

ANÁLISIS DE LA CINEMÁTICA INTER-SÍSMICA ASOCIADA A LA FALLA DE OCA-ANCÓN MEDIANTE EL USO DE LA GEODESIA ESPACIAL DE ALTA RESOLUCIÓN

Ing. José A. Mogollón López¹ y Dr. Carlos E. Reinoza Gómez²

¹ josea.mogollón@gmail.com

² cereinoza@gmail.com

RESUMEN

El Sistema de Navegación Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*), es una herramienta de alta precisión empleada para determinar los campos de velocidades geodésicas en un corto periodo. A partir de estos datos es posible generar modelos que ayudan a comprender la cinemática de las fallas geológicas y la deformación de la corteza terrestre. La tectónica activa en Venezuela ha sido largamente trabajada por diversos autores durante décadas, las mediciones con sistemas geodésicos espaciales de alta resolución aportan datos precisos que pueden ayudar a esclarecer temas de fuerte debate. Con el propósito de estudiar el desplazamiento y la deformación superficial del sistema de fallas Oca-Ancón, se emplearon datos geodésicos para construir el campo de velocidades geodésicas expresado en el marco de referencia ITRF2008 (Altamimi et al., 2012) y el ITRF2014 (Altamimi et al., 2016). Estos datos fueron obtenidos en las campañas de los años: 2011, 2013 y 2016 realizadas en el occidente venezolano. El procesamiento de los datos GNSS se trabajó con el programa TEQC (Traducción, edición y chequeo de calidad; Estey & Meertens, 1999) y el paquete BERNESSE 5.2 (Dach & Walser, 2013). Para construir los mapas de velocidades se usó la herramienta para generación de mapas (Generic Mapping Tools – GMT). Se trabajó con dos enfoques de modelado: dislocación elástica simple (Chinnery, 1961; Weertman & Weertman, 1964; Savage & Burford, 1973) y dislocación heterogénea asimétrica (Le Pichon et al., 2005). Adicionalmente y para mejorar el ajuste de los resultados se realizó un modelo de dos fallas considerando el sistema de fallas Oca-Ancón y las secciones más septentrionales de la falla de Boconó. Luego de realizar un análisis estadístico la velocidad de campo lejano obtenida para Oca-Ancón es de $1,5 \pm 0,05$ mm/año por debajo de una profundidad de bloqueo de $16,5 \pm 3$ km y para la zona norte de Boconó su velocidad de campo lejano varía entre 15-16 mm/año con una profundidad de bloqueo que está en el orden de los 12 a 20 km.

Palabras Clave: Oca-Ancón, GNSS, intersísmica, geodesia espacial, cinematica.

ABSTRACT

The Global Navigation Satellite System (Global Navigation Satellite System - GNSS) is a high precision tool used to determine geodetic velocity fields in a short period. From these data, it is possible to generate models that help to understand the kinematics of geological faults and the deformation of the earth's crust. Active tectonics in Venezuela has been widely worked by various authors during the stays, measurements with high resolution spatial geodesic systems provide accurate data that can help to clarify issues of strong debate. In order to study the displacement and surface deformation of the Oca-Ancón fault system, geodetic data will be used to construct the

geodetic velocity field expressed in the frame of reference ITRF2008 (Altamimi et al., 2012) and ITRF2014 (Altamimi et al., 2016). These data were published in the campaigns of the years: 2011, 2013 and 2016 carried out in western Venezuela. The processing of GNSS data is done with the TEQC program (Translation, editing and quality check, Estey & Meertens, 1999) and the BERNESE 5.2 package (Dach & Walser, 2013). To build the maps of speeds the tool for the generation of maps was used (Generic Mapping Tools - GMT). Two means were used: simple elastic dislocation (Chinnery, 1961; Weertman & Weertman, 1964; Savage & Burford, 1973) and asymmetric heterogeneous dislocation (Le Pichon et al., 2005). The Oca-Ancón fault system and the northernmost sections of the Boconó fault. After performing a statistical analysis, the field speed, the distances for Oca-Ancón, is 1.5 ± 0.05 mm / year below a blocking depth of 16.5 ± 3 km and in the northern zone of Boconó its Far field speed between 15-16 mm / year with a blocking depth that is in order of 12 to 20 km.

Key words: Oca-Ancón, GNSS, inter-seismic, spatial geodesy, kinematics

INTRODUCCIÓN

El norte de Venezuela se encuentra en la zona de interacción entre las placas del Caribe y América del Sur (Audemard et al., 2000). El límite entre estas placas no es del tipo dextral simple, sino que en realidad es una zona de deformación activa de 100 km de ancho, que es el resultado de un proceso de larga duración de colisión oblicua entre estas placas (Audemard, 1993). Sin embargo, una gran parte de este movimiento lateral derecho parece tener lugar a lo largo de la falla de Boconó, el sistema de fallas San Sebastián, y la falla del Pilar (Audemard et al., 2000). El resto de la deformación se distribuye a través de fallas menores pero asociadas dentro y costa afuera de Venezuela.

En el occidente, el sistema de fallas Oca-Ancón es considerada como la segunda característica tectónica principal dentro del cinturón de deformación en el margen sur de la Placa Caribe. Oca-Ancón se extiende unos 650 km desde Santa Marta en Colombia hasta Boca de Aroa en las costas orientales del estado de Falcón (Audemard, 1993). Empleando la geodesia espacial de alta resolución, se estudió el desplazamiento y la deformación del sistema de fallas Oca-Ancón. La herramienta geodésica empleada para la adquisición de los datos es el GNSS. Los datos de este sistema fueron obtenidos en las campañas de medición de los años 2011, 2013 y 2016. Con el sistema GNSS es posible cuantificar el desplazamiento de la falla a lo largo de la dislocación en profundidad, además de cubrir la extensión total de orientación este, oeste (650 km) del sistema de falla Oca Ancón.

El procesamiento se divide en dos etapas, la primera es una fase de ordenamiento y manipulación de los datos con la herramienta TEQC (Traducción, edición y chequeo de calidad; Estey & Meertens, 1999), y la segunda es la etapa del procesamiento científico y análisis de los datos geodésicos, realizada con el paquete de procesamiento BERNESE 5.2 (Dach & Walser, 2013). Las velocidades fueron estimadas en los marcos de referencia ITRF2008 (Altamimi et al., 2012) y el reciente ITRF2014 (Altamimi et al., 2016). A partir del procesamiento se obtienen las coordenadas y las velocidades para cada uno de los puntos de observación y así se generó el campo geodésico de velocidades, con estos datos se crearon los archivos de entrada para la fase de modelado.

Se utilizaron dos enfoques de modelado, dislocación elástico simple (Chinnery, 1961; Weertman

& Weertman, 1964; Savage & Burford, 1973) y heterogéneo asimétrico (Le Pichon et. al., 2005). Estos modelos permiten probar la asimetría de deformación a través de la falla Oca-Ancón y evaluar el contraste de rigidez a ambos lados de la falla. Para valorar el ajuste de los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico y para profundizar en el estudio geodinámica del occidente venezolano se construyó un modelo de dislocación elástico simple para dos fallas, considerando el sistema de fallas Oca-Ancón y la zona norte de la falla de Boconó.

El comportamiento geodinámica de la región se observa a través de los mapas de velocidades geodésicas construidos a partir de las velocidades absolutas y relativas para los marcos de referencia ITRF2008 (Altamimi et al., 2012) y el ITRF2014 (Altamimi et al., 2016). El mapa se construyó con la Herramienta Genérica de Mapeo (*Generic Mapping Tools - GMT*).

Este trabajo busca profundizar en el estudio del desplazamiento y la cinemática del sistema de fallas Oca-Ancón, empleando el Sistema Global de Navegación por Satélite. La geodesia espacial, en el estudio de la tectónica de placas, observa las variaciones ocurridas para una ventana de tiempo determinada. Estos resultados, junto a los de otras investigaciones realizadas en el occidente venezolano permiten profundizar en la evolución y evaluación del comportamiento geodinámico, generando así una mayor información para los estudios de amenaza y riesgo sísmico de la región.

METODOLOGÍA

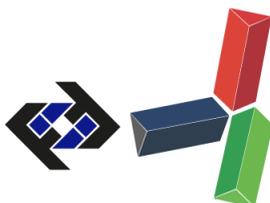
PROCESAMIENTO DE LOS DATOS GEODÉSICOS GNSS.

La finalidad del procesamiento es obtener las coordenadas geodésicas de cada estación para diversos periodos de tiempo y así poder generar el campo geodésico de velocidades y construir los archivos de entrada para la fase del modelado. Esto fue realizado con los datos obtenidos en las campañas 2011, 2013 y 2016. La Tabla 1 muestra la información de cada estación además del año y la campaña en que se realizó la medición. La Figura 1 muestra las estaciones procesadas. El procesamiento se encuentra conformado por dos etapas: pre-procesamiento donde se orden y manipulan los datos con la herramienta de Traducción, edición y chequeo de calidad Teqc (Estey & Meertens, 1999) y la etapa del procesamiento, donde se tomaron los datos disponibles y se creó una rutina de procesamiento con el paquete BERNESE (Dach & Walser, 2013).

Tabla 1. Lista de estaciones geodésicas incluidas en el procesamiento

CODIGO	NOMBRE	ESTADO	LONGITUD	LATITUD	CAMPAÑA	MEDICIONES REALIZADAS		
						2011	2013	2016
AMU0	Amuay	Falcón	-70,188	11,753	USB, CASA 93, CARIVEN 94	SI	SI	SI
BAU0	El Baúl	Cojedes	-68,159	9,118	REGVEN	SI	SI	SI
BOZ0	Bozugo	Falcón	-70,746	10,819	FUNVISIS	SI	SI	SI
BTA0	Barinitas	Barinas	-70,367	8,726	FUNVISIS	SI	SI	SI
CAR0	Carora	Lara	-70,074	10,18	CASA 93	SI	SI	SI
COP0	Copeyal	Lara	-69,454	10,442	FUNVISIS	SI	SI	SI

Tabla 1. Lista de estaciones geodésicas incluidas en el procesamiento (continuación)



JIFI2018
JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
ENCUENTRO ACADÉMICO INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA UCV

CODIGO	NOMBRE	ESTADO	LONGITUD	LATITUD	CAMPAÑA	MEDICIONES REALIZADAS		
						2011	2013	2016
DAL0	Fca. La Dalia	Táchira	-72,314	8,267	REGVEN, CASA 93	SI	SI	NO
HSR0	Hda. San Rafael	Cojedes	-68,539	9,662	REGVEN	SI	SI	NO
KYP0	Caipe	Barinas	-69,999	8,524	REGVEN	SI	SI	SI
LOM0	Fca. Las Lomas	Cojedes	-68,87002	9,65784	REGVEN	NO	SI	SI
MAC0	Macolla	Falcón	-70,204	12,088	FUNVISIS	SI	SI	SI
MAM0	El Mamon	Falcón	-69,743	11,158	FUNVISIS	SI	NO	SI
NIR0	Nirgua	Yaracuy	-68,528	10,149	CASA 93	SI	SI	SI
PAV0	Fca. Las Pavas	Zulia	-71,12	10,189	FUNVISIS	SI	SI	SI
PED0	La Pedrera	Táchira	-71,566	7,54	USB	SI	SI	SI
POR0	Portachuelo	Falcón	-69,917	11,789	FUNVISIS	SI	SI	SI
PRE0	Pregonero	Táchira	-71,775	8,029	USB	SI	SI	SI
QUI0	Quibor	Lara	-69,646	9,871	REGVEN, CARIVEN 94	SI	SI	SI
SAR0	San Roman	Falcón	-70,001	12,18	FUNVISIS	SI	SI	SI
TAL0	La Tala	Táchira	-71,682	7,801	FUNVISIS	SI	SI	SI
UMU0	Umuquena	Táchira	-72,051	8,235	FUNVISIS	SI	SI	SI
URI0	Uribante	Táchira	-71,743	7,913	USB, REGVEN	SI	SI	SI
VAN0	Valle Negro	Táchira	-71,882	8,092	FUNVISIS	SI	SI	SI
VIC0	Hda. Victoria	Zulia	-71,327	10,379	FUNVISIS	SI	SI	SI
YAG0	Las Yaguas	Lara	-70,53	10,062	FUNVISIS	SI	SI	SI

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.
Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053
Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

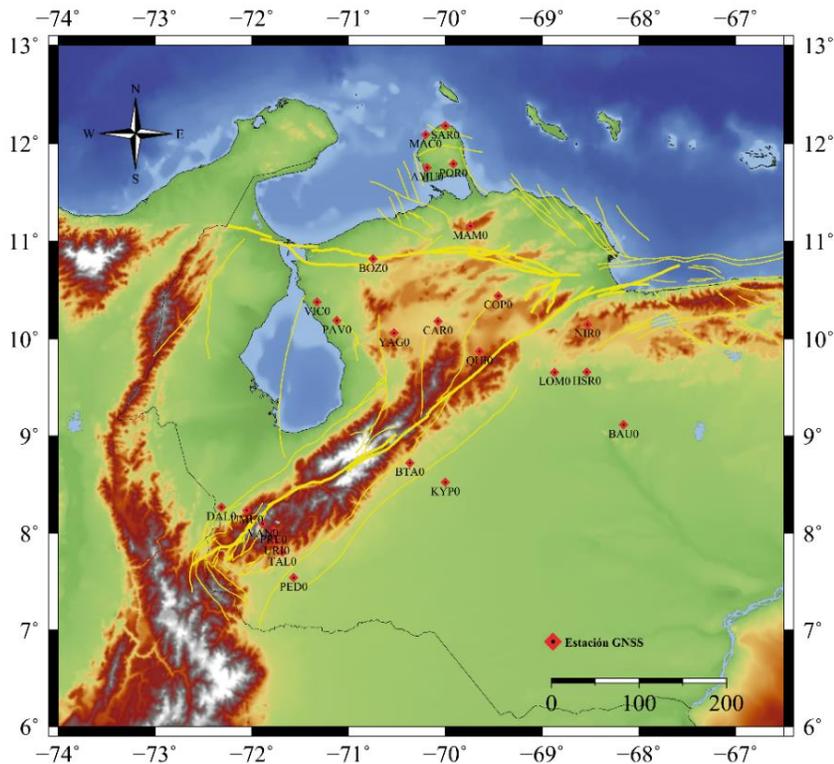


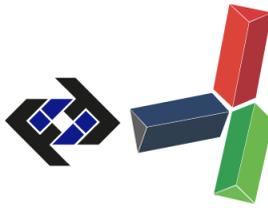
Figura 1. Distribución de estaciones geodésicas en el centro-occidente de Venezuela

CREACIÓN DEL MAPA DE VELOCIDADES GEODÉSICAS PARA EL CENTRO OCCIDENTE VENEZOLANO

El mapa de velocidades geodésicas muestra los vectores de velocidad para cada una de las estaciones procesadas. Se trabajó con el programa GMT para la construcción de estos mapas. Los datos de entrada para cada uno de los mapas fueron: longitud, latitud, velocidad de la componente norte y este, error estimado de la componente norte y este y el código de la estación. Estos fueron los valores obtenidos posterior al procesamiento de los datos GNSS.

GENERACIÓN DE LOS MODELOS DE DISLOCACIÓN, ELÁSTICO SIMPLE Y HETEROGÉNEO ASIMÉTRICO

Para este trabajo se utilizaron los modelos propuesto por Savage & Burford (1973) en el caso de una dislocación elástica simple y el modelo propuesto en el trabajo de Le Pichon *et. al.* (2005) para una dislocación heterogénea asimétrica. La formulación analítica de este modelo se basa en una dislocación sin deslizamiento entre los bloques de la falla por encima de la profundidad de bloque D y con deslizamiento por debajo de esta profundidad D , el cual posee una tasa de desplazamiento V . El modelo de Savage & Burford (1973) es derivado de los trabajos de Chinnery (1961) y Weertman & Weertman (1964). Algunas de las velocidades obtenidas en la etapa del procesamiento presentaron un error estimado en las componentes norte y este relativamente elevado, por lo cual se procedió a limitar el número de estaciones. Las estaciones descartadas fueron: Barinitas, estado Barinas (BTA0); Copeyal, estado Lara (COP0); Pavas estado Zulia (PAV0) y Quibor, estado Lara (QUI0).



Partiendo de la Ecuación 1, se obtiene una función que describe el proceso de desplazamiento en la fase intersísmica y modela el bloqueo de la falla para un sistema homogéneo. Esta función se define matemáticamente por la Ecuación 2 y la empleamos para calcular las velocidades superficiales paralelas a la falla, de un modelo de dislocación elástico simple. Si asumimos una velocidad de campo lejano y una profundidad de bloqueo constantes, la función solo dependerá de una variable X, que en este caso coincide con la menor distancia entre el punto de recolección de los datos y la falla.

$$v(x) = V_1 + 2 \frac{V_2}{\pi} \tan^{-1} \frac{x}{D}; x \geq 0 \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$v(x) = V_1 + 2 \frac{V_1}{\pi} \tan^{-1} \frac{x}{D}; x < 0$$

$$v(x) = \frac{V}{2} + \frac{V}{\pi} \tan^{-1} \frac{x}{D} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Los modelos lateralmente heterogéneos toman en cuenta las variaciones de las propiedades elásticas a través y dentro de la zona de falla. Es decir, los bloques que separan la falla son considerados geológicamente diferentes, por lo cual presentan módulos de Young distintos. Para hacer este modelado fue necesario considerar el contraste de rigidez de estos bloques. Las Ecuaciones 3 y 4 fueron empleadas para la construcción del modelo heterogéneo asimétrico.

$$K = \frac{V_1}{V_1 + V_2} = \frac{V_1}{V} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$v(x) = \frac{2KV}{\pi} \tan^{-1} \frac{x}{D}; x < 0 \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$v(x) = 2(1 - K) \frac{V}{\pi} \tan^{-1} \frac{x}{D}; x \geq 0$$

Fue necesario descartar las estaciones ubicadas a más de 200 km de la falla, para minimizar el error y obtener un resultado más preciso. Las estaciones empleadas para la realización del modelo se muestran en la Figura 2. Para poder encontrar el valor de la profundidad de bloqueo y la velocidad de campo lejano, se aplicó un método de iteración que consiste en realizar una gran cantidad de cálculos asociados a un error cuadrático medio (Root Mean Square error - RMS). El RMS expresado en la Ecuación 5, es un cálculo del error entre las velocidades obtenidas del procesamiento de los datos (velocidad observada) y las velocidades simuladas.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \frac{(V_o - V_s)^2}{(\sigma_{V_o})^2}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Dónde, σ_{V_o} es la varianza del error estimado; V_o es la velocidad observada; V_s es la velocidad simulada y n es el número de estaciones procesadas.

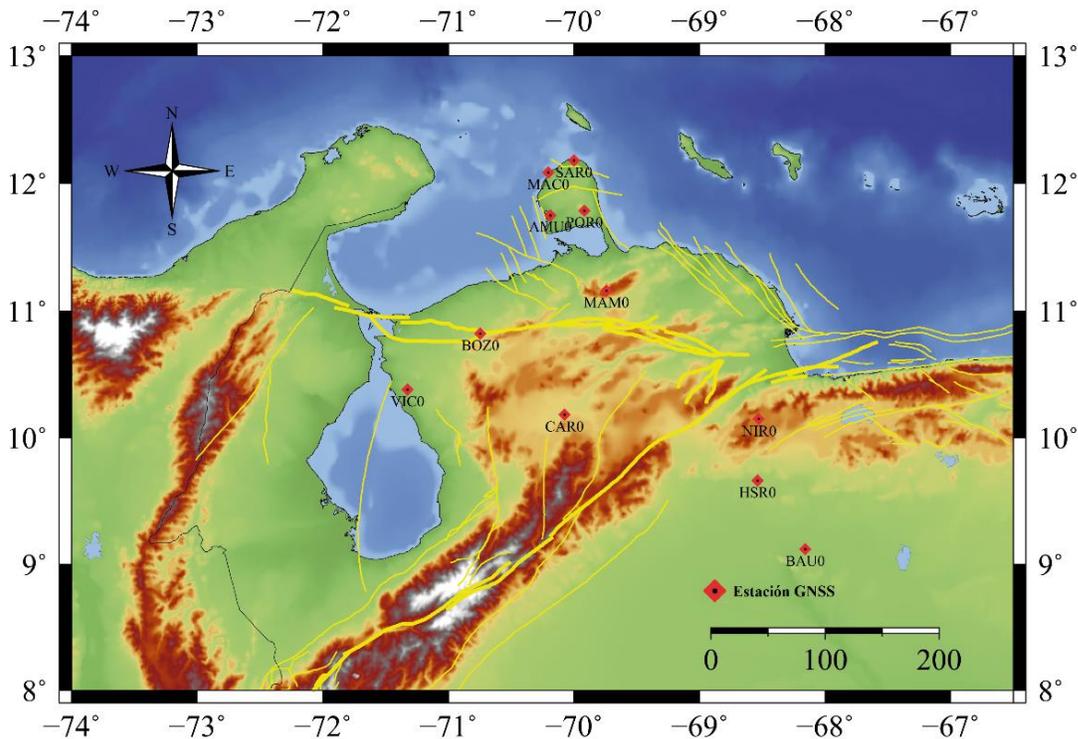


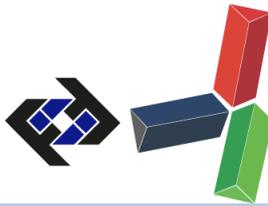
Figura 2. Distribución de las estaciones utilizadas para los modelos

GENERACIÓN DEL MODELO DE DISLOCACIÓN, ELÁSTICO SIMPLE PARA DOS FALLAS

El propósito de realizar este modelo es evaluar la contribución del sistema de fallas Oca-Ancón y la falla de Boconó a los 20 ± 2 mm/año de desplazamiento lateral derecho del Caribe con respecto a Suramérica (Pérez O. et al., 2011) y lograr un mejor ajuste para el modelo de dislocación elástico simple y heterogéneo asimétrico del sistema de fallas Oca-Ancón. Para cumplir con el criterio de selección de estaciones (estaciones ubicadas a una distancia menor de 200 km de la falla), se trabajó con las secciones más septentrionales de la Falla Boconó: VE-06e y VE-06d Audemard et al. (2000), por lo cual se descartaron las estaciones ubicadas a más de 200 km del sistema de fallas Oca-Ancón. La expresión matemática que define este modelo está representado por la Ecuación 6.

$$v(x) = \frac{V_1}{\pi} \tan^{-1} \frac{x_1}{D_1} + \frac{V_1}{2} + \cos \alpha \frac{V_2}{\pi} \tan^{-1} \frac{x_2}{D_2} + \frac{V_2}{2} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Dónde, V_1 y V_2 es la velocidad de campo lejano de la falla uno y dos respectivamente; x_1 y x_2 es la distancia ortogonal a la falla uno y dos respectivamente; D_1 y D_2 es la profundidad de bloqueo de la falla uno y dos respectivamente y α es el ángulo entre la falla uno y dos.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CREACIÓN DEL MAPA DE VELOCIDADES GEODÉSICAS PARA EL CENTRO OCCIDENTE VENEZOLANO

Las velocidades absolutas reflejan el movimiento real de las placas, mientras que las relativas expresan la tasa de desplazamiento respecto al cratón suramericano. La Tabla 2 muestra las velocidades obtenidas para los marcos de referencia ITRF2008 y el ITRF2014. Los mapas de velocidades relativas muestran el desplazamiento de la placa Caribe en dirección este, respecto a la placa de América del Sur. Los vectores de velocidad relativa para el ITRF2014 muestran una dirección este, oeste más pronunciada que los vectores del ITRF2008.

La velocidad promedio total para el ITRF2008 es de 12,28 mm/año mientras que para el ITRF2014 es de 12,35 mm/año. Las velocidades absolutas entre ambos marcos de referencia presentan una muy baja variabilidad, esto pudiera deberse en parte por la falta de deformaciones post-sísmica referida a grandes eventos en la región, el ITRF2014 a diferencia del ITRF2008 si considera estas deformaciones. La Figura 3 y 4 presentan los mapas de velocidades absolutas para el ITRF2008 y el ITRF2014 respectivamente, y en las Figuras 5 y 6 se exponen los mapas de velocidades relativas para el ITRF2008 y el ITRF2014 respectivamente.

Tabla 2. Velocidades absolutas y relativas para los ITRF 2008 Y 2014

CODIGO	V ABSOLUTAS (mm/año)		ERROR ESTIMADO		V RELATIVAS a Suramérica (mm/año)					
	NORTE	ESTE	NORTE	ESTE	ITRF2008			ITRF2014		
					NORTE	ESTE	TOTAL	NORTE	ESTE	TOTAL
AMU0	12,84	13,23	1,20	1,30	2,51	19,21	19,37	-0,23	16,79	16,79
BAU0	8,30	-3,39	1,50	1,70	-2,25	2,28	3,20	-4,50	10,74	11,64
BOZ0	13,03	12,18	1,10	1,30	2,77	18,09	18,30	0,28	15,57	15,57
CAR0	12,83	1,44	1,10	1,30	2,49	7,27	7,68	0,20	5,84	5,84
DAL0	17,51	6,67	1,20	1,40	7,43	12,37	14,43	5,05	9,70	10,94
HSR0	19,32	-3,03	1,30	1,40	8,81	2,70	9,21	6,40	10,45	12,25
KYP0	12,82	5,30	1,10	1,20	2,47	10,96	11,23	0,15	8,63	8,63
LOM0	20,12	7,72	1,70	2,00	9,65	13,46	16,56	7,18	11,15	13,26
MAC0	17,35	18,28	4	4,8	7,02	24,29	25,28	4,68	20,79	21,31
MAM0	14,82	10,97	1,3	1,5	4,44	16,88	17,45	1,8	14,47	14,58
NIRO	15,61	1,37	1	1,2	5,1	7,14	8,77	2,65	5,59	6,19
PED0	11,02	-7,43	4,5	5,7	0,85	-1,83	-2,02	-0,14	13,18	13,18
POR0	15,85	13,55	1,5	1,7	5,49	19,52	20,28	16,22	1,6	16,3
PRE0	14,37	-3,31	1,1	1,3	4,22	2,35	4,83	2,22	10,54	10,77
SAR0	13,75	14,63	1,6	1,9	3,4	20,64	20,92	0,39	17,93	17,93
TAL0	9,8	-4,83	1,3	1,5	-0,36	0,8	0,88	-1,92	13,2	13,34

Tabla 2. Velocidades absolutas y relativas para los ITRF 2008 Y 2014 (continuación)

CODIGO	V ABSOLUTAS (mm/año)		ERROR ESTIMADO		V RELATIVAS a Suramérica (mm/año)					
	NORTE	ESTE	NORTE	ESTE	ITRF2008			ITRF2014		
					NORTE	ESTE	TOTAL	NORTE	ESTE	TOTAL
UMU0	17,39	3,47	1,1	1,3	7,28	9,16	11,7	5,01	6,57	8,26
URI0	12,81	-1,83	1,1	1,3	2,66	3,82	4,65	0,51	8,56	8,58
VAN0	15,7	1,42	1	1,3	5,56	7,09	9,01	3,43	5,24	6,26
VIC0	24,6	7,34	3,7	4,4	14,4	13,22	19,55	10,67	10,07	14,67
YAG0	21,92	5,97	1	1,2	11,63	11,8	16,57	9,26	9,32	13,14

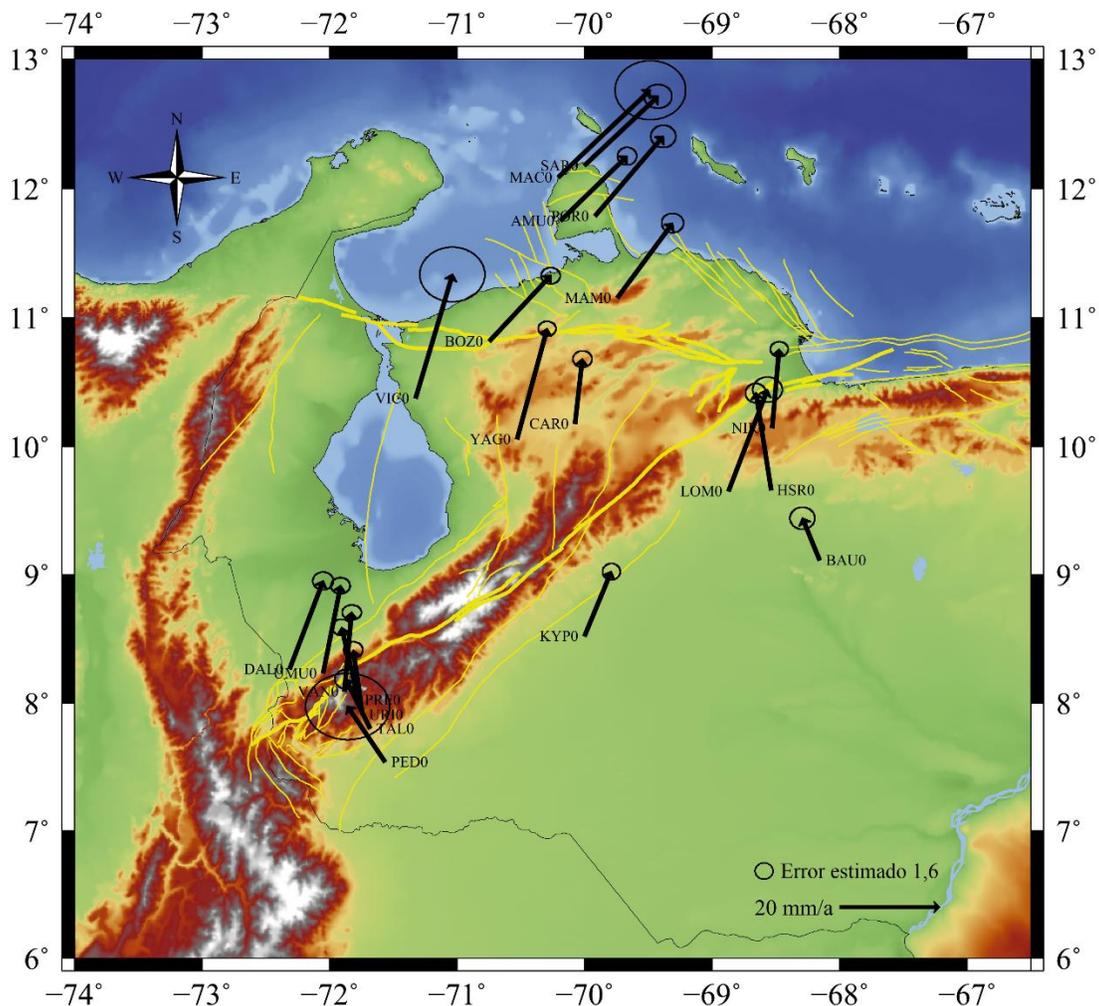


Figura 3. Mapa de velocidades geodésicas para el centro occidente venezolano. Velocidades absolutas en el marco de referencia ITRF2008

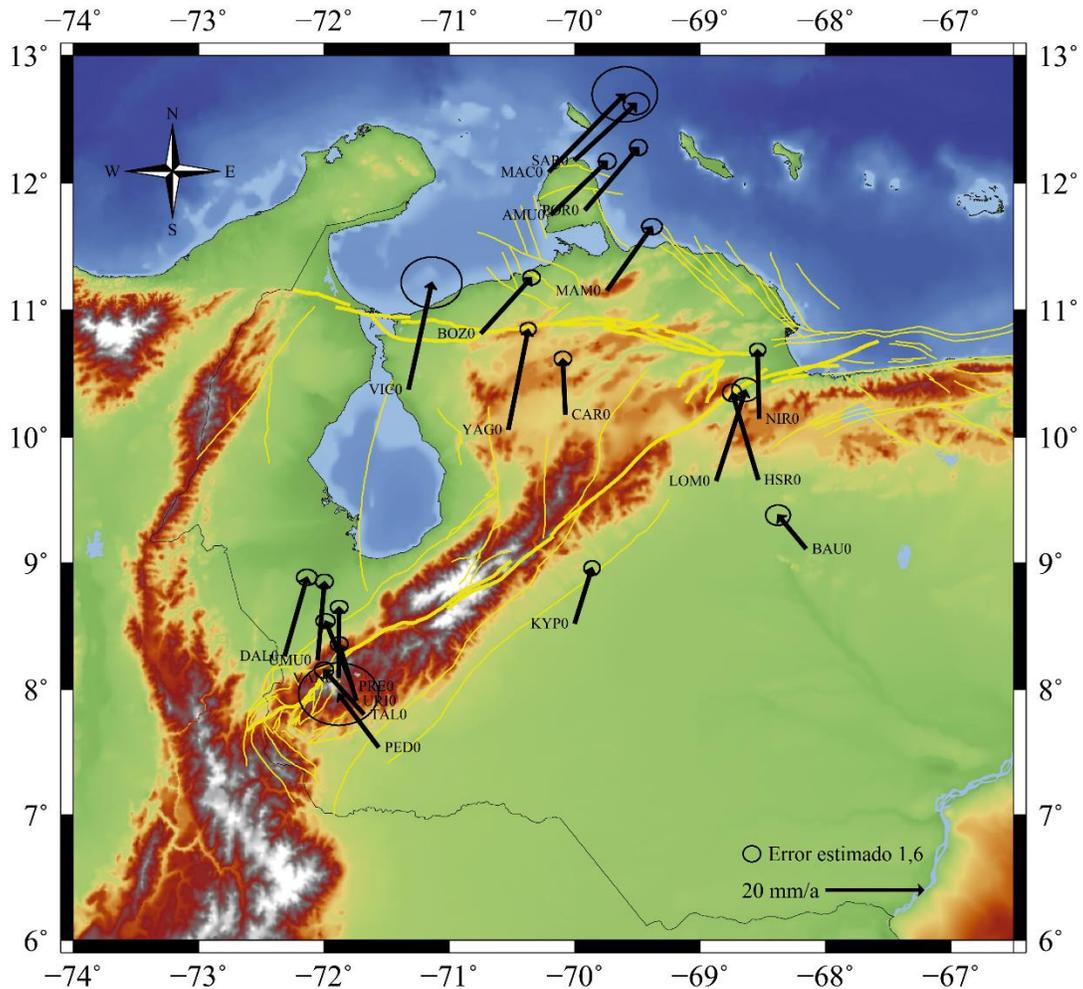


Figura 4. Mapa de velocidades geodésicas para el centro occidente venezolano. Velocidades absolutas en el marco de referencia ITRF2014

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.
 Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053
 Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

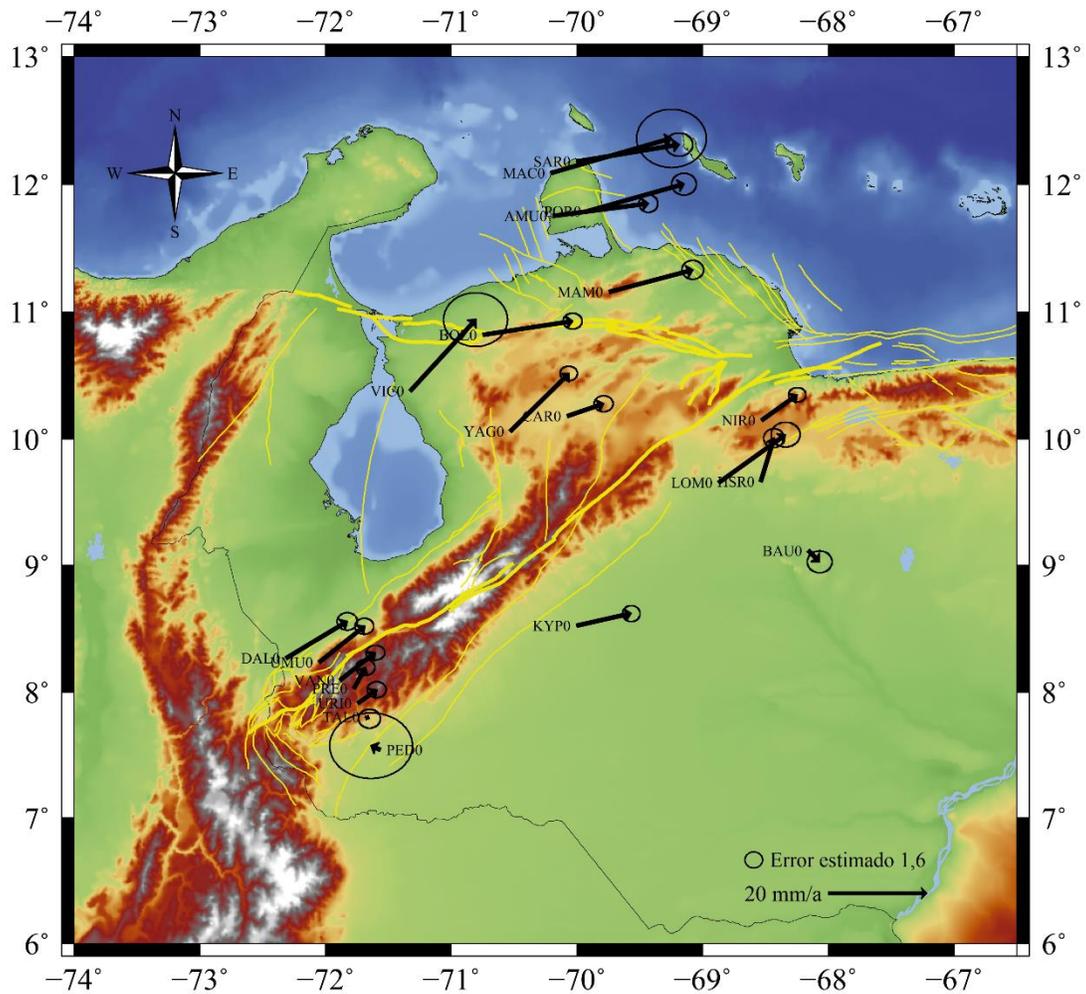


Figura 5. Mapa de velocidades geodésicas para el centro occidente venezolano. Velocidades relativas en el marco de referencia ITRF2008

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.
 Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053
 Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

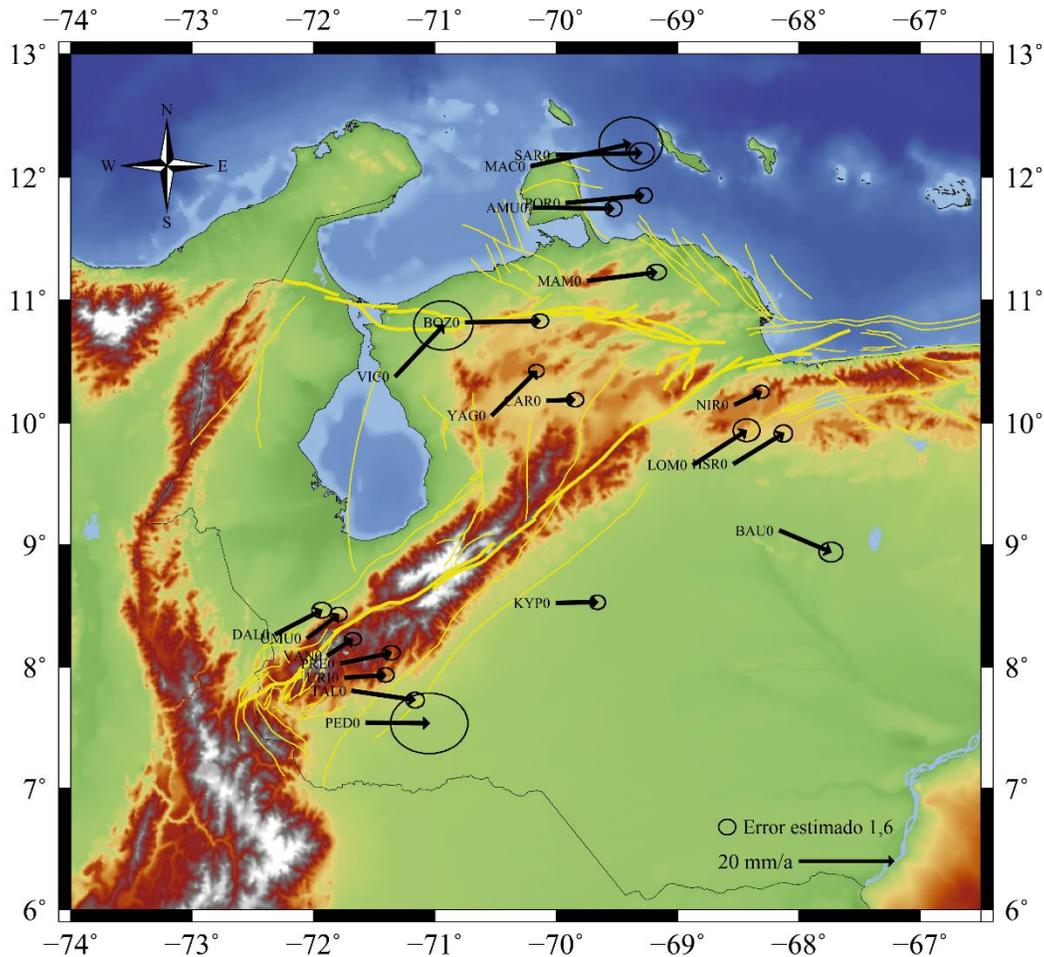


Figura 6. Mapa de velocidades geodésicas para el centro occidente venezolano. Velocidades relativas en el marco de referencia ITRF2014

GENERACIÓN DE LOS MODELOS DE DISLOCACIÓN, ELASTICO SIMPLE Y HETEROGENEO ASIMÉTRICO

La velocidad paralela a la falla y la velocidad simulada son tasas de desplazamiento superficial. Al aplicar la expresión matemática definida en los trabajos de (Chinnery, 1961; Weertman & Weertman, 1964; Savage & Burford, 1973), se calcula la velocidad simulada para una estación que se encuentra a una distancia X de la falla. La profundidad de bloqueo D y la velocidad de campo lejano V son constante para todas las estaciones. El objetivo es encontrar valores de V y D que generen el mejor ajuste entre la velocidad observada y la simulada. Esto se logra al hallar el mínimo valor del RMS. La Tabla 3 presenta el mejor ajuste matemático para este modelo. La Figura 6, muestra la curva arco-tangencial que representa este modelo. Se logró obtener un RMS igual a 1,40; una velocidad de campo lejano V igual a 20 mm/año y una profundidad de bloqueo D igual a 42,10 km.

Tabla 3. Velocidades observadas y simuladas del sistema de fallas Oca-Ancón para un modelo elástico simple

	Estación	VELOCIDAD OBSERVADA	VELOCIDAD SIMULADA	DISTANCIA A LA FALLA (km)
NORTE	SAR0	20,353	18,140	140
	MAC0	23,741	18,076	135
	AMU0	18,988	17,417	98
	POR0	19,089	17,398	97,20
	MAM0	14,443	13,298	24
	BOZ0	17,853	10,326	2,16
SUR	VIC0	7,054	5,108	-40,70
	NIR0	7,140	4,262	-53,20
	CAR0	7,079	3,206	-76,40
	HSR0	2,700	2,386	-107
	BAU0	2,280	1,572	-167

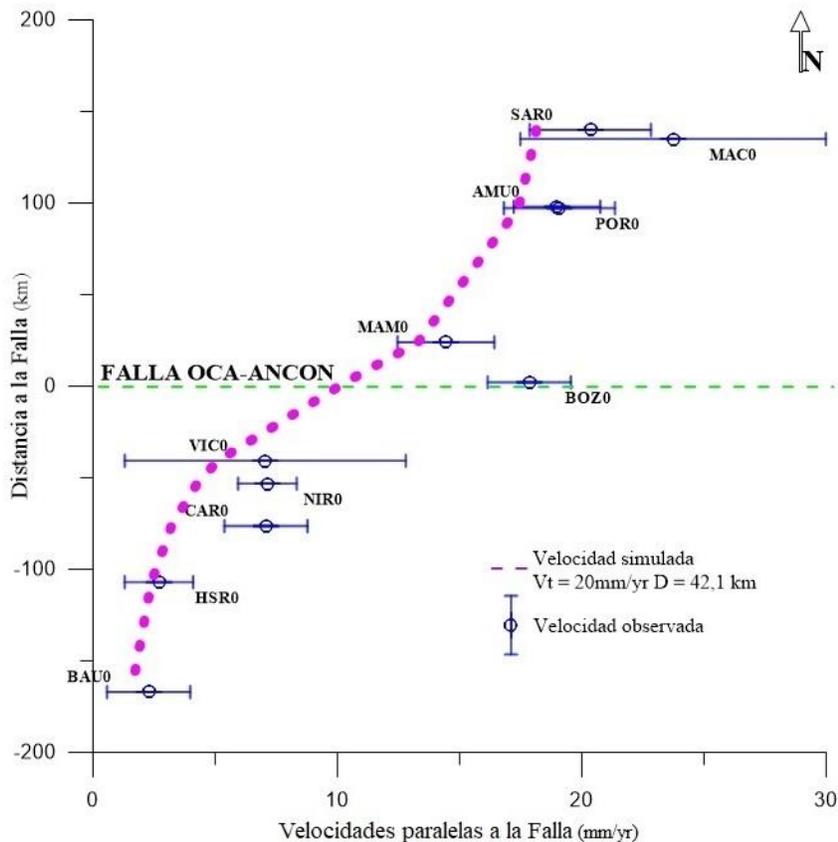
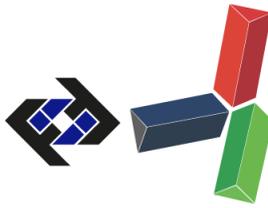


Figura 6. Curva arco-tangencial. Modelo de dislocación elástico simple para el sistema de fallas Oca-Ancón



Según Ruff (2000) la zona sismogénica se limita a una profundidad de 40 ± 10 km en zonas de subducción, y a menos de la mitad en otros entornos tectónicos, por lo cual los 42,10 km obtenidos para este modelo no concuerdan con una zona de desplazamiento lateral. Para la falla de Boconó la velocidad de campo lejano es de 12 ± 2 mm/año ocurriendo por debajo de una profundidad de bloqueo de 14 ± 4 km (Pérez et al., 2011) lo que implica un deficit de aproximadamente 6 mm/año para el vector de desplazamiento entre el Caribe y Suramérica (20 mm/año), por lo cual la velocidad de campo lejano obtenida para el modelo de dislocación elástico simple del sistema de fallas Oca-Ancón es significativamente elevada.

Con el propósito de resolver estas contradicciones se ha considerado transformar la velocidad observada a partir de la tasa de movimiento superficial expuesta en el trabajo de Audemard et al (1996) que varía entre 0,45 mm/año y 2 mm/año, por lo cual se normalizaron las velocidades obtenidas del procesamiento (velocidades observadas) empleando una relación matemática, obteniendo como resultado un nuevo grupo de velocidades (velocidades normalizadas), con estos valores se construyó un modelo de dislocación elástico simple. La Tabla 4 expone las velocidades simulada para los distintos valores de velocidad de campo lejano V y profundidad de bloqueo D. Para determinar los intervalos de variación de V y D se evaluó la curva de variabilidad del RMS en función de la profundidad de bloqueo para distintas velocidades de campo lejano. En la Figura 7 se presentan las tres curvas obtenidas.

Tabla 4. Velocidades normalizadas y simuladas del sistema de fallas Oca-Ancón para distintos valores de V y D matemáticamente aceptable

	Estación	Velocidades			
		Velocidad normalizada	1,95 mm/año 40 km	2,00 mm/año 42 km	2,05 mm/año 45 km
NORTE	SAR0	1,814	1,777	1,814	1,847
	MAC0	1,808	1,771	1,808	1,840
	AMU0	1,742	1,709	1,742	1,769
	POR0	1,740	1,708	1,740	1,767
	MAM0	1,330	1,310	1,330	1,345
	BOZO	1,033	1,008	1,033	1,056
SUR	VIC0	0,511	0,482	0,510	0,545
	NIR0	0,426	0,400	0,425	0,458
	CAR0	0,321	0,299	0,320	0,347
	HSR0	0,239	0,222	0,238	0,260
	BAU0	0,157	0,146	0,157	0,172

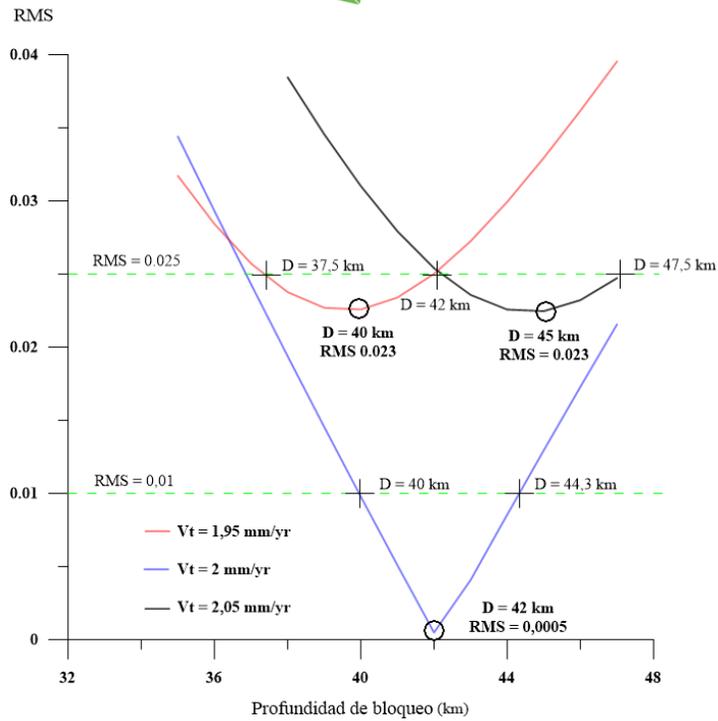


Figura 7. Variabilidad del RMS en función de la profundidad de bloqueo D para distintos valores de V

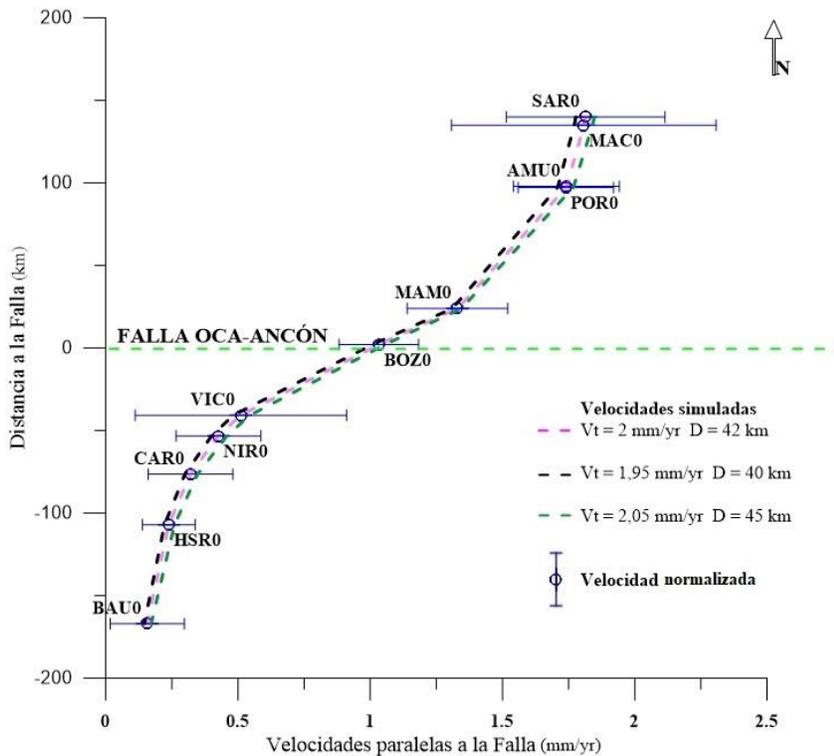


Figura 8. Curvas arco-tangenciales. Modelo de dislocación elástico simple matemáticamente aceptado, del sistema de fallas Oca-Ancón para diferentes valores de V y D

Para este modelo el RMS varía entre 5×10^{-4} y 23×10^{-3} . La Figura 8 muestra las curvas arco-tangenciales para cada uno de las tasas de desplazamiento por debajo de su respectiva profundidad de bloqueo. Un RMS tan bajo hace que las velocidades normalizadas y las velocidades simuladas sean prácticamente iguales, matemáticamente esto representa un ajuste ideal, sin embargo, según lo expuesto en el trabajo de Ruff (2000) la profundidad de bloqueo D obtenida no es aceptable para una zona de deslizamiento lateral derecho, por lo cual se ha variado la profundidad de bloqueo con el objetivo de encontrar un modelo que presente un ajuste geológicamente más aceptable. La Tabla 5 expone los resultados del cálculo de las distintas velocidades simuladas para distintos valores de velocidad de campo lejano V y profundidad de bloqueo D.

Tabla 5. Velocidades normalizadas y simuladas del sistema de fallas Oca-Ancón para distintos valores de V y D geológicamente aceptable

	Estación	Velocidades			
		Velocidad normalizada	1,45 mm/año 13,50 km	1,50 mm/año 16,50 km	1,55 mm/año 19,50 km
NORTE	SAR0	1,814	1,406	1,444	1,482
	MAC0	1,808	1,404	1,442	1,479
	AMU0	1,742	1,387	1,420	1,453
	POR0	1,740	1,386	1,420	1,452
	MAM0	1,330	1,214	1,212	1,213
	BOZ0	1,033	0,798	0,812	0,829
SUR	VIC0	0,511	0,148	0,184	0,220
	NIR0	0,426	0,115	0,144	0,173
	CAR0	0,321	0,081	0,102	0,123
	HSR0	0,239	0,058	0,073	0,089
	BAU0	0,157	0,037	0,047	0,057

Queda claro que a medida que aumentan la velocidad de campo lejano V y la profundidad de bloqueo D matemáticamente el ajuste se hace más preciso, sin embargo, geológicamente no sería aceptable seguir aumentando estos valores, debido a que no se correlaciona con una zona de desplazamiento lateral, por lo cual se considera que la velocidad de campo lejano es igual a $1,50 \pm 0,05$ mm/año y la profundidad de bloqueo es igual a $16,5 \pm 3$ km. La curva de variabilidad total del RMS en función de la profundidad de bloqueo para un modelo geológicamente aceptable está expuesta en la Figura 9. El RMS queda definido por el intervalo: $0,2265 < \text{RMS} < 0,2270$. La curva arco-tangencial que representa este modelo se expone en la Figura 10.

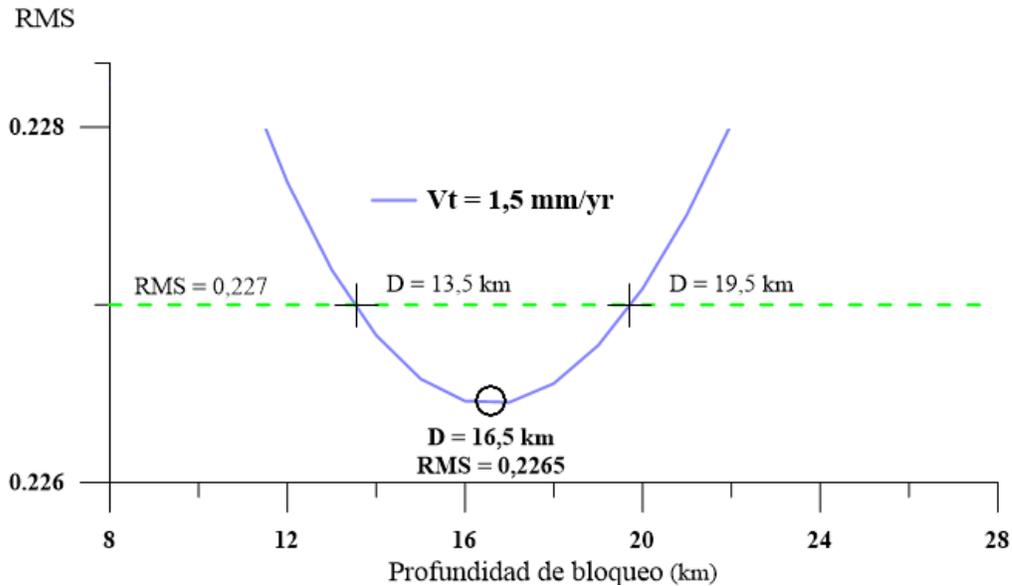


Figura 9. Variabilidad del RMS en función de la profundidad de bloqueo D para $V=1,5$ mm/año

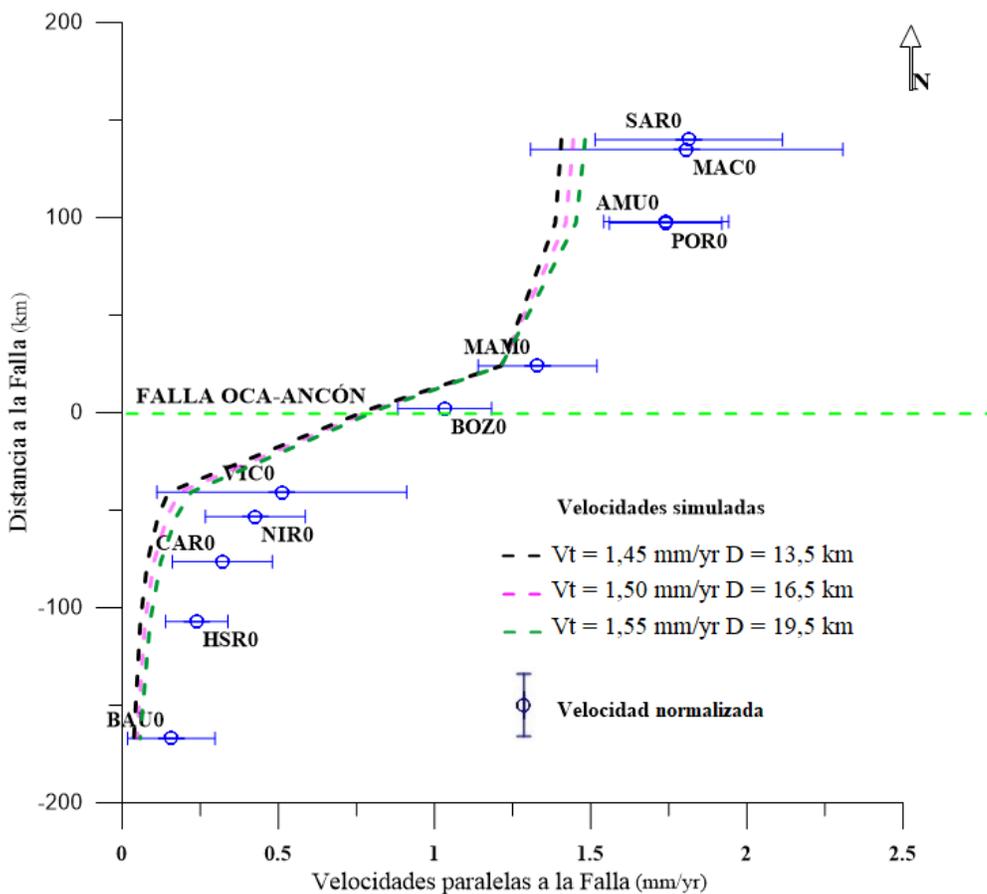
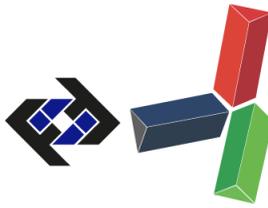


Figura 10. Curvas arco-tangenciales. Modelo de dislocación elástico simple geológicamente aceptado, del sistema de fallas Oca-Ancón para diferentes valores de V y D



Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico basado en la construcción y evaluación de histogramas donde se estudia el contraste entre las velocidades normalizadas y las velocidades simuladas. Se aplicó una prueba de contraste de hipótesis conocida con el nombre de Chi cuadrado, definida por la ecuación 7, con el objetivo de verificar el ajuste del modelo geológicamente aceptable. Dónde, f_0 es la frecuencia observada; f_e es la Frecuencia esperada y x^2 es el valor de Chi cuadrado calculado.

$$x^2 = \sum \frac{(f_0 - f_e)^2}{f_e} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Los resultados obtenidos para la prueba de contrasté de hipótesis se basan en un nivel de significancia igual a 0,03; es decir que el margen de error es de 3% por lo que el porcentaje de acierto al momento de aceptar o descartar la hipótesis nula es de 97%. Para todas las velocidades de campo lejano y las profundidades de bloqueo evaluadas los resultados muestran que los datos se ajustan a la distribución teórica, por lo cual el modelo geológicamente aceptable se considera estadísticamente correcto.

Modelo de dislocación heterogéneo asimétrico

En este tipo de modelos se asume que la falla se compone únicamente de dos bloques, aunque realmente la composición a lo largo de una falla tan extensa estaría controlada por una cantidad de bloques n, los cuales se ven afectados por diferentes variables que generan un contraste de rigidez muy variado, por lo cual el resultado obtenido no es exacto, y se considera como una aproximación del contraste de rigidez real. La Tabla 6 muestra las velocidades simuladas para los distintos valores V, D y K.

Tabla 6. Velocidades normalizadas y simuladas del sistema de fallas Oca-Ancón para un modelo heterogéneo asimétrico

	Estación	Velocidades			
		Velocidad normalizada	1,45 mm/año 13,5 km K=0,399	1,50 mm/año 16,5 km K=0,426	1,55 mm/año 19,5 km K=0,452
NORTE	SAR0	1,814	1,543	1,547	1,550
	MAC0	1,808	1,541	1,545	1,548
	AMU0	1,742	1,521	1,520	1,519
	POR0	1,740	1,520	1,519	1,518
	MAM0	1,330	1,312	1,281	1,256
	BOZ0	1,033	0,813	0,821	0,835
SUR	VIC0	0,511	0,265	0,268	0,274
	NIR0	0,426	0,238	0,234	0,232
	CAR0	0,321	0,211	0,198	0,187
	HSR0	0,239	0,193	0,174	0,156
	BAU0	0,157	0,176	0,152	0,127

Para determinar los intervalos de variación de los parámetros V, D y K se evaluó la curva de variabilidad del RMS en función del coeficiente de asimetría K, partiendo de las velocidades de campo lejano y profundidades de bloqueo del modelo de dislocación elástico simple con mejor ajuste geológico. Se ha considerado un RMS = 0,159 que geológicamente es el más concordante con las características litológicas, ya que para este valor el coeficiente de asimetría K varía entre 0,399 y 0,452. Lo que implica que uno de los bloques es de 20% a 50% más rígido que el otro. Al oriente de la falla es donde se muestra una mayor variabilidad litológica entre los bloques, por lo que el 50% pudiera ser de esa zona, caso contrario al occidente, donde la variabilidad es muy baja y se podría traducir en ese 20% obtenido. La Figura 11 representa la curva arco-tangencial para este modelo.

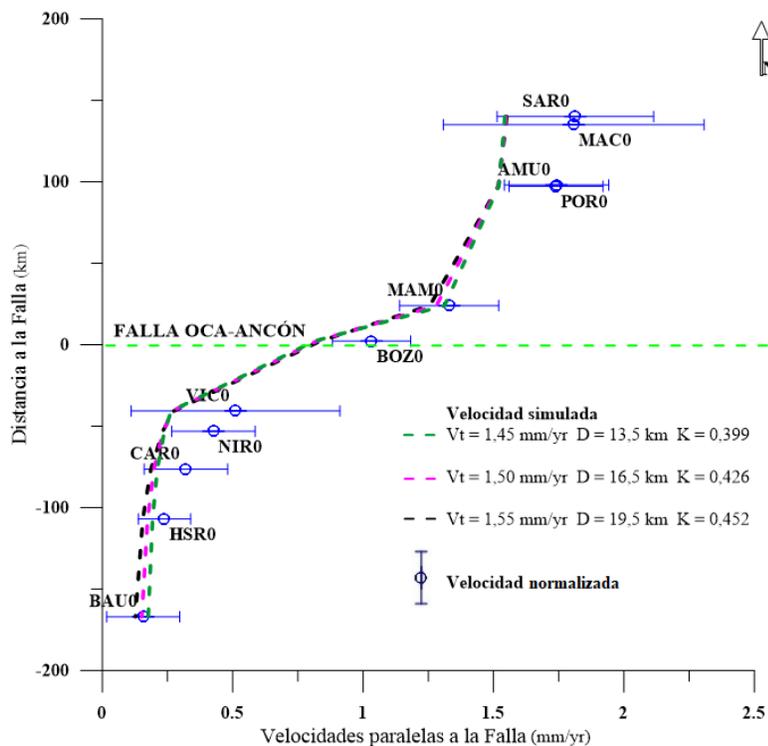


Figura 11. Curvas arco-tangenciales. Modelo de dislocación heterogéneo asimétrico geológicamente aceptado, del sistema de fallas Oca-Ancón para diferentes valores de V, D y K

Al comparar los resultados del RMS obtenido de los modelos de dislocación elástico simple (RMS = 0,2265) y heterogéneo asimétrico (RMS = 0,1590) se aprecia, que con el coeficiente de asimetría K el ajuste matemático es más preciso. Se obtiene una disminución del RMS de aproximadamente un 30%.

GENERACIÓN DEL MODELO DE DISLOCACIÓN ELASTICO SIMPLE PARA DOS FALLAS

En el modelado de dos fallas El RMS para el sistema de fallas Oca-Ancón es sumamente elevado, las velocidades son similares a las definidas por Audemard et al (2000) $0,45 \text{ mm/año} < V < 2 \text{ mm/año}$ y la profundidad de bloqueo no concuerda con una zona de desplazamiento lateral (Ruff, 2000). La Tabla 7 muestra el resultado de este modelo. Para evaluar el resultado de la falla de Boconó se realizó un modelo de dislocación elástico simple para la falla de Boconó.

Tabla 7. Velocidad de campo lejano, profundidad de bloqueo y RMS para cada una de las fallas.
 Modelo de dislocación elástico simple para dos fallas

	Oca-Ancón	Boconó
Velocidad de campo lejano (mm/año)	2,18	15,50
Profundidad de bloqueo (km)	42,10	16,00
RMS	5,4	1,4

El mejor ajuste para el RMS es igual a 1,4; se origina para una velocidad de campo lejano de 15,5 mm/año y una profundidad de bloqueo igual a 16 km. Estos valores coinciden con los obtenidos para la falla de Boconó en el modelo de dos fallas, por lo cual se asume que los resultados obtenidos para la falla de Boconó son válidos. La Figura 12 representa la curva arco-tangencial para el modelo de dislocación elástico simple de la falla de Boconó.

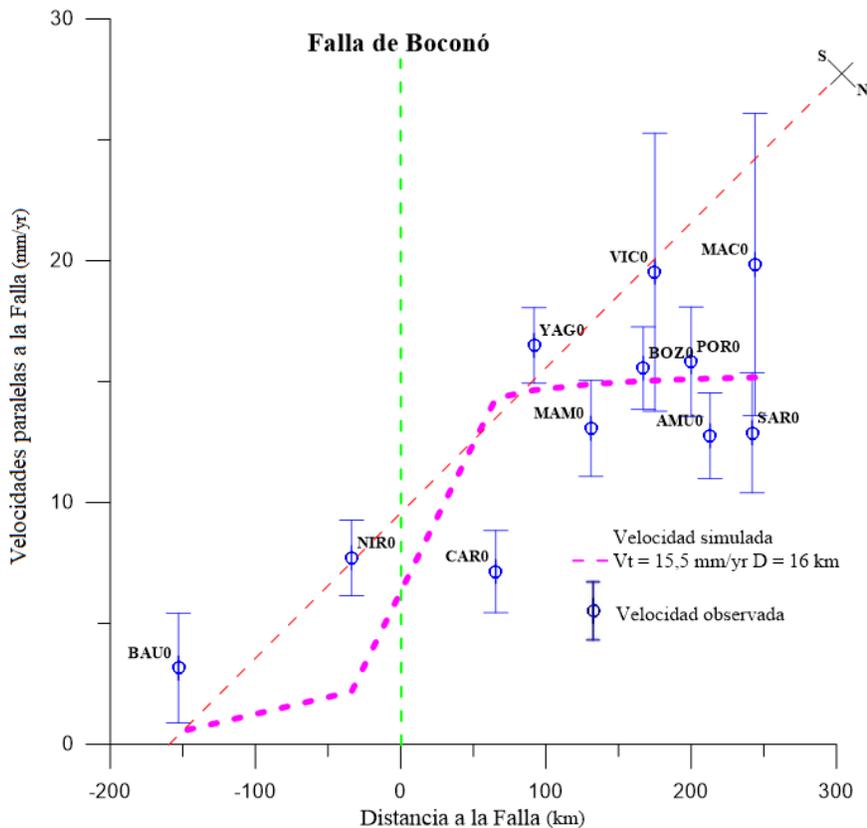


Figura 12. Curva arco-tangencial. Modelo de dislocación elástico simple para la falla de Boconó

CONCLUSIONES

El primer modelo de dislocación elástico simple construido para el sistema de fallas Oca-Ancón, presenta contradicciones teóricas para la profundidad de bloqueo y la velocidad de campo lejano. Sin embargo, es necesario profundizar en la evaluación y el estudio de estos resultados para encontrar el motivo por el cual se han generado, además de poder corroborar su validez.

Al normalizar las velocidades observadas empleando como referencia los datos obtenidos en el trabajo de Audemard et al (1996), se obtiene un ajuste matemático más preciso, aunque este resultado no representa el mejor ajuste geológico, por lo cual se restringe el intervalo de la profundidad de bloqueo y se obtiene un mejor ajuste geológico, al aplicar un análisis estadístico para comprobar la validez matemática del modelo, se obtiene una desviación del 3%, por lo cual se asume que estadísticamente y geológicamente el resultado es aceptable.

El sistema de fallas Oca-Ancón contribuye con aproximadamente el 7,5% (1,5 mm/año) de los 20 mm/año de desplazamiento lateral derecho entre la placa Caribe y la placa de América del sur, mientras que la falla Boconó contribuye con un 77,5% (15,5mm/año).

Se obtuvieron valores de K que representan una composición y reología muy variable. En la litología de superficie no se observa tal variabilidad, por lo cual existe la posibilidad que el cambio de propiedades en los materiales que conforman los bloques sea directamente proporcional a la profundidad. Sin embargo, se calculó un nuevo K que siguiera lo expuesto a nivel de superficie, donde la litología de los bloques norte y sur es similar. Obteniendo como resultado que el contraste de rigidez de un bloque respecto al otro es relativamente bajo, uno de los bloques es de 0,2 a 0,5 veces más rígido que el otro. Al considerar el coeficiente de asimetría K, se mejora el ajuste matemático en aproximadamente 30%, respecto a los resultados obtenidos en el modelo de dislocación elástico simple.

La profundidad de bloqueo estimada para el sistema de fallas Oca-Ancón coincide con los sismos asociados a los mecanismos focales 46, 48 y 59 del trabajo de Palma et al. (2010), donde se presenta una profundidad que varía entre 1,5 km y 13,7 km, además la gran nube de puntos sísmicos del occidente del país, muestra una transición entre la zona frágil y la zona dúctil menor a los 30 km de profundidad y según Ruff (2000), estos resultados están relacionados a una zona de desplazamiento lateral.

REFERENCIAS

- [1] Audemard M., F., Machette, M., Cox, J., Dart, R., & Haller, K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in*. Caracas, Venezuela; Denver, Colorado; San Luis, Argentina: U.S. Geological Survey.
- [2] Altamimi, Z., Métivier, L., & Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117.*

- [3] Altamimi, Z., Rebischung, L., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys.*
- [4] Audemard, F. (1993). *Néotectonique, Sismotectonique et Aléa Sismique du Nord-ouest du Vénézuéla (Système de failles d'Oca-Ancón)*. France: Ph.D. thesis, Montpellier II (U.S.T.L.).
- [5] Audemard, F. (1996). *Estudio de paleosismicidad en el sistema de fallas Oca-Ancón noroeste de Venezuela*. Tecnophysics.
- [6] Audemard, F. (2000). Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela. Caracas, Venezuela: Como parte del Programa Internacional de la Litósfera, Grupo de Trabajo II-2,.
- [7] Audemard, F., & Romero, G. (1993). *The Churuguara Area - Seismic Evidence of Contemporary Activity of the Oca-Ancón System*. Caracas: Venezuelan Foundation for Seismological Research (FUNVISIS).
- [8] Beltran, C. (1993). *Neotectonic Map of Venezuela, scale 1:2 000 000*,. Caracas: Funvisis.
- [9] Berrocoso, M., Sánchez, A., Pérez, A., Jigena, B., Fernández, J., & Páez, R. (2009). *SISTEMAS GNSS: Funcionamiento, Posicionamiento y Precisión*. Cadiz: Universidad de Cadiz Facultad de Ciencias Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía.
- [10] Bushman J. R. 1965. Geología del área de Barquisimeto, Venezuela. *Bol. Geol.*, Caracas, 6(11): 311 - 336.
- [11] Bushman J. R. 1967. Geología de la región entre Agua Blanca y San Carlos. *Bol. Geol.*, Caracas, 8(16): 311 - 336.
- [12] Camacho, A., M. Mijares y W. Scherer, 1989. Geología de la zona Sanare-Buena Vista, sector Agua Linda, estado Falcón, Venezuela, *Revista Geos*, Caracas 29: 18-24.
- [13] Chinnery, M. A. (1961). The deformation of the ground around surface faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 51, 355–372.
- [14] Dach, R., & Walser, P. (2013). Bernese GPS programa, Versión. 5.2. Astronomical Intitute, University of Bern.
- [15] Díaz de Gamero, M. L., 1977. Estratigrafía y micropaleontología del Oligoceno y Mioceno inferior del centro de la cuenca de Falcón, Venezuela, *GEOS*, 22: 2-50.

- [16] Drewes, H., Kaniuth, K., Stuber, K., Tremel, H., Kahle, H., Straub, C., . . . Wildermann, E. (1995). The Casa'93 GPS Campaign for crustal deformation research along the south Caribbean plate boundary. *J. Geodynamics* Vol. 20. No. 2, pp 129-144.
- [17] Eakins, P. (1987). Fault Geometry. En S. Stein, & M. Wyssession, *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure 2003* (págs. 217-219). Massachusetts: Blackwell Publishing.
- [18] Estey, L., & Meertens, C. (1999). *Unavco*. Obtenido de TEQC: The multi-purpose Toolkit for GPS/GLONASS/Galileo/SBAS/Beidou/QZSS/IRNSS Data:
<http://facility.unavco.org/programa/teqc/teqc.html>, accessed
- [19] Fiedler, G. (1961). *Areas Afectadas por Terremotos en Venezuela 1961*. Memoria del III Congreso Geológico Venezolano Vol: 3 . Obtenido de <http://www.sismicidad.ciens.ula.ve>
- [20] Funvisis. (1980). *Informe sobre el temblor ocurrido en Churuguara el 17 de noviembre de 1980*. Caracas.
- [21] Funvisis. (2013). Sismicidad Instrumental 1910-2013.
- [22] Caracas.Gaeta, A. (2011). *Modelo de interacción terremotos-volcanes: Flujo de fluidos en la corteza*. Trabajo especial de grado. Inédito. Concepción, Chile: Universidad de Concepción Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Física.
- [23] Google. (18 de Agosto de 2018). Google Earth Pro.
- [24] Guevara, E., 1967. The Santa Rita, Jarillal and La Victoria formations. *Asoc. Ven. Geol. Min. y Petr.* Boll Inform., 10(2): 51-69.
- [25] Heybroek, F., 1953. Geological report on the mountain range west of Block "B" (Eastern rim of the Cordillera Oriental, Táchira-Apure, western Venezuela). *Informe inédito* Shell/Corpoven: 59 p.
- [26] Hunter, V. F. y P. Bartok, 1974. The age and correlation of the Tertiary sediments of the Paraguaná Península, Venezuela. *Bol. Inf. Asoc. Venez. Geol. Min. y Petrol.*, 17: 143-154.
- [27] International Terrestrial Reference Frame. (10 de Mayo de 2018). *ITRF web site*. Obtenido de <http://itrf.ensg.ign.fr/>

- [28] Jolivet, R., Bürgmann, R., & Houlie, N. (2009). *Geodetic exploration of the elastic properties across and within the northern San Andreas Fault zone*. Elsevier Earth and Planetary Science Letters.
- [29] Kanamori, H., & Cipar, J. (1974). Fault geometry. En S. Stein, & M. Wyssession, *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure 2003* (págs. 217-219). Massachusetts: Blackwell Publishing.
- [30] Le Pichon, X., & Kreemer, C. (2005). *Asymmetry in elastic properties and the evolution of large continental strike-slip faults*. *J. Geophys. Res.*, 110, B03405, doi:10.1029/2004JB003343.
- [31] Leica Geosystems Inc. (1999). *Introducción al sistema GPS Leica*. Suiza: Copyright Leica.
- [32] Liddle, R. A., 1928. *The geology of Venezuela and Trinidad*, J. P. MacGowan; Fort Worth, Texas, 652 p.
- [33] Martín Bellizzia, C., 1961. Geología del Macizo de El Baúl, Estado Cojedes, *Bol. Geol. Publ. Esp.* N° 3, 4: 1453-1530.
- [34] Mora, H., Ordóñez, M., Trenkamp, R., Kellogg, J., & Freymueller, J. (2002). *Resultados del uso de geodesia satelital para estudios geodinámicos en Colombia*. Bogotá: Geofísica Colombiana.
- [35] Murray C. G. 1973. Estudios petrológicos de complejos ultramáficos zonados en Venezuela y Alaska. *Bol. Geol.*, Caracas, 12(22): 173 - 279.
- [36] Okada, Y. (1985). Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4.
- [37] Oxburgh E. E. 1965. Geología de la región oriental del estado Carabobo, Venezuela *Bol. Geol.*, Caracas, 11: 113 - 208. Versión en inglés: Geology and metamorphism of Cretaceous rocks in Eastern carabobo state, Venezuelan Coast Ranges. *Geol. Soc. Amer. Mem.* 98: 241 - 309. Trabajo especial de grado. Inédito. University of Princeton, 1960.
- [38] Palma, M., Audemard, F., & 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*, Vol. 33, N° 2, 108 - 121.

- [39] Pérez, O., Bilham, R., Bendick, R., Velandia, R., Hernández, N., Moncayo, C., . . . Kosuch, M. (2001). *Velocity field across the southern Caribbean plate boundary and estimates of Caribbean/South-American plate motion using GPS geodesy 1994-2000*. Geophys.
- [40] Pérez, O., Bilham, R., Sequera, M., Molina, L., Gavotti, P., Henry, C., . . . 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*. Caracas: Interciencia.
- [41] Reid, H. (1911). Elastic rebound theory. En D. Turcotte, & G. Schubert, *Geodynamics 2002* (págs. 350-355). Cambridge: The press syndicate of the University of Cambridge.
- [42] Reinoza, C. (2014). *Application de la géodésie satellitaire GNSS à haute résolution à la déformation de la marge Sud-Caraïbe. Implication pour l'aléa sismique dans l'Ouest et le Nord-Est du Venezuela*. Gières, Francia: Isterre (Institut Des Sciences De La Terre).
- [43] Reinoza, C., Audemard, F., Quintana, G., Pousse-Beltrán, L., Jouanne, F., López, R., & Moncada, J. (2017). *Aplicación de la Geodesia Espacial en el Estudio de Fallas Activas en Venezuela*. Caracas: Funvisis.
- [44] Ruff, L. J. (2000). *The Seismogenic Zone*. Michigan: University of Michigan Dept. of Geological Sciences.
- [45] Savage, J. (1990). *Equivalent strike-slip earthquake cycles in half-space and lithosphere-asthenosphere earth models*. J. Geophys.
- [46] Savage, J. C. (2006). *Dislocation pileup as a representation of strain accumulation on strike-slip fault*. J. Geophys.
- [47] Savage, J., & Burford, R. (1973). Geodetic determination of relative plate motion in central California, J. Geophys.
- [48] Segall, P. (2010). *Earthquake and Volcano Deformation*. New Jersey: Princeton University Press.
- [49] Senn, A., 1935 Die stratigraphische Verhreibung der Tertiären Orbitoiden, mit spezieller Berücksichtigung ihres Vorkommens in Nord-Venezuela und Nord- Marokko. *Eclog. Geol. Helv.*(1): 51-113 y 369-373.

- [50] Smith, B., Sandwell, D., & Shearer, P. (2011). *Locking depths estimated from geodesy and seismology along the San Andreas Fault System: Implications for seismic moment release*. Journal of Geophysical Research.
- [51] Stein, S., & Wysession, M. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Massachusetts: Blackwell Publishing.
- [52] Stéphan, J., B. Mercier De Lépinay, E., & M. Tardy, C. (1990). *Paleo-geodynamic maps of the Caribbean*. Société Géologique de France.
- [53] Sutton, F. A., 1946. Geology of Maracaibo Basin, Venezuela. *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, 30(10): 1621-1741.
- [54] Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2010). *Ciencias de la Tierra una introducción a la geología física*. Madrid: Uned Pearson.
- [55] Turcotte, D., & Schubert, G. (2002). *Geodynamics*. Cambridge: The syndicate of the University of Cambridge.
- [56] UNAVCO. (1 de Abril de 2018). *Plate Motion Calculator*. Obtenido de <https://www.unavco.org/programa/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>
- [57] Von Der Osten y D. Zozaya, 1957. Geología de la parte Suroreste del Estado Lara, Región de Quibor (Carta 2308), *Bol. Geol.* 4(9): 3-53.
- [58] Weertman, J., & Weertman, J. (1964). *Elementary Dislocation Theory*. New York: Macmillan.
- [59] Wheeler, 1960. Estratigrafía del Oligoceno y Mioceno inferior de Falcón occidental y nororiental, *III Congr. Geol. Venez., Mem.*, 1: 407-465.