha del procesamiento las orbitas precisas, así como las correcciones para los centros de fase de las antenas para dicho marco, no se encontraban disponibles. Por lo cual, el resultado obtenido responde más a una transformación a partir del marco de referencia previo. Esto llevó a reconsiderar los valores resultantes en el marco de referencia ITRF2008, bajo su realización IGB08; y de esta manera contar con datos más confiables para la fase de modelado y su correspondiente análisis.

El campo de velocidades muestra dos patrones bien diferenciados a través de la FEP como se denota claramente en el mapa de velocidades geodésicas absolutas y en el de velocidades geodésicas relativas a Suramérica fija. Para el primero de ellos, los vectores al norte de la FEP muestran una orientación NE y N-NO en el bloque sur. Para el caso de las velocidades relativas, la orientación al norte de la FEP es E-NE mientras que en el bloque sur los vectores se muestran hacia el NE; notándose claramente la diferencia en la magnitud promedio entre los vectores de cada uno de los bloques.

El mejor ajuste para un modelo simple a partir de las velocidades relativas a la placa Suramérica fija, sugiere una velocidad de campo lejano de 21,2 mm/a con una profundidad de bloqueo de 5 km. Este valor es coherente con el más aceptado de 20 mm/a de movimiento relativo entre las placas Caribe y Suramérica, lo cual además hace suponer que la FEP acomoda en profundidad todo el movimiento entre dichas placas en la región nororiental de Venezuela. La profundidad de bloqueo relativamente somera o cercana a la superficie es indicativa igualmente de la presencia de reptación a lo largo de la FEP; fenómeno que ya ha sido observado en campo y estudiado previamente.

Desde la instalación de la red oriental en el año 2003, se planteó la necesidad de ubicar al menos tres sitios de observación en cada bloque tectónico con el propósito de estudiar la deformación de estos. En el presente trabajo la deformación se analizó desde el punto de vista de tres enfoques principales: translación, rotación y “strain”.

El análisis de la translación de los bloques con las metodologías del arreglo triangular y modelado de bloques (TDEFNODE), demuestra que los bloques de lado sur de la FEP presentan una velocidad con sentido NE y Angulo acimutal de ~45°. Por su parte, los bloques del lado norte de la FEP se trasladan predominantemente en sentido NE con azimuts mayor a 75°, y que puede variar inclusive en sentido SE y de este-oeste para los bloques 4-Puente de Tierra y 5-Paria, respectivamente.

Los vectores de rotación resultantes indican rotación horaria para la totalidad de los bloques. De acuerdo con la metodología utilizada los resultados varían, la herramienta de arreglos triangulares genera valores mucho más altos (desde $0,227 \pm 0,516$ a $7,344 \pm 2,129$ °/Ma) si se compara con los estimados en el modelo de bloques ($0,09$ a $0,22$ °/Ma).

Adicionalmente, se obtuvieron valores del parámetro conocido como REV, que varía entre 0,02 y 0,14 °/Ma para los bloques estudiados. Los valores de paleo-rotaciones de 3,7 °/Ma para los bloques 1-Bergantín y 2-Caribe al sur de la FEP (Fajardo, 2015) son comparativamente más elevados que los resultados de las

rotaciones actuales, 0,05 y 0,04 respectivamente. De allí, se concluye que las paleo-rotaciones estarían más relacionadas a la subducción oblicua, y las REV actuales responden más a movimientos de transpresión. La traslación es quizás un fenómeno más representativo que la rotación en la cinemática actual de los bloques tectónicos al norte y sur de la FEP.

Con respecto al estudio del parámetro “strain”, existen ciertas diferencias entre los resultados aportados por cada una de las metodologías. Sin embargo, se recogen algunas ideas: Al sur de la FEP para el bloque 1-Bergantín se muestra una importante componente de compresión NE-SO con respecto a una casi despreciable componente de compresión NO-SE, de acuerdo a los dos enfoques empleados. Esto, se denotaba desde ya en el mapa de velocidades geodésicas, donde la relación entre los vectores IPU0 y TAC0 parecían indicar una posible compresión. Para el bloque 2-Caripe, los tensores de deformación difieren de acuerdo a los dos enfoques utilizados; no obstante, el modelado de bloques basado en 5 estaciones para este polígono indica extensión en el sentido NO-SE y una mínima compresión NE-SO. El bloque 5-Paria muestra una fuerte componente de extensión casi norte-sur según los distintos enfoques; sin embargo, con una ligera variación en su ángulo acimutal. Para el bloque 6-Península Norte hay una fuerte similitud en una componente de extensión NO-SE así como en su magnitud, e igualmente en el eje NE-SO que indica una mínima compresión. Para los casos de los arreglos 7-Península de Macanao y 8-Margarita se observa una componente de extensión NO-SE y compresión NE-SO. Al considerar estos dos arreglos como un solo bloque, el tensor resultante muestra una fuerte extensión N-S.

Finalmente, la comparación de las velocidades observadas y simuladas para el modelado de bloques muestra una buena correspondencia. Se compararon velocidades paralelas y perpendiculares a la FEP. La sección E-O muestra el fuerte gradiente característico entre los bloques Norte y Sur a través de la FEP. Por su parte, la sección N-S, no muestra una marcada diferencia a través de la FEP, por lo cual no puede establecerse con claridad la compresión o extensión de acuerdo a estos datos.

Con base en las ideas expuestas, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Realizar nuevas campañas de medición geodésica en la red oriental existente, así como incorporar nuevos puntos de observación. Especial atención, a los bloques denominados en este estudio Puente de Tierra y Bohordal.
- Incorporar a la base de datos, observaciones de estaciones geodésicas continuas (series de tiempo), así como ampliar la cobertura espacio-temporal de los datos InSAR.
- Recopilar datos complementarios de rotaciones paleomagnéticas, datos de extensómetros, “*strain meter*”, “*strain motion*”, etc.
- A partir de una base de datos más completa, realizar nuevas iteraciones de modelos de bloques con el fin de caracterizar mejor las geometrías de las estructuras y parámetros de deformación definidos en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Aggarwal, Y., (1983), Neotectonics of the southern Caribbean: Recent data, new ideas, *Acta Científica Venezolana*, 34, 1, 17.
- Alberding, H., (1957), Application of principles of wrench-fault tectonics of Moddy and Hill to northern South America: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 68, p. 785-790.
- Alfaro, P., Alonso-Chaves, F. M., Fernández, C. y Gutiérrez-Alonso, G., (2013), Fundamentos conceptuales y didácticos: La tectónica de placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2013, Vol. 21, Núm. 2, p. 168-180.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., y Boucher, C., (2007), ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B9), B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- Altamimi, Z., Métivier, L. y Collilieux, X., (2012), ITRF2008 plate motion model, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7), B07402, doi:10.1029/2011JB008930.
- Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H. y Collilieux, X., (2017), ITRF2014 plate motion model. *Geophysical Journal International*, 209(3): 1906-1912.
- Angelier, J. y Mechler, P., (1977), Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et séismologie: la méthode des diédres droits. *Bull. Soc. Géologique Fr.* 19 (6), 1301e1318.
- Audemard, F. A., (1993), Néotectonique, sismotectonique et aléa sismique du nord-ouest du Vénézuéla (système de failles d'Oca-Ancón), PhD thesis, 369 pp, University of Montpellier II.
- Audemard, F. A., (1997), Preliminary Geological Report on the Cariaco Earthquake July 09, 1997, Venezuela, *International Center for Disaster-Mitigation Engineering Newsletter*, 6, 2, 7.
- Audemard, F. A., (1998), Evolution géodynamique de la façade nord Sud-américaine: nouveaux apports de l'histoire géologique du Bassin de Falcón, Vénézuéla, artículo presentado en la XIV Caribbean Geological Conference, Trinidad.
- Audemard, F. A., (1999a), El sismo de Cariaco del 09 de julio de 1997, edo. Sucre, Venezuela: Nucleación y progresión de la ruptura a partir de observaciones geológicas, *Proceedings, VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Mérida, Venezuela (CD-ROM)*.
- Audemard, F. A., (1999b), Nueva percepción de la sismicidad histórica del segmento en tierra de la falla de El Pilar. Venezuela nororiental. A partir de primeros resultados paleosísmicos, *Proceedings VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Mérida*, 10.
- Audemard, F. A., (2001a), Quaternary tectonics and present stress tensor of the inverted northern Falcon Basin, northwestern Venezuela, *Journal of Structural Geology*, 23, 431-453.
- Audemard, F. A., (2001b), Revisión y actualización de los parámetros sismogénicos de las fallas activas o potencialmente activas en Venezuela (Inf. Parcial Proy. INTEVEP 99-162). Informe Inédito de FUNVISIS para INTEVEP S.A. 24 pp + anexos.

Audemard, F. A., (2006), Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 earthquake on the El Pilar fault, northeastern Venezuela, *Tectonophysics*, 424(1-2), 19-39, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.04.018>.

Audemard, F. A., (2007), Revised seismic history of the El Pilar fault. Northeastern Venezuela. From the Cariaco 1997 earthquake and recent preliminary paleoseismic results. *Journal of Seismology*, 11 (3), 311-326.

Audemard, F. A., (2009), Key issues on the post-Mesozoic southern Caribbean plate boundary, in Gloaguen, R., and Ratschbacher, L., eds., Growth and Collapse of the Tibetan Plateau: *Geological Society of London Special Publication*, 328, 569-586, doi:10.1144/SP328.23.

Audemard, F. A., (2011), Multiple-trench investigations across the newly ruptured segment of the El Pilar fault in northeastern Venezuela after the 1997 Cariaco earthquake, *Geological Society of America Special Papers*, 479, 133-157, doi:10.1130/2011.2479(06).

Audemard, F. A., Alvarado, L., Fernández, A., Romero, G., Leal, A., Vásquez, R., Rodríguez, J.A., Martínez, A., y Barrios, I., (2019), Renovada sismicidad superficial en el oriente venezolano después del sismo de Cariaco de julio de 1997. *Boletín de Geología*, 41(1), 117-132. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019006

Audemard, F. A., Beck, C., Moernaut, J., De Rycker, K., De Batist, M., Sánchez, J., González, M., Sánchez, C., Versteeg, W., Malavé, G., Schmitz, M., Van Welden, A., Carrillo, E. y Lemus, A., (2007), La depresión submarina de Guaracayal, estado Sucre, Venezuela: Una barrera para la propagación de la ruptura cosísmica a lo largo de la falla de El pilar, *Interciencia*, 32, 735-741.

Audemard, F. A., Machette, M. N., Cox, J. W., Dart, R. L. y Haller, K. M., (2000), Map of Quaternary Faults of Venezuela, *USGS Open-File report 00-0018*.

Audemard, F. A., Romero, G., Rendon, H., y Cano, V., (2005), Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from fault-slip data and focal mechanism 155 solutions, *Earth-Science Reviews*, 69(3-4), 181-233, doi:10.1016/j.earscirev.2004.08.001.

Audemard, F.A. y Castilla, R., (2016). Present-day stress tensors along the southern Caribbean plate boundary zone from inversion of focal mechanism solutions: A successful trial. *Journal of South American Earth Sciences*, 71: 309-319.

Babb, S., y Mann, P., (1999), Structural and sedimentary development of a Neogene transpressional plate boundary between the Caribbean and South America plates in Trinidad and the Gulf of Paria, in P. Mann, ed., *Caribbean basins: Amsterdam, Elsevier, Sedimentary Basins of the World 4*, p. 495-557.

Baumbach, M., Grosser, H., Romero Torres, G., Rojas Gonzales, J. L., Sobiesiak, M. y Welle, W., (2004), Aftershock pattern of the July 9, 1997 Mw=6.9 Cariaco earthquake in Northeastern Venezuela, *Tectonophysics*, 379(1-4), 1-23.

Baumbach, M., Grosser, H., Romero, G., Rojas, J., y Sobiesiak, M., (1999), Aftershock studies of the July 9, 1997, Cariaco earthquake: *American Geophysical Union 1999 Spring Meeting*, Boston: Eos (Transactions, American Geophysical Union), 80, 17, supplement S226, abstract S42A-01.

Beck, C., (1986), Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas (Vénézuéla). *Mémoire Soc. Géol. Nord. Lille*, 460 pp.

- Bellizzia, A., Pimentel, N. y Bajo de Osuna, R. (1976), Mapa geológico-estructural de Venezuela. Escala 1: 500.000. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. – Ed. Foninves. Caracas.
- Beltrán, C., (1994), Trazas activas y síntesis neotectónica de Venezuela a escala 1:2.000.000, *in Proceedings, 7th Congreso Venezolano de Geofísica*: Caracas, p. 541–547.
- Beltrán, C., recopilador (1993), Mapa Neotectónico de Venezuela: Caracas, Venezuela, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, escala 1:2,000,000.
- Beltrán, C., Singer, A., y Rodríguez, J. A., (1996), The El Pilar fault active trace (northeastern Venezuela): Neotectonic evidences and paleoseismic data, *in Proceedings, 3rd International Symposium on Andean Geodynamics*, Saint-Malo, France, 153–156.
- Beltrán, C., y Giraldo, C., (1989), Aspectos neotectónicos de la región nororiental de Venezuela, *in VII Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, Venezuela, Barquisimeto, 3, 999–1021.
- Beutler, G., Bauersima, I., Gurtner, W., Rothacher, M., Schildknecht, T., Mader, G. L. y Abell, M. D., (1987), Evaluation of the 1984 Alaska Global Positioning System campaign with the Bernese GPS Software, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B2), 1295-1303, doi:10.1029/JB092iB02p01295.
- Beutler, G., Rothacher, M., Schaer, S., Springer, T. A., Kouba, J., y Neilan, R.E. (1999), The International GNSS Service (IGS): An interdisciplinary service in support of Earth sciences, *Advances in Space Research*, 23, 631-653.
- Bilham, R. (1994), Project CARIVEN: Caribbean /Venezuela relative motion from GPS geodesy. NFS Proposal and Project.
- Blanco, B., y Giraldo, C. (1992). Síntesis tectono-estratigráfica de la cuenca Tuy-Cariaco y plataforma externa. En: VI Cong. Venezolano de Geof., Caracas, Venezuela.
- Boucher, C., Altamimi, Z., y Sillard, P., (1999), The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF 1997). IERS Technical Note 27, Observatoire de Paris, Paris.
- Bucher, W. H. (1952), Geologic structure and orogenic history of Venezuela. *Geol. Soc. Am. Mem.* 49, 113 pp.
- Campos, V. (1981), Une transversale de la Chaîne Caraïbe et de la marge vénézuélienne dans le secteur de Carúpano (Vénézuéla oriental): structure géologique et évolution géodynamique. Ph.D. Thesis. Western Bretagne University, Brest, 160 pp.
- Chevalier, Y. (1987), Les zones internes de la Chaînes Sud-Caraïbe sur le transect Ile de Margarita-Péninsule d'Araya. (Vénézuéla). Ph.D. Thesis. Western Bretagne University, Brest, 504 pp.
- Chinnery, M. A., (1961), The deformation of the ground around surface faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 51(3), 355-372.
- Christensen, R. M., (1961), Geology of the Paria-Araya Peninsula, northeastern Venezuela: Ph. D. thesis, Dept. Geol., Nebraska Univ., Lincoln, Nebraska.
- Christeson, G. L., Mann, P., Escalona, A., y Aitken, T. J., (2008), Crustal structure of the Caribbean–northeastern South America arc-continent collision zone, *J. Geophys. Res.*, 113(B8), B08104, doi:10.1029/2007jb005373.

Clark, S. A., Zelt, C. A., Magnani, M. B., y Levander, A., (2008), Characterizing the Caribbean-South American plate boundary at 64°W using wide-angle seismic data, *J. Geophys. Res.*, 113(B7), B07401, doi:10.1029/2007jb005329.

Cronin, V., y Resor, P. (s.f.). Unit 4: GPS and infinitesimal strain analysis. Consultado el 25 de Julio de 2017, Materiales educativos GETSI, página web del Centro de Recursos de Educación para la Ciencia de Carleton College: https://serc.carleton.edu/getsi/teaching_materials/gps_strain/unit4.html.

Dach, R. y Walser, P. (2013), Bernese GPS Software, Version. 5.2, Astronomical Institute, University of Bern.

Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., y Meindl, M., (2007), Bernese GPS Software Version. 5.0. Astronomical Institute. University of Bern.

DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. y Stein, S., (1990), Current plate motions, *Geophysical Journal International*, 101(2), 425-478, doi:10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x.

Doin, M. P., Lodge, F., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Ducret, G., Grandin, R., Pathier, E. y Pinel, V. (2011), Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using ENVISAT data, in *Proceedings of the Fringe symposium*, Frascati, Italy, ESA SP-697.

Drewes, H., Kaniuth, K., Stuber, K., Tremel, H., Kahle, H.G., Straub, C., Hernandez, N., Hoyer, M. y Wildermann, E., (1995), The CASA'93 GPS Campaign for Crustal Deformation Research along the South Caribbean Plate Boundary. *J. Geodyn.* 20 (2), 129-144.

Drewes, H., Reigber, C., Stuber, K., Suarez, M., Tremel, H., Henneberg, H., Hoyer, M., Chourio, O., y Rekkedal, S. (1989), The Venezuelan part of the CASA/UNO GPS Project. *Manuscripta Geodaetica*, 14, 339-344.

Drewes, H., Torge, W., Röder, R. H., Badell, C., Bravo, D., y Chourio, O., (1991), Absolute and relative gravimetric surveys of national and geodynamic networks in Venezuela, *Journal of South American Earth Sciences*, 4(4), 273-286.

Estey, H. L. y Meertens, M. C., (1999), TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data, *GPS Solutions*, 3(1), 42-49, doi:10.1007/PL00012778.

Fajardo, A. (2015), Neotectonic Evolution of the Serrania del Interior Range and Monagas Fold and Thrust Belt, eastern Venezuela: Morphotectonics, Seismic Profiles Analyses and Paleomagnetism. Tesis doctoral. Thesis. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 235 pp.

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) (1994), Estudio Neotectónico y de Geología de Fallas Activas de la Región Nororiental de Venezuela: Proyecto Intevep 92-175: FUNVISIS report for Intevep S.A., 3 volumes.

Gallango, O. y Parnaud, F., (1995), Two-Dimensional Computer modeling of oil Generation and migration in a transect of the eastern Venezuela basin. In: Tankard, A., Suarez, R., Welsink, J. (Eds.), *Petroleum basin of South America*. AAPG Memoir, vol. 62, Tulsa, pp. 727-740.

González de Juana, C., Iturralde, J., y Picard, X., (1980), *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas* 1031 pp., Ediciones Foninves, Caracas.

- Grosser, H., Rietbrock, A., Baumbach, M., Romero Torres, G., y Rojas, J. (2001), Seismic tomography in the aftershock region of the Cariaco earthquake 1997, *Eos Trans. AGU* 82 (47) (Fall Meet. Suppl., Abstract S32E-03).
- Hatanaka, Y. (2008), A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data. *Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan*. 55. 21-30
- Henneberg, H. G. (1983), Geodetic control of neotectonics in Venezuela. *Tectonophysics*, 97 (1-4), 1-15.
- Henneberg, H. G. y Schubert, C., (1986), Geodetic networks along the Caribbean-South-American plate boundary. *Tectonophysics*, 130 (1-4), 77-94.
- Hugentobler, U., Dach, R., y Fridez, P., (2005), Bernese GPS Software. Version 5.0. Astronomical Institute. University of Bern, Switzerland, 388 pp.
- Hugentobler, U., Schaer, S., Fridez, P., Beutler, G., Bock, G., Brockmann, E., Dach, R., Gurtner, W., Ineichen, D., Johnson, J., Meindl, M., Mervart, L., Rothacher, M., Springer, T., y Weber, R., (2001), Bernese GPS Software, Version 4.2, University of Bern.
- Hung, E. J., (2005), Thrust belt interpretation of the Serranía del Interior and Maturín subbasin, eastern Venezuela. *Geological Society of America Special Papers*, 394, 251-270.
- Jácome, M. I., Kusznir, N., Audemard, F. E. y Flint, S., (2003a), Formation of the Maturin Foreland Basin, eastern Venezuela: Thrust sheet loading or subduction dynamic topography, *Tectonics*, 22, doi:10.1029/2002tc001381
- Jácome, M. I., Kusznir, N., Audemard, F. E., Flint, S., (2003b). Tectono-stratigraphic Evolution of the Maturin Foreland Basin: Eastern Venezuela, In: Bartolini, C., Buffler, R.T., Blickwede, J.F. (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics*. American Association of Petroleum Geologists, pp. 735–749.
- Jácome, M. I., Kusznir, N., y Flint, S., (1999), Structural and isostatic modelling of Serranía del Interior thrust belt and Monagas foreland basin: Eastern Venezuela. *Fourth International Symposium on Andean Geodynamics Göttingen (Germany)*, Oct. 4 –6, pp. 367–371. Extended abstract.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., y Guevara, E., (2008), Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Jolivet, R., Lasserre, C., Doin, M.-P., Guillaso, S., Peltzer, G., Dailu, R., Sun, J., Shen, Z.-K. y Xu, X. (2012), Shallow creep on the Haiyuan fault (Gansu, China) revealed by SAR interferometry, *J. Geophys. Res.*, 117, B06401, doi:10.1029/2011JB008732.
- Jouanne, F., Audemard, F. A., Beck, C., Van Welden, A., Ollarves, R., y Reinoza, C., (2011), Present-day deformation along the El Pilar Fault in eastern Venezuela: Evidence of creep along a major transform boundary, *Journal of Geodynamics*, 51(5), 398-410, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2010.11.003>.
- Kellogg, J. N., y Dixon, T.H. (1990), Central and South America GPS geodesy - CASA Uno. *Geophys. Res. Lett.* 17(3), 195–198, doi:10.1029/GL017i003 p00195.
- King G., y Nostro, C., (1999), Almond Lite v. 2.02: A program to calculate Coulomb stresses around rectangular faults or dykes, *Manual d'Utilisation*, Institute de Phisique du Globe, Paris.

Liddle, R. A. (1946), The geology of Venezuela and Trinidad, 2d ed.: Ithaca, New York, Paleon, Research Inst., p. 1-890.

Lisowski, M., Savage, J. C. y Prescott, W. H., (1991), The velocity field along the San Andreas Fault in central and southern California, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B5), 8369-8389, doi:10.1029/91JB00199.

Liuzzi, D. (2006), Modelado bidimensional del perfil 64° W en la región nororiental de Venezuela (Estados Sucre y Monagas), 131 pp, Universidad Simón Bolívar, Caracas.

Liuzzi, D., Schmitz, M., Jácome, M.I., y Sánchez, J., (2006), Adelgazamiento de sedimentos Cretácicos-Oligocenos bajo la Serranía del Interior, Noreste de Venezuela: Evidencia a partir de observaciones de sísmica profunda, *IX Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Cartagena, Colombia*. CD. 1-8.

Locke, B.D. y Garver, J.I., (2005), Thermal evolution of the eastern Serranía del Interior foreland fold and thrust belt, northeastern Venezuela, based on apatite fission track analysis. In: Avé Lallemant, H.G., Baker Sisson, V. (Eds.), *Caribbean–South American Plate Interactions, Venezuela*. The Geological Society of America Special Paper, vol. 394.

López-Quiroz, P., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P. y Nicolas, J.-M. (2009), Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry, *J. Appl. Geophys.*, 69(1), 1–15, doi:10.1016/j.jappgeo.2009.02.006.

Lyard, F., Lefèvre, F., Letellier, T. y Francis, O., (2006), Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004, *Ocean Dynamics*, 56, 394-415.

Marquez, C., Benkovics, L., De Mena, J., Reveron, J., y Helwig, J., (2003), Seismic Structural Interpretation of the Northern Monagas Giant Producing Trend, Venezuela: Time versus Depth. In AAPG Annual Meeting 2003.

Matsu'ura, M., Jackson, D. D., y Cheng, A., (1986), Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B12), 12661-12674, doi:10.1029/JB091iB12p12661.

Maxwell, J. C. y Dengo, G., (1951), The Carupano area and its relation to the tectonics of northeastern Venezuela. *Transactions, American Geophysical Union*, volume 32, issue 2. P. 259-267.

McCaffrey, R. (2002), Crustal Block Rotations and Plate Coupling, in *Plate Boundary Zones*, edited, pp. 101-122, American Geophysical Union, doi:10.1029/GD030p0101.

McCaffrey, R., (1995). DEF-NODE users guide, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy.

McCaffrey, R., (2009), Time-dependent inversion of three-component continuous GPS for steady and transient sources in northern Cascadia, *Geophysical Research Letters*, 36, L07304, doi:10.1029/2008GL036784.

McCaffrey, R., Long, M. D., Goldfinger, C., Zwick, P., Nabelek, J., Johnson, C. K., y Smith, C., (2000b), Rotation and plate locking along the southern Cascadia subduction zone, *Geophys Res. Letters*, 27, 3117-3120.

McCaffrey, R., Zwick, P. C., Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., Puntodewo, S. O. y Subarya, C., (2000a), Strain partitioning during oblique plate convergence in northern Sumatra:

Geodetic and seismologic constraints and numerical modeling, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 105, 28363-28376, doi:10.1029/1999jb900362.

McClusky, S. C., Bjornstad, S. C., Hager, B. H., King, R. W., Meade, B. J., Miller, M. M., Monastero, F. C., y Souter, B. J., (2001), Present day kinematics of the Eastern California Shear Zone from a geodetically constrained block model, *Geophysical Research Letters*, 28(17), 3369-3372, doi:10.1029/2001GL013091.

Meade, B. J., y B. H. Hager, (1999), Simultaneous inversions of geodetic and geologic data for block motions in plate boundary zones, *Eos, Trans AGU*, Paper G51B-16.

Meade, B. J., y Hager, B. H., (2005), Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3), n/a-n/a, doi:10.1029/2004JB003209.

Meade, B.J., Hager, B.H., McClusky, S.C., Reilinger, R.E., Ergintav, S., Lenk, O., Barka, A., y Ozener, A., (2002), Estimates of Seismic Potential in the Marmara Sea Region from Block Models of Secular Deformation Constrained by Global Positioning System Measurements, *Bull. Seis. Soc. Am.* 92, 208-215.

Melbourne, W. G., (1985), The Case in GPS-Based Geodetic Systems, in Goad C.C. (ed), *Proc. of First Int. sym. on Precise Position with GPS* Rockville, Maryland, 373-386.

Mendoza, C., (2000), Rupture history of the 1997 Cariaco, Venezuela, earthquake from teleseismic P waves, *Geophys. Res. Lett.*, 27 (10) 1555-1158.

Metz, H. (1965), Geology of the El Pilar Fault Zone. State of Sucre, Venezuela, *IV Caribbean Geological Conference*, Trinidad, 293-298.

Minster, J., and T. Jordan (1978), Present-day plate motions, *J. Geophys. Res.*, 83, 5, 331-335, 354.

Molnar, P., y Sykes, L., (1969), Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity, *Geological Society of America Bulletin*, 80, 1639-1684, doi:10.1130/0016-7606 (1969)80[1639:TOTCAM]2.0.CO;2.

Murray, M. H., y Segall, P., (2001), Modeling broadscale deformation in northern California and Nevada from plate motions and elastic strain accumulation, *Geophysical Research Letters*, 28(22), 4315-4318, doi:10.1029/2001GL013373.

Okada, Y. (1985), Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. seism. Soc. Am.* 75 (4), 1135-1154.

Ostini, L., Dach, R., Meindl, M., Schaer, S. y Hugentobler, U., (2008), *FODITS*: A new tool of the Bernese GPS software, in *Proceedings of EUREF 2008 Symposium*, edited by Torres, J. A., and H. Hornik, Brussels, Belgium.

Palma, M., Audemard, F. A., y Romero, G., (2010), New focal mechanism solutions for Venezuela and neighbouring areas 2005-2008: importance of the National Seismological Network's density and distribution. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia* 33, 1-14.

Paolini, M., Rodríguez, L. M., y Olbrich, F., (2012), Actualización de las Fallas Activas de Venezuela como aporte a la evaluación de la Amenaza Sísmica. FUNVISIS OpenFile report FUN077.

Parra, M., Sánchez, G. J., Montilla, L., Guzmán, O. J., Namson, J., y Jácome, M. I., (2011), The Monagas Fold–Thrust Belt of Eastern Venezuela. Part I: Structural and thermal modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 28(1), 40-69.

Passalacqua, H., Fernandez, F., Gou, Y., y Roure, F., (1995), Crustal Architecture and Strain Partitioning in the Eastern Venezuelan Ranges, in *Petroleum basins of South America*, edited by R. S. A. Tankard and y. H. Welsink, pp. 667 - 679, Memorias de la AAPG.

Pereira, J. G., (1985), Evolución tectónica de la cuenca de Carúpano durante el Terciario. VI Cong. Geol. Venez. Pág. 2618-2647.

Pérez, O. J., (1998), Seismological report on the Mw = 6.8 strong shock of 9 July 1997 in Cariaco, northeastern Venezuela, *Bulletin of the Seismological Society of America, Short Notes*, 23, 2, 101–106.

Pérez, O. J., Bilham, R., Bendick, R., Velandía, J. R., Hernández, N., Moncayo, C., Hoyer, M., y Kozuch, M., (2001b), Velocity Field Across the Southern Caribbean Plate Boundary and Estimates of Caribbean/South-American Plate Motion Using GPS Geodesy 1994-2000, *Geophys Res Lett*, 28, doi:10.1029/2001gl013183.

Pérez, O. J., Bilham, R., Bendick, R., Hernández, N., Hoyer, M., Velandia, J. R., Moncayo, C., y Kozuch, M., (2001a), Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Sudamérica a partir de observaciones dentro del sistema de posicionamiento global (GPS) en el norte de Venezuela, *Interciencia* 26 (2), 69–74.

Pérez, O. J., Bilham, R., Sequera, M., Molina, L., Gavotti, P., Codallo, H., Moncayo, C., Rodríguez, C., Velandia, R., Guzmán, M., y Molnar, P., (2011), Campo de Velocidades GPS en el Occidente de Venezuela: Componente Lateral Derecha asociada a la Falla de Boconó y Componente Convergente perpendicular a Los Andes. *Interciencia*, Vol. 36, No. 1, 39-44.

Pérez, O. J., y Aggarwal, Y. P., (1981), Present-day tectonics of the southeastern Caribbean and northeastern Venezuela, *J Geophys Res*, 86(B11), 10791-10804, doi:10.1029/JB086iB11p10791.

Pérez, O.J., Wesnousky, S.G., De La Rosa, R., Márquez, J., Uzcátegui, R., Quintero, C., Liberal, L., Mora-Páez, H. y Szeliga, W., (2018). On the interaction of the North Andes plate with the Caribbean and South American plates in northwestern South America from GPS geodesy and seismic data. *Geophysical Journal International*, 214(3): 1986-2001.

Petit, G. y Luzum, B., (eds) (2010) IERS Conventions 2010. IERS Technical Note 36; Frankfurt am Main:Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. ISBN 3-89888-989-6. <http://www.iers.org/TN36>. Accessed 20 March 2012

Pindell, J. L. y Kennan, L., (2007), Cenozoic kinematics and dynamics of oblique collision between two convergent plate margins: The Caribbean– South America collision in eastern Venezuela, Trinidad and Barbados, in Kennan, L., Pindell, J., and Rosen, N., eds., *The Paleogene of the Gulf of Mexico and Caribbean Basins; Processes, Events, and Petroleum Systems: Proceedings, 27th Bob F. Perkins Research Conference, Gulf Coast Section of the Society of Economic Paleontologists and Mineralogists: Houston, Texas, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 458–553.

Pindell, J. L., Kennan, L., Maresch, W. V., Stanek, K.-P., Draper, G. y Higgs, R., (2005), Plate kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in proto-Caribbean margins, in *Caribbean-South American plate interactions, Venezuela, GSA Special Paper 394*, edited by H. G. A. L. a. V. B. Sisson, pp. 7-52, Geological Society of America, Boulder, CO.

Pousse-Beltrán, L., Pathier, E., Jouanne, F., Vassallo, R., Reinoza, C., Audemard, F. A., Doin, M. P. y Volat, M., (2016), Spatial and temporal variations in creep rate along the El Pilar fault at the Caribbean-South American plate boundary (Venezuela), from InSAR, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(11), 2016JB013121, doi:10.1002/2016JB013121.

Prawirodirdjo, L., Bocl, Y., McCaffrey, R., Genrich, J., Calais, E., Stevens, C., Puntodewo, S.S.O., Subarya, C., Rais, J., Zwick, P. y Fauzi, R.M., (1997), Geodetic observations of interseismic strain segmentation at the Sumatra Subduction Zone. *Geophysical Research Letters*, 24(21): 2601-2604.

Reinoza, C., Audemard, F.A., Quintana, G., Pousse-Beltrán, L., Jouanne, F., López, R., y Moncada, J. (2017). Aplicación de la Geodesia Espacial en el Estudio de Fallas Activas en Venezuela, II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial, septiembre, 2017, Caracas. 7 pág.

Reinoza, C., Jouanne, F., Audemard, F. A., Schmitz, M., y Beck, C., (2015), Geodetic exploration of strain along the El Pilar Fault in northeastern Venezuela, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3), 2014JB011483, doi:10.1002/2014JB011483.

Rod, E. (1956), Strike-slip faults of northern Venezuela: *Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull.*, v. 40, p.457-476.

Romero, G., Audemard, F. A., Rendón, H., y Orihuela, N., (2002), Mapa de Soluciones Focales de Sismos Sentidos en Venezuela y Regiones Vecinas entre 1957 y 2002, *Edición Conmemorativa XXX Aniversario de FUNVISIS*, Caracas, FUNVISIS, scale ~1:2,450,000.

Romero, G., Audemard, F. A., Schmitz, M., Rendón, H., (1999), The July 9, 1997 Cariaco earthquake, Venezuela: correlation between aftershock distribution and surface rupture. *Eos Trans. AGU* 80 (27) (Spring Meet. Suppl., Abstract S42A-04).

Rossi, T. (1985). Contribution à l'étude géologique de la frontière Sud-Est de la plaque Caraïbes: La Serranía Del Interior Oriental (Venezuela) sur le transect Cariaco-Maturín (Doctoral dissertation).

Rossi, T., Stéphan, J. F., Blanchet, R. y Hernandez, G., (1987). Etude géologique de la Serranía del Interior oriental sur le transect Cariaco-Maturín: *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. 42(1), 3-30.

Rothacher, M., Beutler, G., Gurtner, W., Brockmann, E. y Mervart, L., (1993), Bernese GPS Software version 4.0 Documentation, Astronomical Institute, University of Berne.

Roure, F., Bordas-Lefloch, N., Toro, J., Aubourg, C., Guilhaumou, N., Hernandez, E., Lecornec-Lance, S., Rivero, C., Robion, P., y Sassi, W., (2003), Petroleum Systems and Reservoir Appraisal in the Sub-Andean Basins (Eastern Venezuela and Eastern Colombian Foothills). In: RTB in C. Bartolini and J. Blickwede eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. American Association of Petroleum Geologists, 750-775.

Roure, F., Carnevali, J. O., Gou, Y., y Subieta, T., (1994), Geometry and kinematics of the North Monagas thrust belt (Venezuela), *Marine and Petroleum Geology*, 11(3), 347-362.

Sánchez, G. J., Baptista, N., Parra, M., Montilla, L., Guzman, O. J., y Finno, A., (2011), The Monagas Fold-Thrust belt of Eastern Venezuela. Part II: Structural and palaeo-geographic controls on the turbidite reservoir potential of the Middle Miocene foreland sequence. *Marine and Petroleum Geology*, 28(1), 70-80.

Savage, J. C., Svarc, J. L., Prescott, W.H., y Murray, M., (2000), Deformation across the forearc of the Cascadia subduction zone at Cape Blanco, Oregon, *J. Geophys. Res.*, 105, 3095-3102.

Savage, J. C., y Burford, R. O., (1973), Geodetic determination of relative plate motion in central California, *J. Geophys. Res.*, 78, 832–845, doi:10.1029/JB078i005p00832.

Schmitz, M., Audemard, F., y Urbani, F. (Editores), (2014), El Límite Noreste de la Placa Sudamericana - estructuras litosféricas de la superficie al manto. Comité Editor Libros y Monografías, Fac. Ing. UCV, 379 pp.

Schneider, F., (2003), Basin modeling in complex area: examples from Eastern Venezuelan and Canadian Foothills. *Oil & gas science and technology*, 58(2), 313-324.

Schubert, C., (1984), Basin formation along the Boconó-Moron-El Pilar Fault System, Venezuela, *J. Geophys. Res.*, 89(B7), 5711-5718, doi:10.1029/JB089iB07p05711.

Segall, P., (2010), Earthquake and Volcano Deformation, STU - Student edition ed., Princeton University Press.

Silver, E., Case, J., y Macgillavry, H., (1975), Geophysical Study of the Venezuelan Borderland. *Geological Society of America Bulletin*, 86(2), 213-226.

Singer, A., Beltrán, C., Rodríguez, J., Lugo, M., Chacín, C., Páez, E., y Rivero, C., (1994), Estudio neotectónico y de geología de fallas activas de la región nororiental de Venezuela. Proyecto INTEVEP 92-175Informe, 258 pp, FUNVISIS.

Singer, A., y Audemard, F. A. (1997), Aportes de Funvisis al desarrollo de la geología de fallas activas y de la paleosismología para los estudios de amenaza y riesgo sísmico, in Grases, J., ed., *Diseño Sismorresistente: Especificaciones y Criterios Empleados en Venezuela*, Academia de las Ciencias Naturales, Matemáticas y Físicas Publicación Especial 33, 25–38.

Sisson, V., Avé Lallemant, H. G., Ostos, M., Blythe, A., Snee, L., Copeland, P., Wright, J., Donelick, R. y Guth, L., (2005), Overview of radiometric ages in three allochthonous belts of northern Venezuela: Old ones, new ones, and their impact on regional geology. *Geological Society of America Special Papers*, 394, 91-117.

Sobiesiak, M., Alvarado, L. y Vásquez, R., (2005), Recent seismicity in Northeastern Venezuela and tectonic implications. *Rev. Fac. Ing. UCV*, vol.20, n.4, pp. 75-84.

Soto, D. M., Mann, P., Escalona, A. y Wood, L. J., (2007), Late Holocene strike-slip offset of a subsurface channel interpreted from three-dimensional seismic data, eastern offshore Trinidad, *Geology*, 35(9), 859-862, doi:10.1130/g23738a.1.

Soulas, J.-P., (1986), Neotectónica y tectónica activa en Venezuela y regiones vecinas, *Proceedings of 6th Congreso Geológico Venezolano* (1985): Caracas, Venezuela, 10, 6639–6656.

Speed, R., Russo, R., Weber, J., y Rowley, K. C., (1991), Evolution of Southern Caribbean plate boundary, vicinity of Trinidad and Tobago, *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75, 11, 1789–1794.

Stéphan, J., Lepinay, B.M.d., Calais, E., Tardy, M., Beck, C., Carfantan, J.C., Olivet, J.L., Vila, J.M., Bouysse, P., Mauffret, A., Bourgois, J., They, J.M., Tournon, J., Blancher, R. y Dercourt, J., (1990), Paleogeodynamic maps of the Caribbean: 14 steps from Lias to Present. *Bulletin de La Societe Geologique de France*, 8: 915-919

Stéphan, J.-F. (1982), Evolution Géodynamique du Domaine Caraïbe, Andes et Chaîne Caraïbe sur la Transversale de Barquisimeto (Vénézuéla) [Ph.D. thesis]: Brest, France, Université de Bretagne Occidentale, 512 pp.

Stéphan, J.-F. (1985), Andes et Chaîne Caraïbe sur la Transversale de Barquisimeto (Vénézuéla), Evolution géodynamique: Géodynamique des Caraïbes, Symposium: Paris, Editions Technip p. 505–529.

Stéphan, J.-F., C. Beck, A. Bellizzia y Blanchet, R. (1980), La Chaîne Caraïbe du Pacifique à l'Atlantique. XXVth International Geological Congress, Paris, c-5, pp. 38–59.

Summa, L., Goodman, E., Richardson, M., Norton, I., y Green, A., (2003), Hydrocarbon systems of Northeastern Venezuela: plate through molecular scale-analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 20(3), 323-349.

Symithe, S., Calais, E., Chabalier, J.B., Robertson, R. y Higgins, M., (2015), Current block motions and strain accumulation on active faults in the Caribbean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5): 3748-3774.

Trenkamp, R., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T. y Mora, H.P., (2002), Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations, *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-171.

Van Daele, M., van Welden, A., Moernaut, J., Beck, C., Audemard, F., Sanchez, J., Jouanne, F., Carrillo, E., Malavé, G., Lemus, A. y De Batist, M., (2011), Reconstruction of Late-Quaternary sea- and lake-level changes in a tectonically active marginal basin using seismic stratigraphy: The Gulf of Cariaco, NE Venezuela, *Marine Geology*, 279, 37-51.

Van Welden, A., (2007), Enregistrements sédimentaires imbriqués d'une activité sismique et de changements paléoenvironnementaux. Etude de différents sites : Golfe de Corinthe (Grèce), Lac de Shkodra (Albanie/Monténégro) et Golfe de Cariaco (Vénézuéla). PhD. Thesis, Université de Savoie, France, 287 pp.

Vierbuchen, R.C., (1984), The geology of the El Pilar fault zone and adjacent areas in northeastern Venezuela. In: Bonini, W.E., Hargraves, R.B., Shagam, R. (Eds.), *The Caribbean –South America boundary and regional tectonics. Geol. Soc. Am., Memoir 162. Boulder, CO*, 189– 212.

Vivas, V., y Macsotay, O., (1995), Dominios tectono-sedimentarios de la Serranía Interior Oriental, Venezuela Nororiental. 3rd Geological Conference of the Geological Society of Trinidad and Tobago, 562-569.

Weatherall, P., Marks, K.M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J.E., Rovere, M., Chayes, D., Ferrini, V. y Wigley, R., (2015), A new digital bathymetric model of the world's oceans, *Earth and Space Science*, 2(8), 331-345, doi:10.1002/2015EA000107.

Weber, J.C., Dixon, T.H., DeMets, C., Ambeh, W.B., Jansma, P., Mattioli, G., Saleh, J., Sella, G., Bilham, R. y Perez, O., (2001), GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela, *Geology*, 29(1), 75-a-78, doi:10.1130/0091-7613.

Weber, J.C., Saleh, J., Balkaransingh, S., Dixon, T., Ambeh, W., Leong, T., Rodriguez, A. y Miller, K., (2011), Triangulation-to-GPS and GPS-to-GPS geodesy in Trinidad, West Indies: Neotectonics, seismic

risk, and geologic implications, *Marine and Petroleum Geology*, 28(1), 200-211, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.07.010>.

Weertman, J., y Weertman, J., (1964), *Elementary Dislocation Theory*, pp. 213, Macmillan, New York.

Wübbena, G. (1985), Software Development for Geodetic Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier Measurements, in Goad C.C. (ed), *Proc. of First Int. sym. on Precise Position with GPS* Rockville, Maryland, pp.403-412.

Yoris, F. y Ostos, M., (1997), *Geología de Venezuela: Geología general y cuencas petrolíferas. WEC Conferencia de Evaluación de Pozos, Schlumberger - Surencó C.A., Jolley Printing, Texas,1*; pp.1 – 17 ; 24 - 44.

Ysaccis, R., (1997), *Tertiary evolution of the northeastern Venezuela offshore*, 579 pp, RICE University, Houston, Texas.