

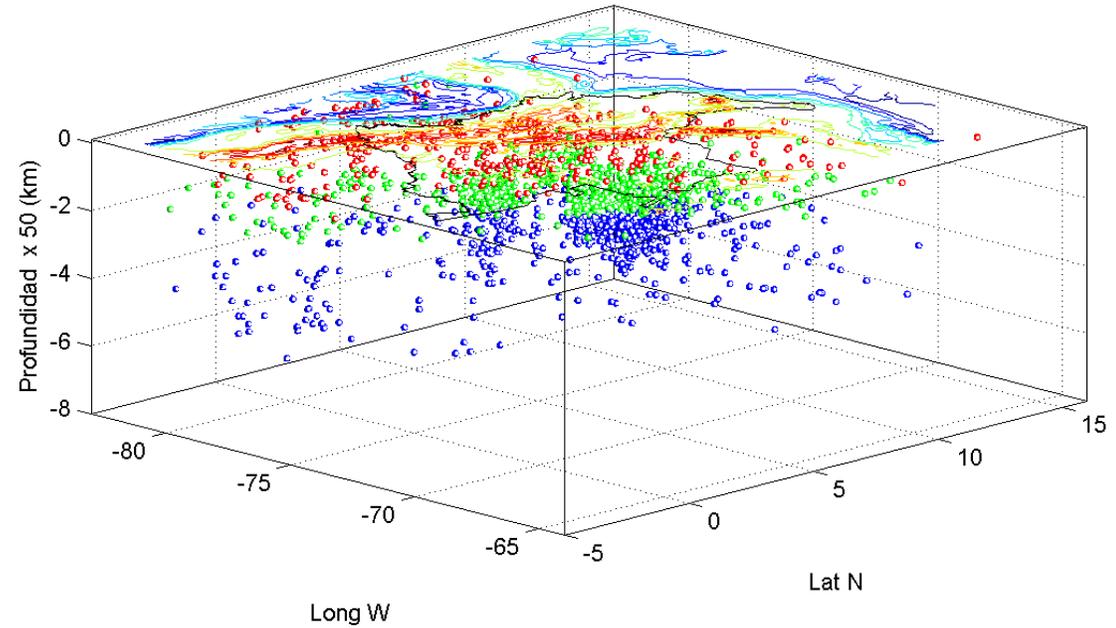
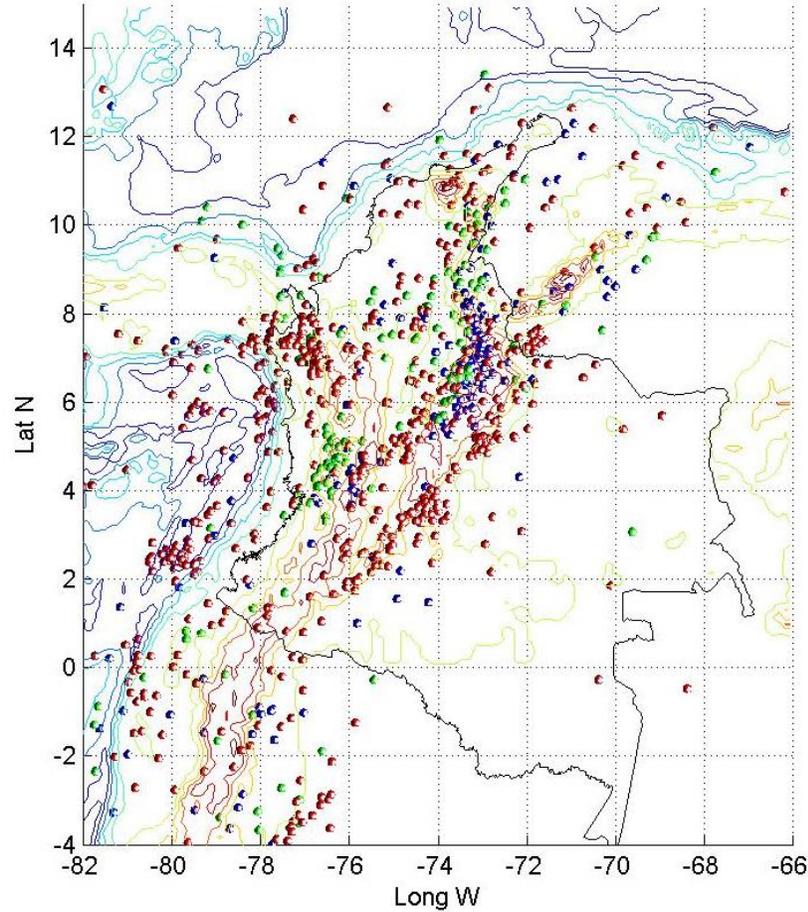
EL SISMO DE ARMENIA (COLOMBIA) DEL 25 DE ENERO DE 1999:

Un análisis Telesísmico de Ondas de Cuerpo,
observaciones de campo
y aspectos Sismotectónicos

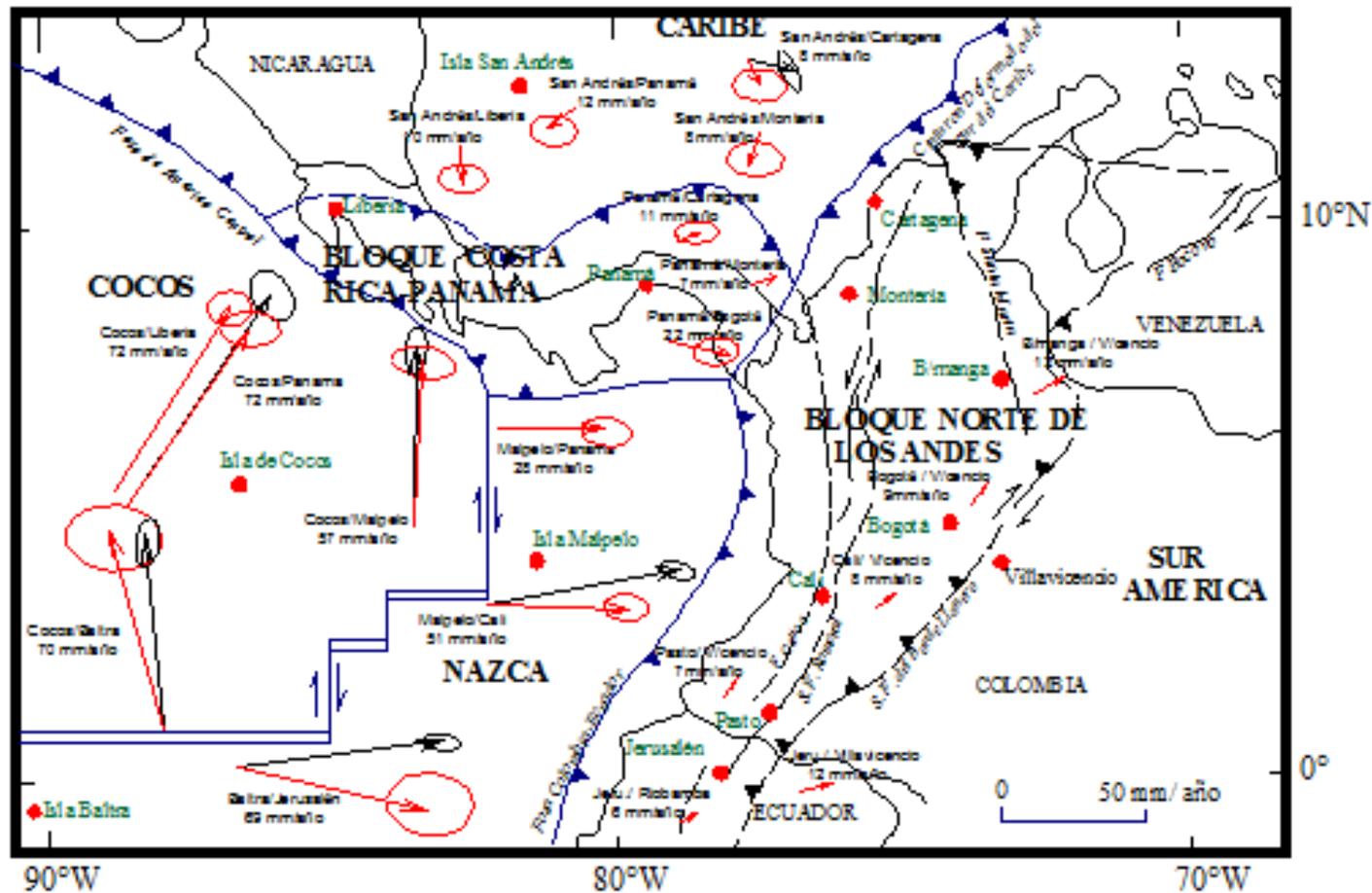


HUGO MONSALVE JARAMILLO
M.C Sismología y Física del Interior de la Tierra

SISMICIDAD DE COLOMBIA 1993- 2019



MARCO TECTÓNICO



(Mora, 1995)

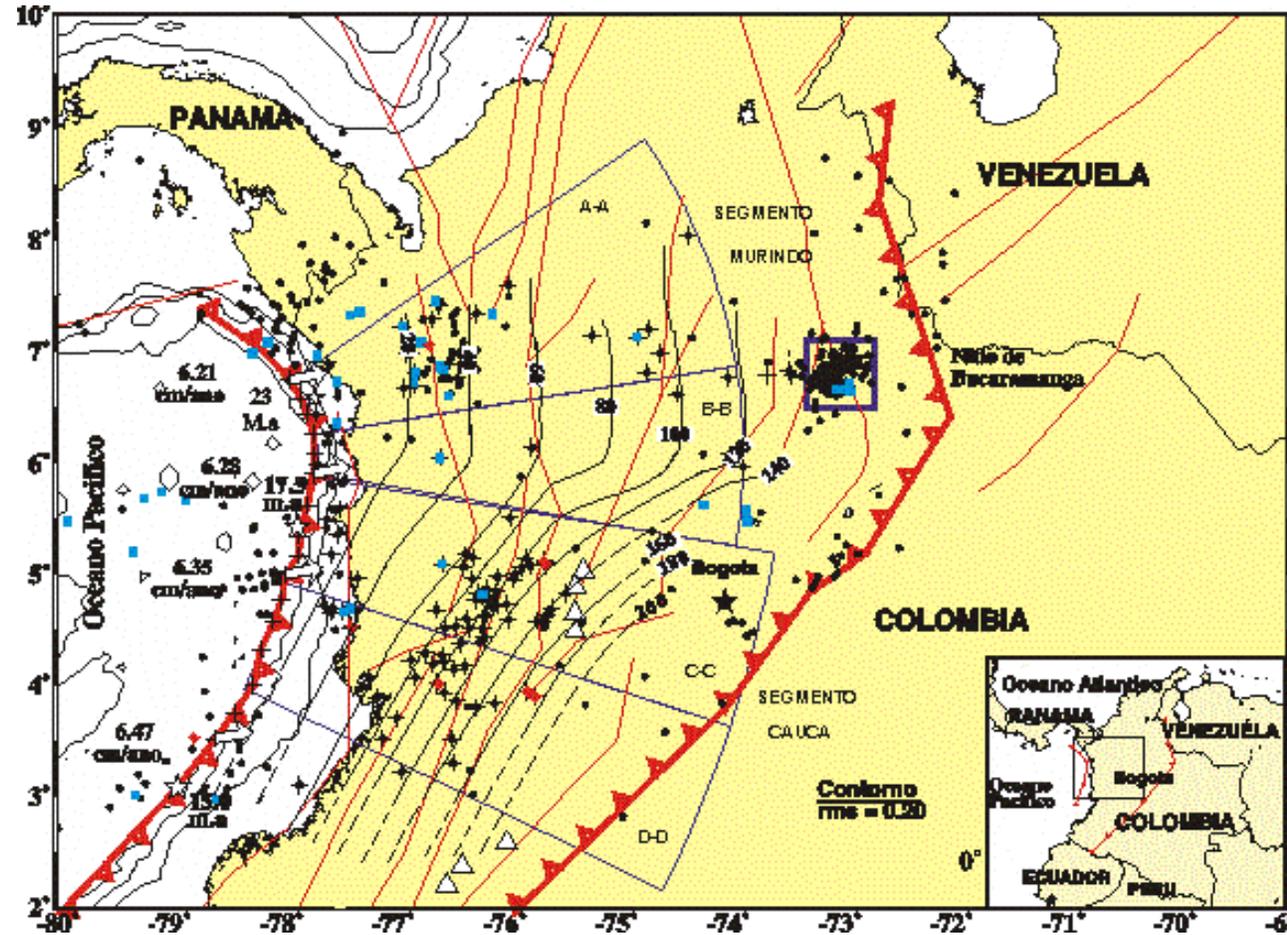
MARCO TECTÓNICO

- **El nor-occidente de los Andes es una región sometido a la triple unión entre las placas Nazca, Sur América y Caribe referido como el Bloque Norte de los Andes (Kellog y Vega,1995)**
- **Los datos sísmicos del norte de los Andes muestran que la convergencia E-W de Nazca y Sur America porción del sur la convergencia E-W de las placas Nazca y America del sur induce un régimen de tensión lateral derecha que afectan las fallas que delimitan de la cordillera oriental al sur de 4°N (Ego et al., 1996).**
- **Al norte de 4°N está bajo la influencia de la placa Caribe (Cortes, 2004).**

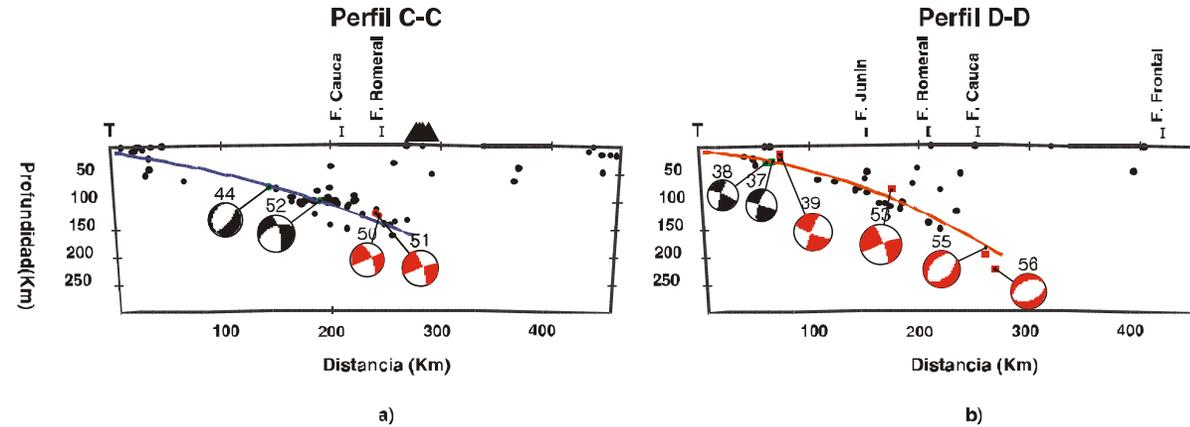
GEOLOGIA REGIONAL

- **Los Andes colombianos son el resultado de procesos de obducción y subducción y colisión en la margen occidental de Colombia desde el Precámbrico (Restrepo-Pace, 1995)**
- **Se desarrollaron tres cordilleras limitadas por la falla Guaycaramo y las planicies del escudo de las Guyanas (Restrepo-Pace, 1996)**
- **La cordillera central y la oriental está compuesta de rocas metamórficas.**
- **El vulcanismo es el resultado de la subducción el jurásico y el cretáceo.**
- **El levantamiento de la cordillera central empezó en cretáceo tardío como consecuencia de la acresión de la cordillera occidental (Gómez et al., 2003)**

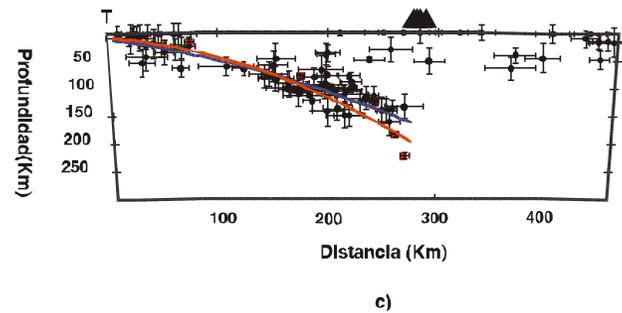
SISMOTECTÓNICA DEL NOR-OCCIDENTE



PERFIL DE LA PLACA- Secciones Hipocentrales

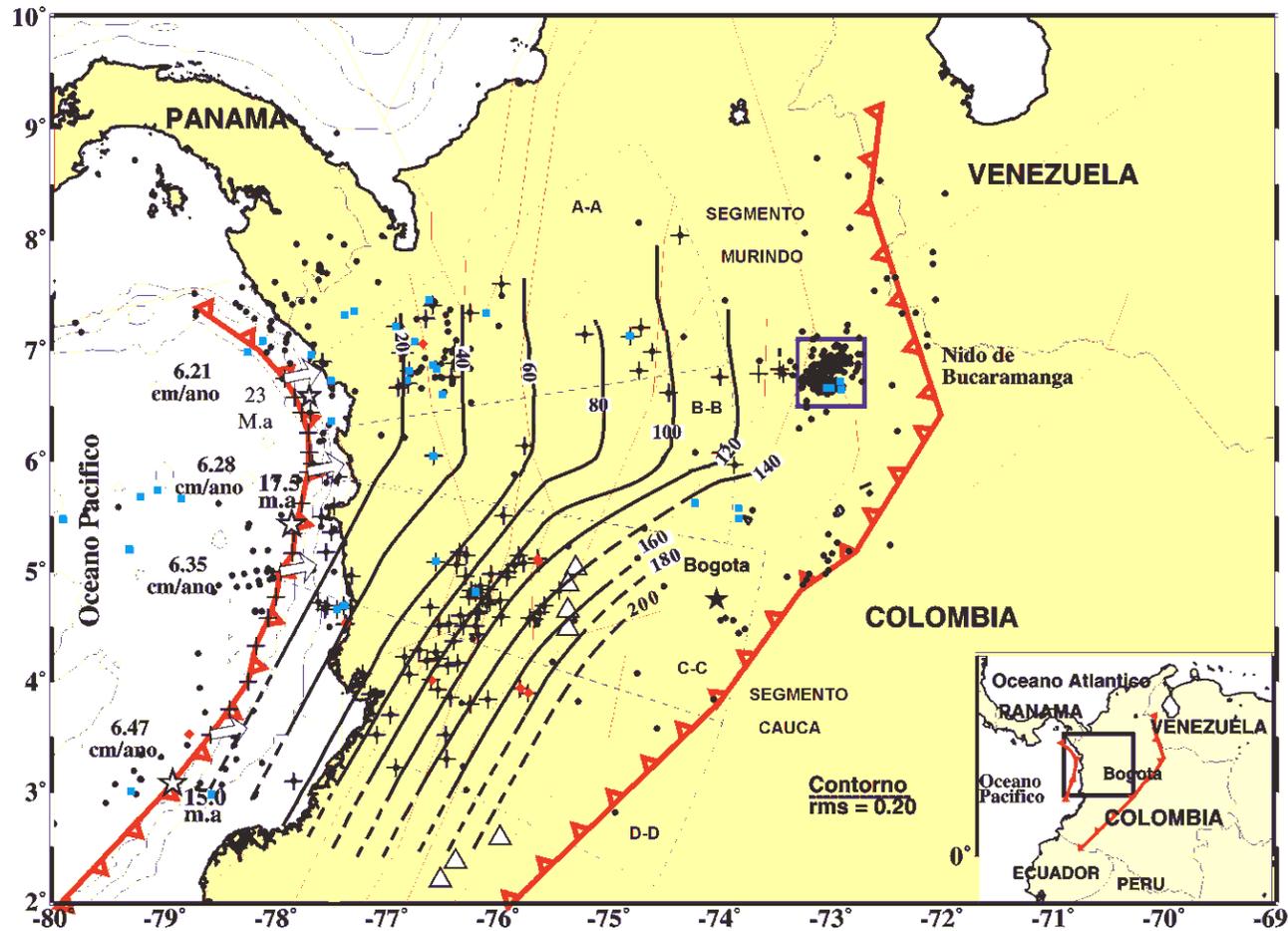


Perfil Segmento Cauca

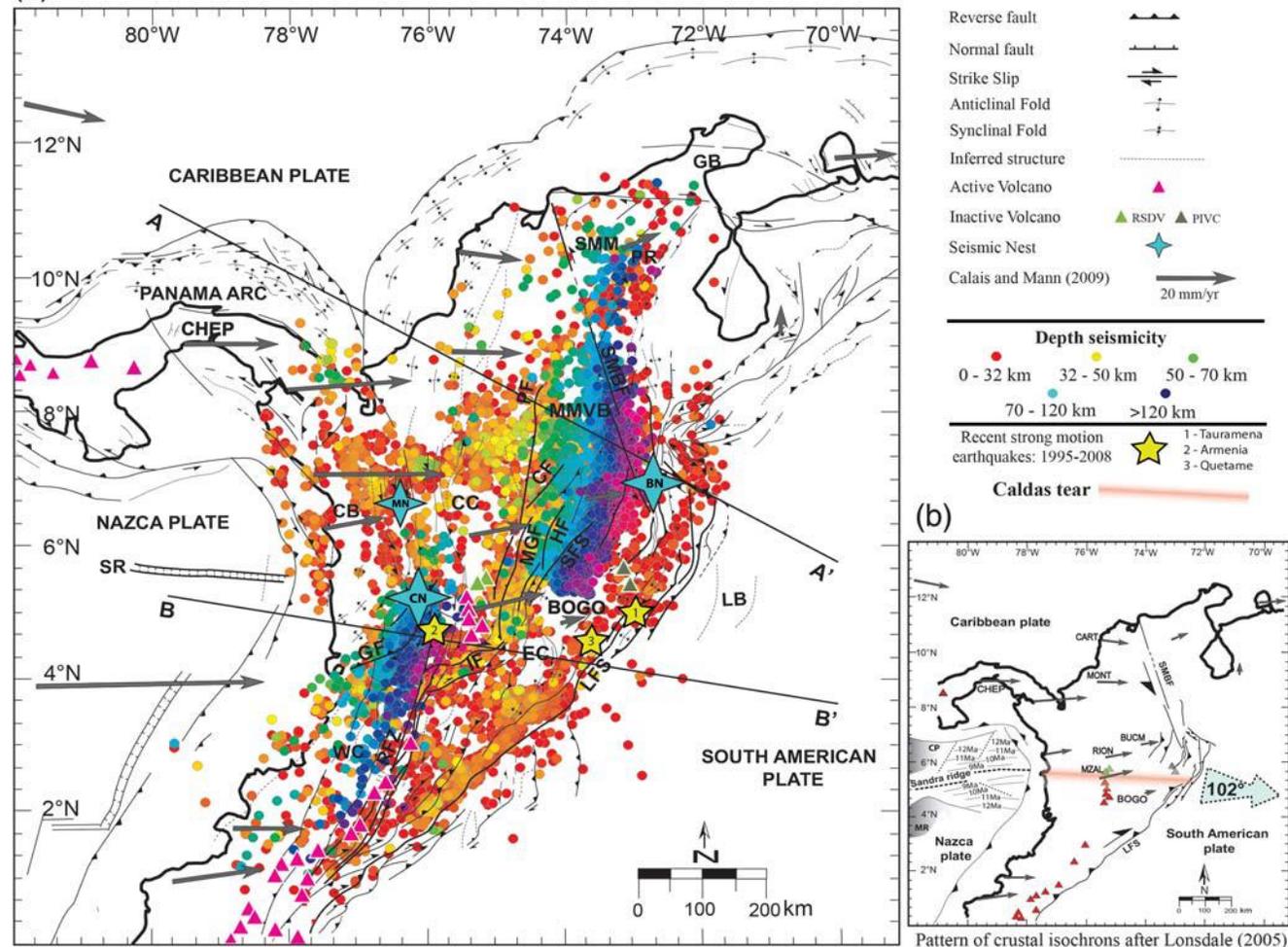


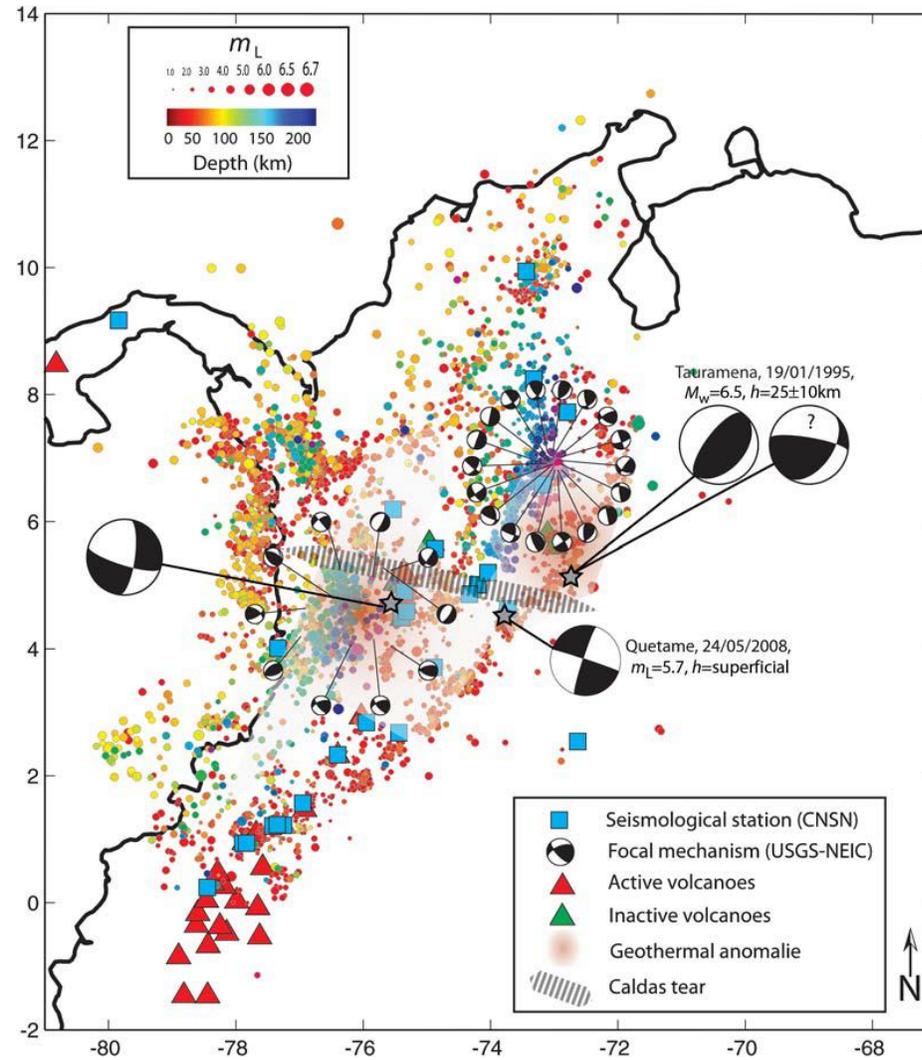
Monsalve (1998)

CONTORNO DE LA PLACA NAZCA

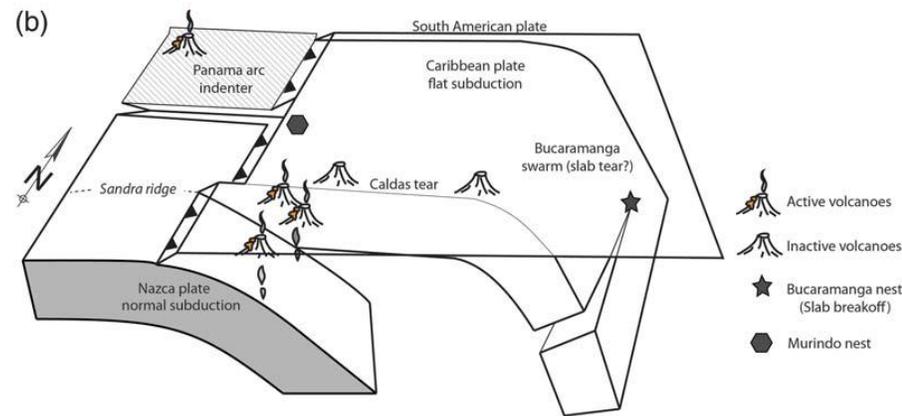
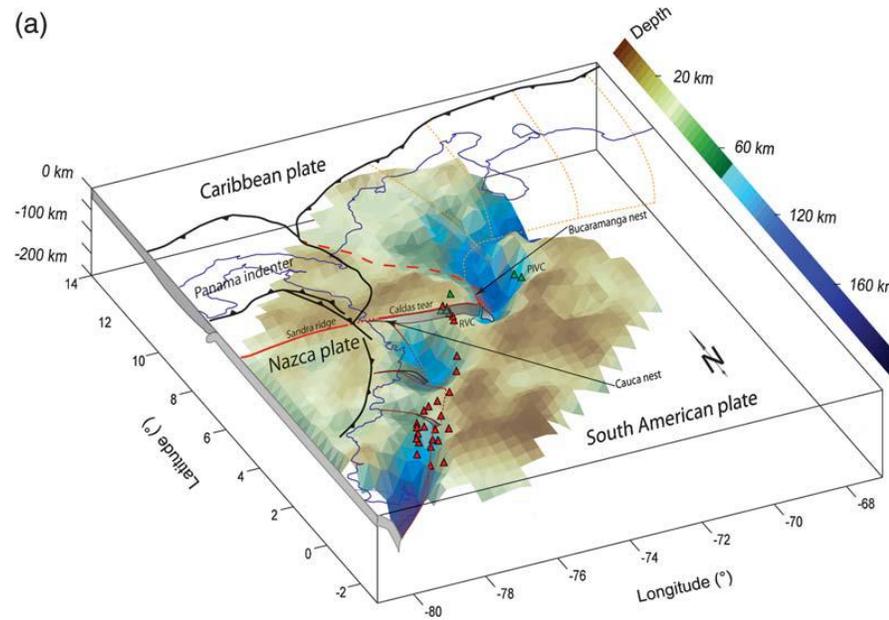


MARCO TECTÓNICO (Vargas and Mann (2013))





Vargas and Mann (2013)



Vargas and Mann (2013)

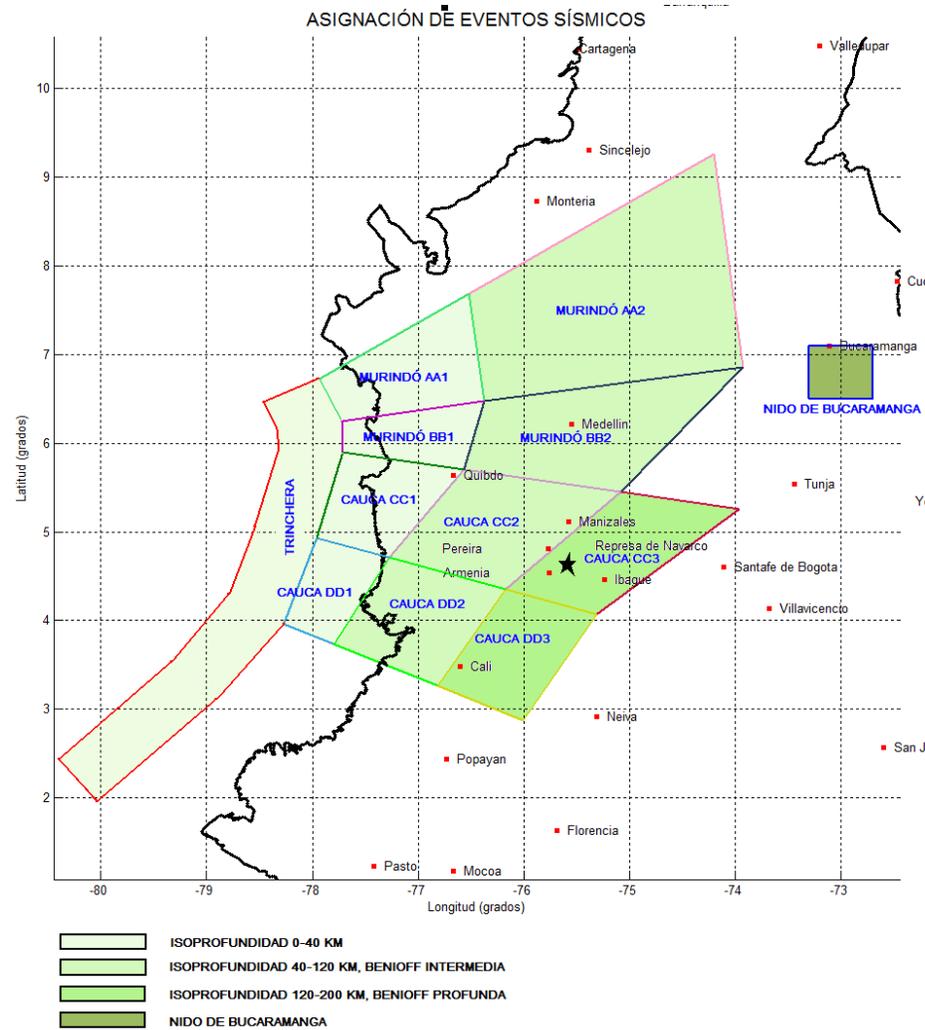
DISCUSIÓN “CALDAS TEAR”

- En 1998 se discutía que a los 5.5°N había un alabeo de la placa en 5.5°N, Vargas y Mann (2013) demostraron la presencia de una fractura en la placa Nazca, apoyado por evidencias:
- una ruptura E-W de 240 km en la corteza E-W a una tasa de 24 mm /año, sugiere la edad de iniciación de la colisión de Panamá con el nor-occidente de sur américa hace 10 Ma.
- Las adakitas a lo largo de la ruptura Caldas coincide con los volcanes extintos de composición adakitica, el sistema de aguas termales de Paipa-iza (1.9-2.5 Ma), y los volcanes romeral y san Diego.

DISCUSIÓN “ CALDAS TEAR “

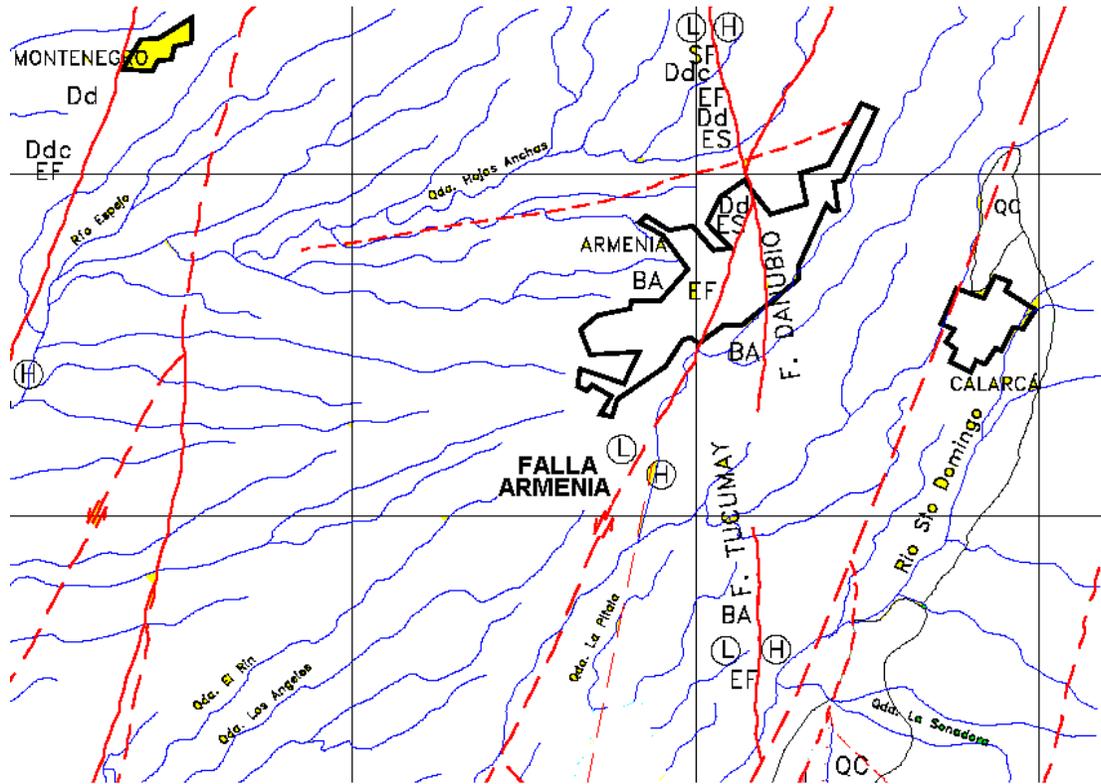
- Evidencia de depósitos de minerales e hidrocarburos. La Mina de Condoto, Marmato,, Quinchía, La colosa, estas se disponen paralelos con la ruptura de caldas.
- El comportamiento hidráulico de los ríos Magdalena y Cauca que van de sur a norte después de 200 km de recorrido se estrechan y generan rápidos al pasar por la falla “caldas tear”.

MODELO SISMOTECTONICO SUBDUCCION

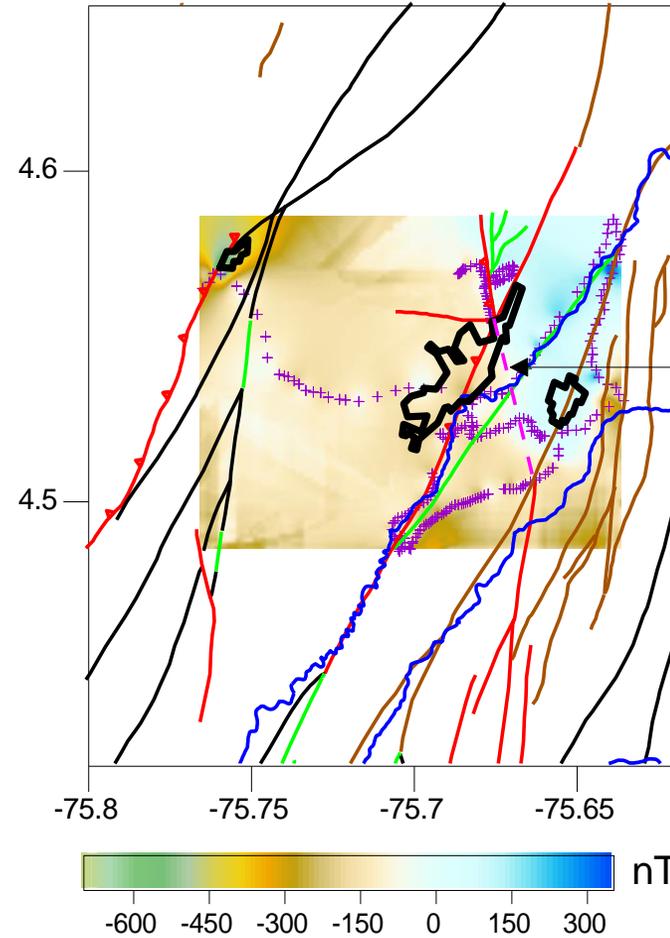


Monsalve, (1998)

TECTÓNICA LOCAL



$5.1 \leq M_w \leq 5.9$

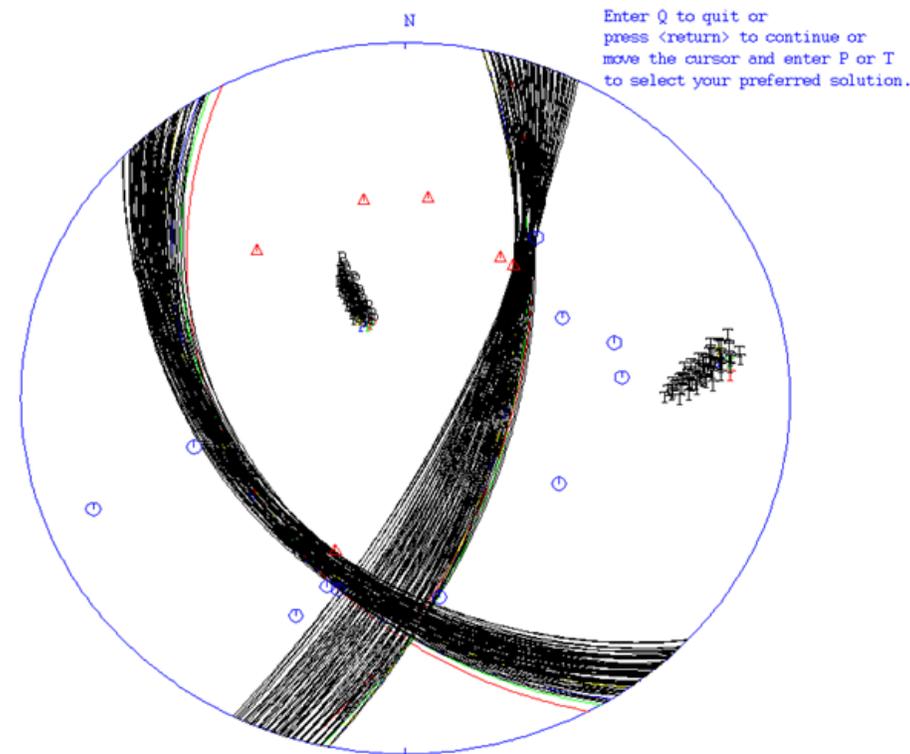


TECTÓNICA LOCAL

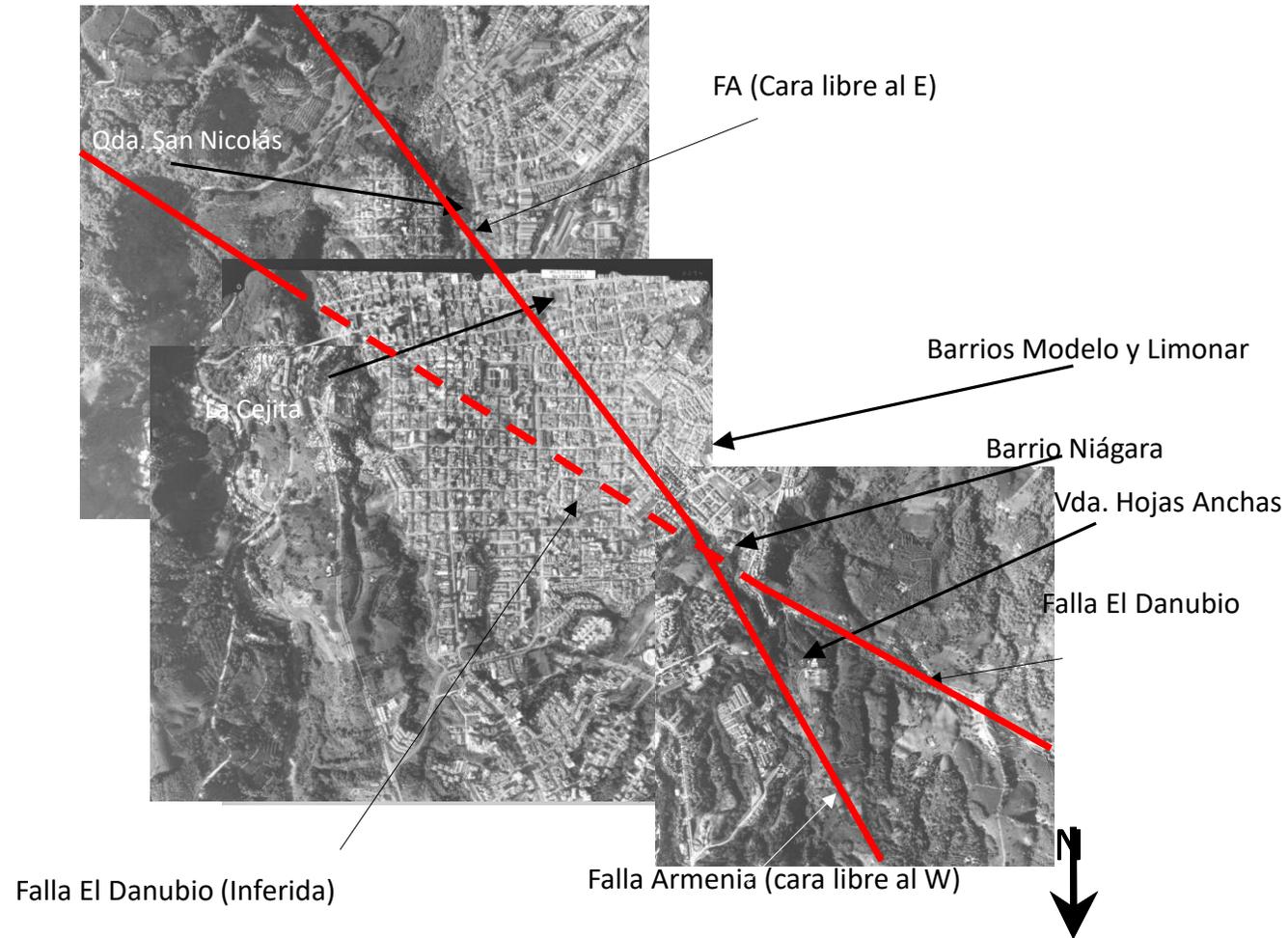


Vila et al, 2019

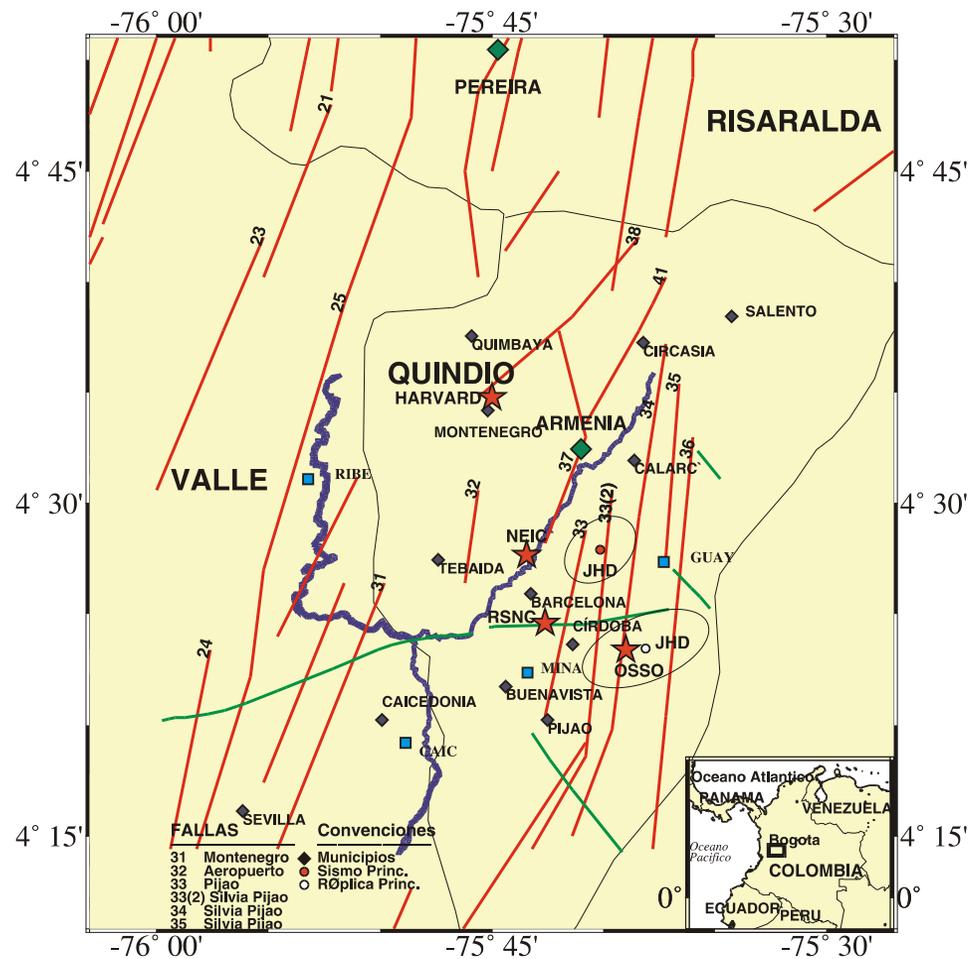
SIR	DIP	RAK	Source
12	61	-64	
13	59	-63	
15	59	-63	
12	61	-61	
13	59	-61	
14	58	-60	
13	63	-62	
14	61	-61	
15	59	-61	
15	63	-62	



Monsalve et al, 2019



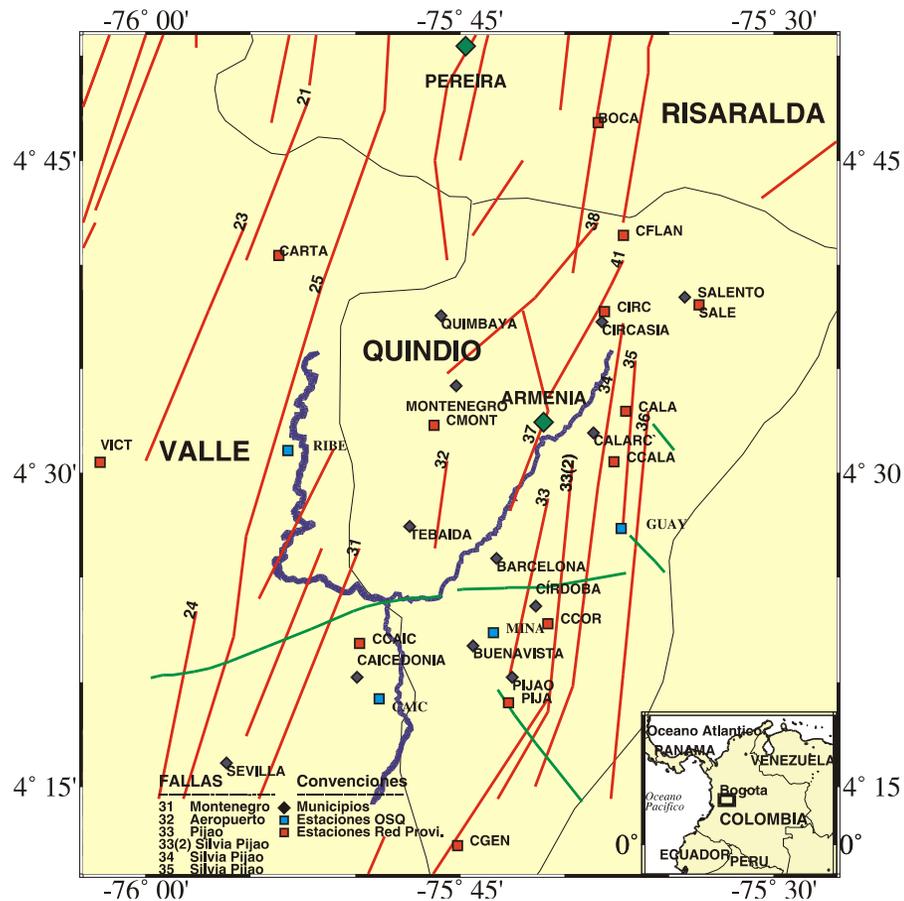
LOCALIZACIÓN SISMO DE ARMENIA



Monsalve, (2001)

INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

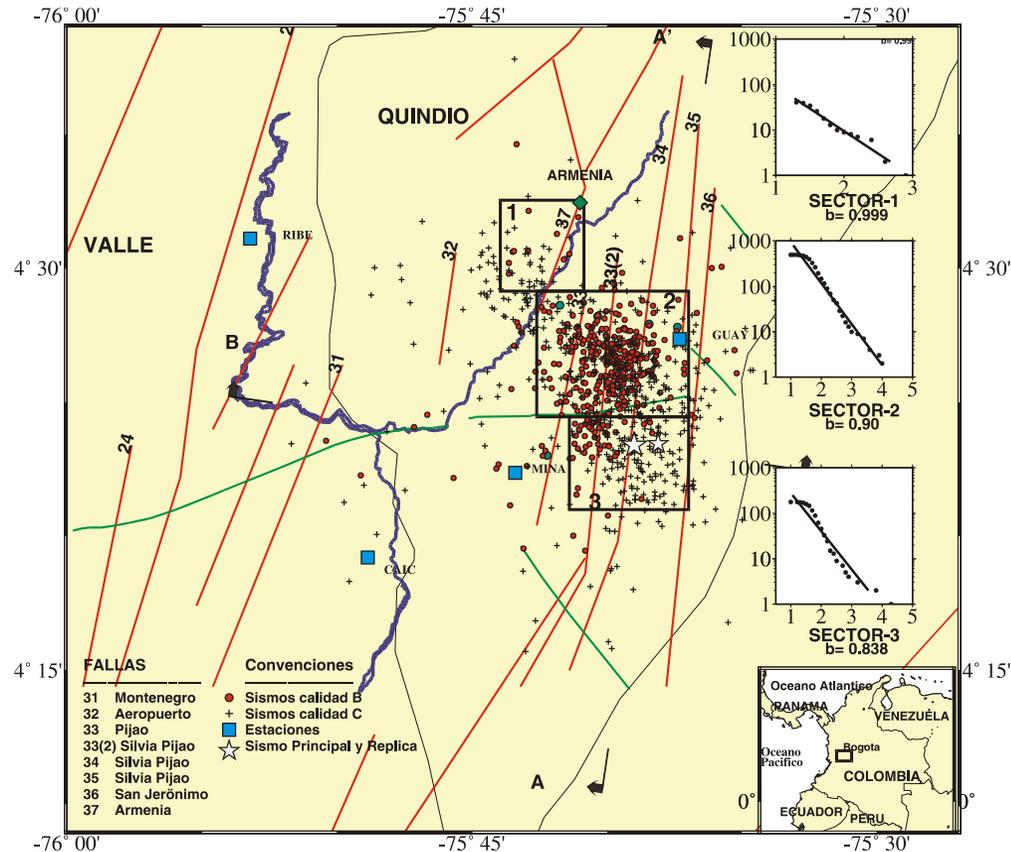
SISMO DE ARMENIA



Monsalve, (2001)

La red sismológica provisional estuvo conformada básicamente por cuatro tipos de instrumentos: acelerógrafos digitales de tres componentes, sismógrafos portátiles de una componente (vertical), sismógrafos telemétricos de una componente (vertical) y sismógrafos digitales portátiles de tres componentes. *Gil et al (1999)*.

RELACIÓN EMPÍRICA FRECUENCIA-MAGNITUD



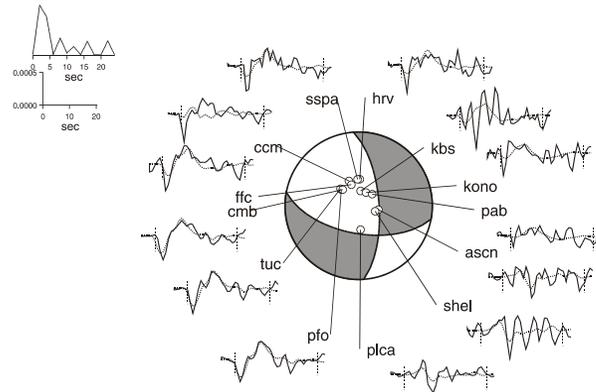
Monsalve, (2001)

La ecuación de Richter $\log N = a - bM$ es una relación empírica de frecuencias-magnitudes.

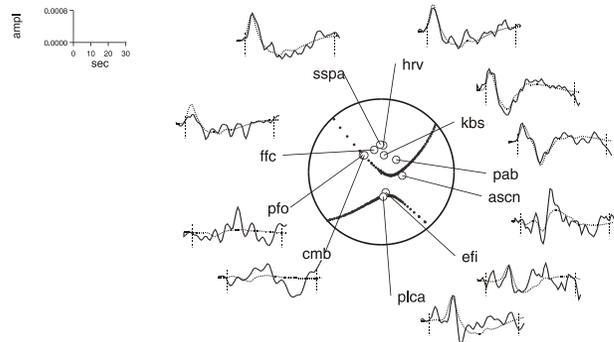
- El parámetro b refleja la actividad sísmica de una región.
- La expresión o interpretación de esa actividad va relacionada con el campo de esfuerzos, ya que se sabe que la acumulación de esfuerzos en una zona depende de qué tan continua sea la sismicidad en la región.
- A mayor recurrencia sísmica, la energía confinada en el material sólido tendrá un proceso gradual de liberación y por tanto será menor la acumulación de esfuerzos en la zona y viceversa.

MECANISMO FOCAL SISMO ARMENIA 1999

SISMO 25-01-99 18:19 UT



ONDA P



ONDA SH

Monsalve, (2001)

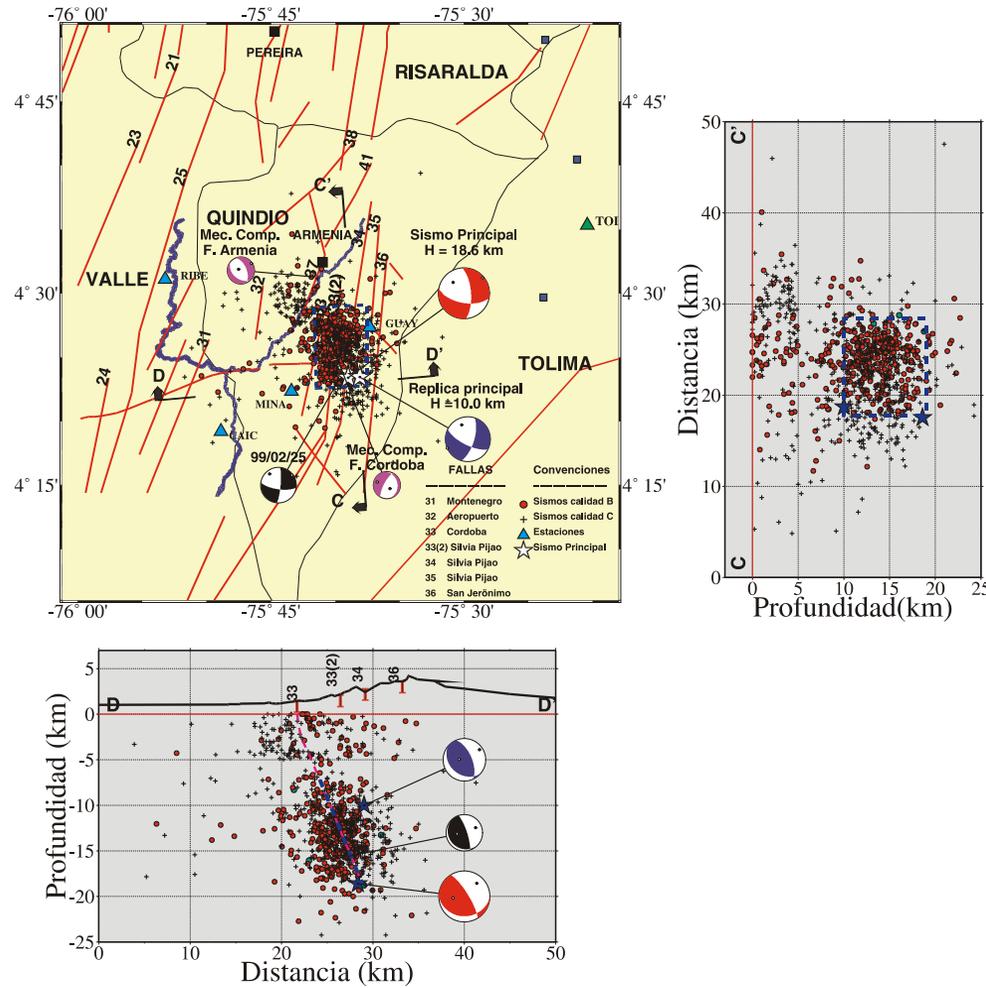
Resultados de la inversión. ϕ = azimuth (strike), δ = buzamiento (dip), λ = deslizamiento (slip).

EVENTO	INVER.	MECANISMO			H km	M_0 dina-cm	M_W	Duración s
		ϕ	δ	λ				
Principal 18:19:16.9	CMT	8°	65°	-21°	27.7	2.01e25	6.1	7.3
	NABELEK	356°	67.3°	-33.8°	18.6	2.1e25	6.2	6.0
Replica 22:40:16.5	CMT	17°	67°	-23°	38.3	2.07e24	5.5	2.0

Las principales características de la técnica utilizada en la inversión son [Nábelek, 1984]:

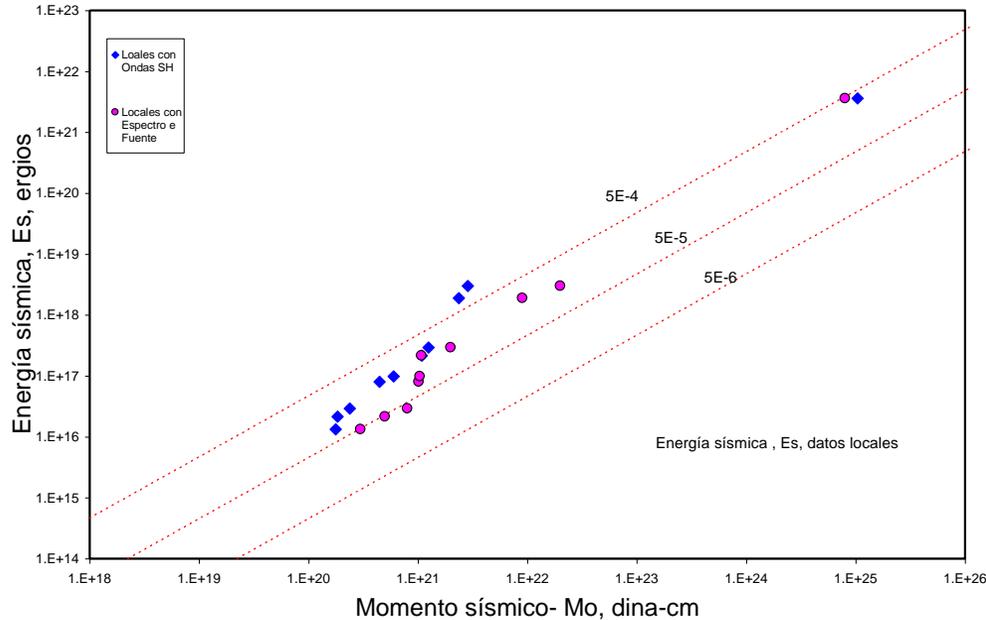
- a) El método es aplicable a ondas P y S
- b) Una inversión no lineal del centroide de profundidad.
- c) Mejoramiento de la función del tiempo de la fuente.
- d) Determinación del centroide con respecto al punto de nucleación.
- d) Determinación del mecanismo focal y el momento tensor o doble par.

ÁREA DE RUPTURA



Monsalve, (2001)

ENERGÍA SÍSMICA RADIADA



Singh and Ordaz, (1994)

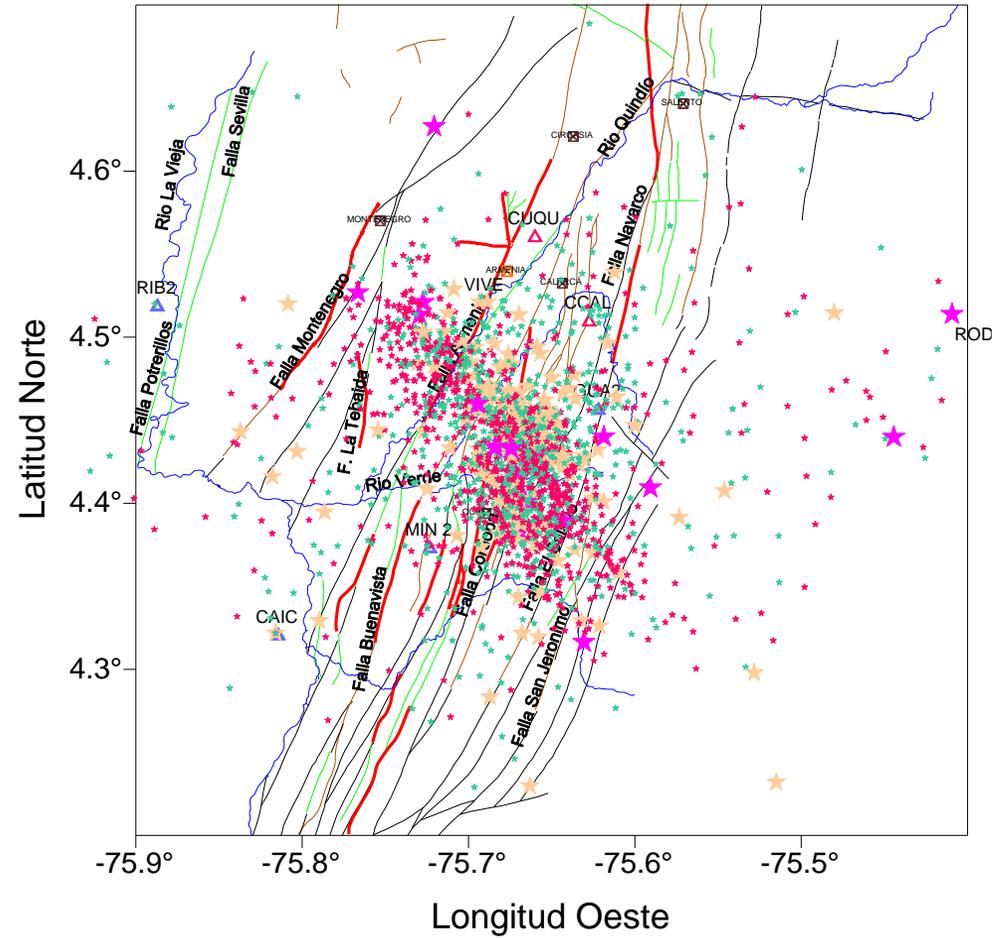
Respecto al valor del factor de calidad $Q(f)$ se tomó $Q(f) = 157 f^{1.0}$, que es soportado en el estudio realizado por Vargas(1999), para $f > 0.2$ Hz, que describe adecuadamente el decaimiento espectral del movimiento fuerte en el eje cafetero colombiano.

Partiendo de la obtención de la energía radiada por medio de la ecuación, *kanamori et al (1993)*:

$$E_s = \frac{4\pi R^2 [G^2(R) / R^2] \rho \beta}{F_s^2} \left[2 \int_0^\infty [V_N^2(f) + V_E^2(f) + V_Z^2(f)] e^{\frac{2\pi f R}{\beta Q(f)}} df \right]$$

Donde se ignora el aporte de energía de la onda P, debido a que ésta solo representa el 4% de la energía total liberada en el sismo. Igualmente se asume que es válida la aproximación de fuente puntual, lo mismo que se ignora el patron de radiación y los efectos de directividad

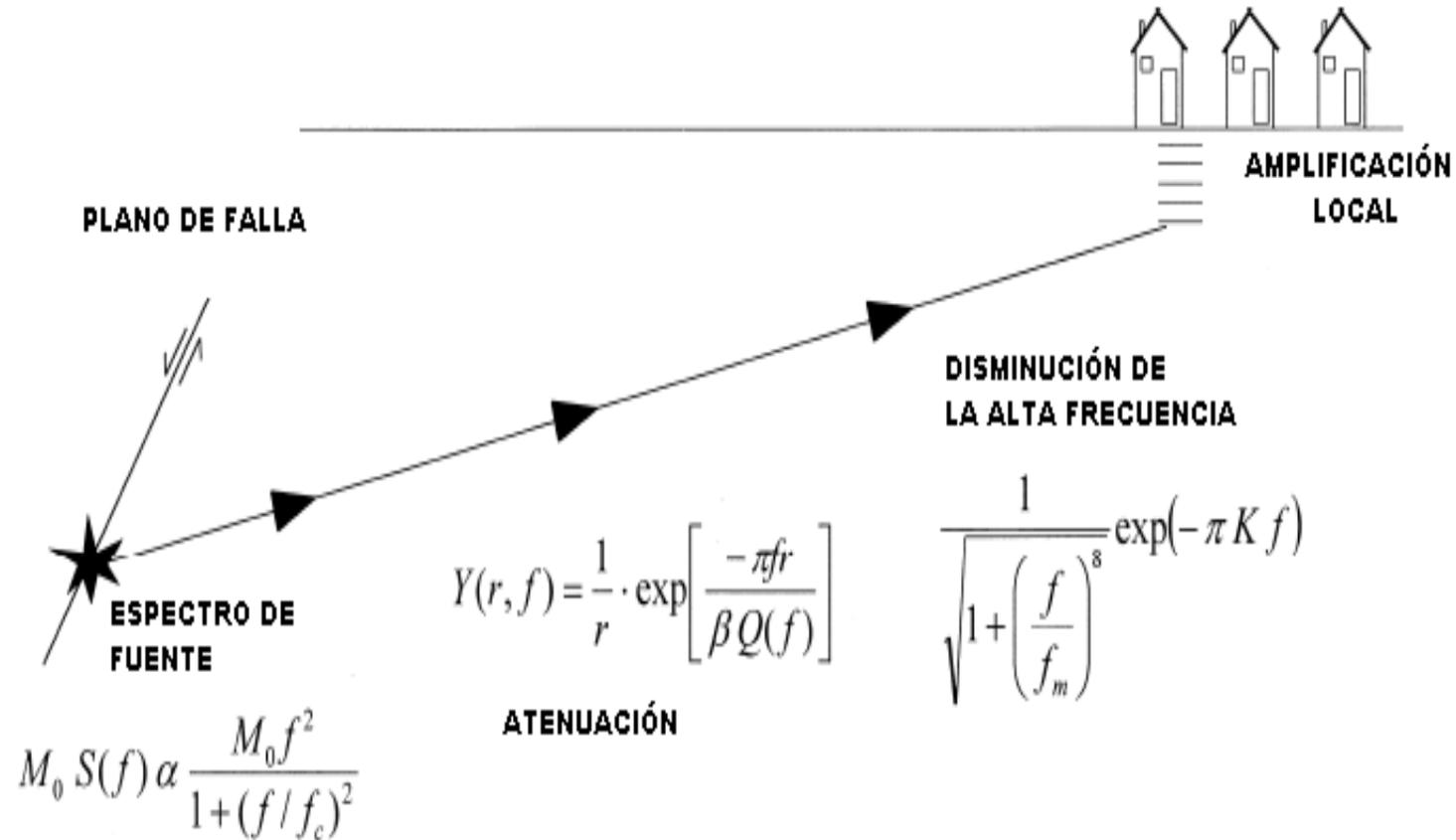
SISMOS 1993-2019



DISCUSIÓN

El potencial sísmico del sistema de fallas Silvia-Pijao mostró con toda sus evidencias, que el rango de magnitudes $6.1 \leq M_w \leq 6.9$, establecido por *Guzman et al (1998)* nos muestra que esta posibilidad debe ser tomada en cuenta en el futuro, para la evaluación de la amenaza sísmica y la incidencia que tiene el campo cercano para esta región.

Se encontró con la inversión de forma de onda y con la distribución de réplicas, que la ruptura se inició en el sureste (y la ruptura viajó hacia el Noroeste con un azimuth de $356^\circ \pm 10^\circ$, patron geomorfológico del sistema de fallas Silvia-Pijao y siguiendo la distribución de réplicas .



ESPECTRO DE AMPLITUDES DE FOURIER EAF

$$A(M_0, R, f) = E(M_0, f) D(R, f) P(f) I(f)$$

Modelo de fuente finita Campo cercano

$$(A(f))^2 = 4R\theta\phi^2 \cdot C^2 \cdot (M_0 f_c^2)^2 \cdot \frac{e^{\left(-2\pi\left(k_1 + \frac{R}{Q_1}\right)f\right)}}{(r_0)^2} \cdot \left[E1(\alpha \cdot R_0) - E1\left[\alpha \cdot \sqrt{(r_0^2 + R_0^2)}\right] \right]$$

Modelo de fuente de campo lejano

$$A(f, R) = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot R\theta\phi \cdot C \cdot \frac{M_0 f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \frac{e^{\left(\frac{-\pi f R}{\beta Q_0 f^\varepsilon}\right)}}{\sqrt{R \cdot R_x}} \cdot e^{\left(-\pi\left(k_1 + \frac{R}{Q_1}\right)f\right)}$$

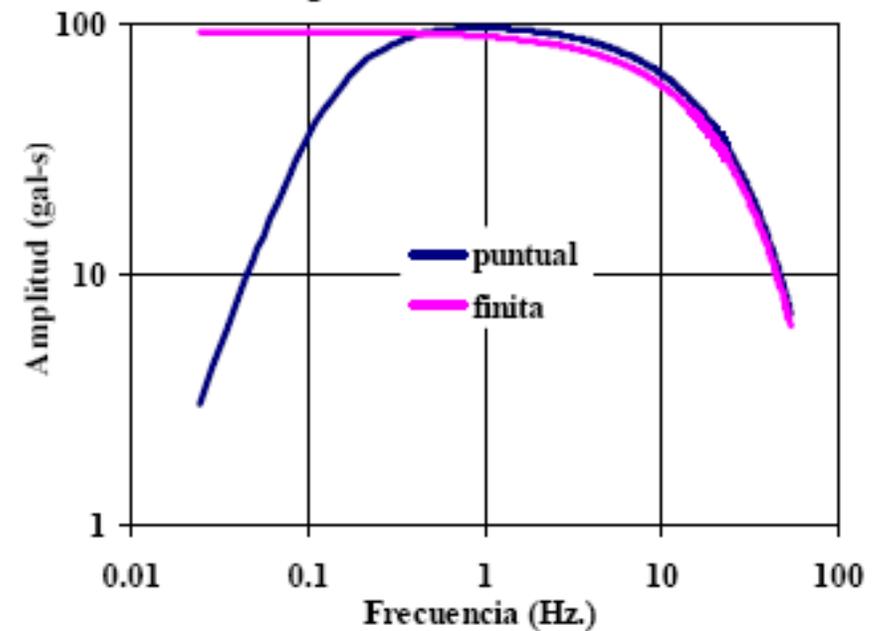
Gallego y Ordaz (2002)

$R_x, f, R, R\vartheta\phi, \rho, \beta$.

$$M_0 = 10^{(1.5 \times (M_w + 10.73))}$$

$$f_0 = 4.9 \times 10^6 \beta_s \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3}$$

Q_0, ϵ, Q_1, k_1



ZONA	Q1	ϵ	Q0	$R\theta\phi$	K1	$\Delta\sigma$
Activa	1754.23	1.37	231.59	0.60	0.0148	143.42
Subducción	2447.74	1.44	255.70	0.59	0.0150	288.42

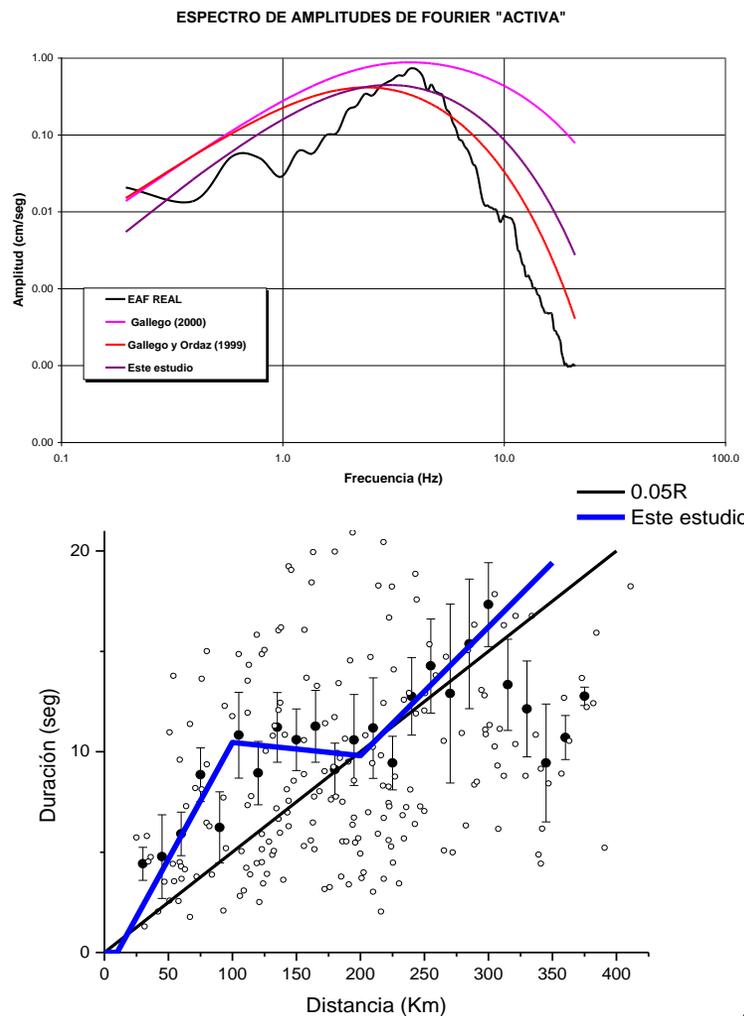
Gallego y Ordaz (2002)

EAF PARA CAMPO LEJANO

$$A(f, R) = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot R\theta\phi \cdot C \cdot \frac{M_0 f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \frac{e^{\left(\frac{-\pi fR}{\beta Q_0 f \mathcal{E}}\right)}}{\sqrt{R \cdot Rx}} \cdot e^{\left(-\pi \left(k_1 + \frac{R}{Q_1}\right) f\right)}$$

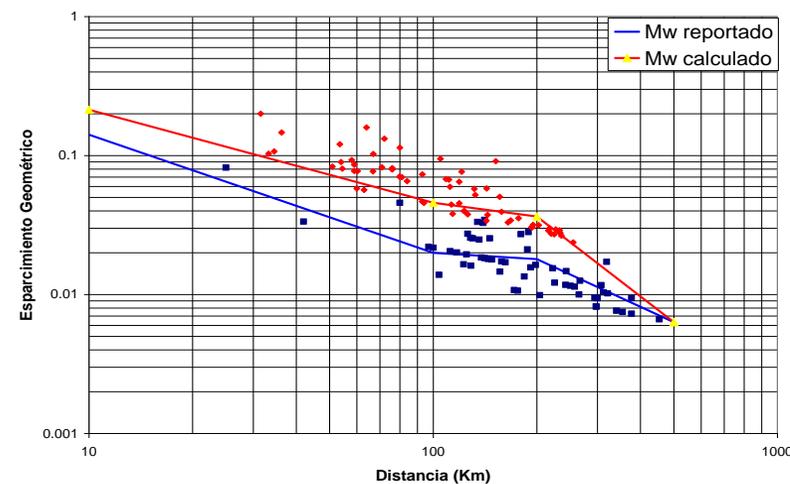
Gallego y Ordaz (2002)

Función de Duración



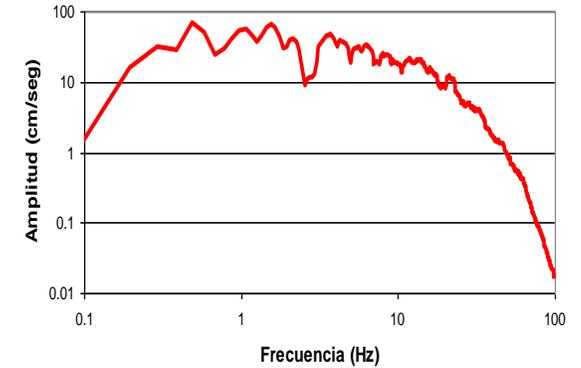
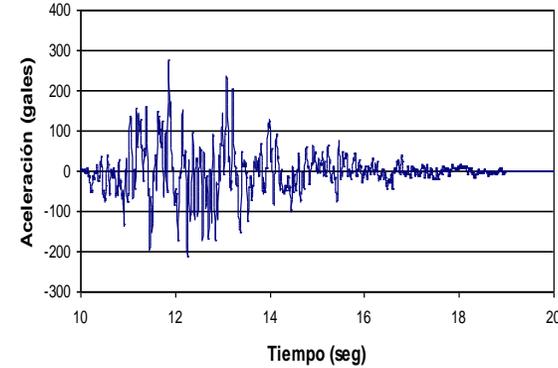
ESPARCIMIENTO GEOMÉTRICO

Sismo Semilla	Semilla Mw.	Dist. Epicentral (Km.)	Profundidad (Km.)	Simulación1 Mw.
Sismo de Calima Febrero 8 - 1995	6.4	129.76	102	6.8
Sismo Armenia Enero 25 - 1999	6.2	37.65	18.6	6.7

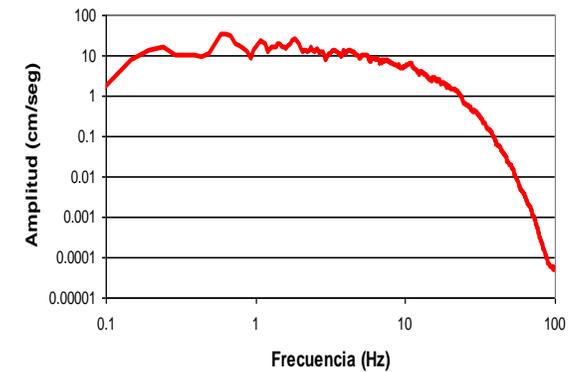
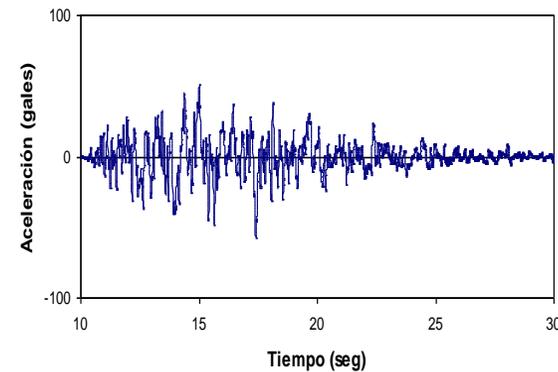


Aldana et al (2006)

SIMULACIÓN ESPECTROS DE FASE

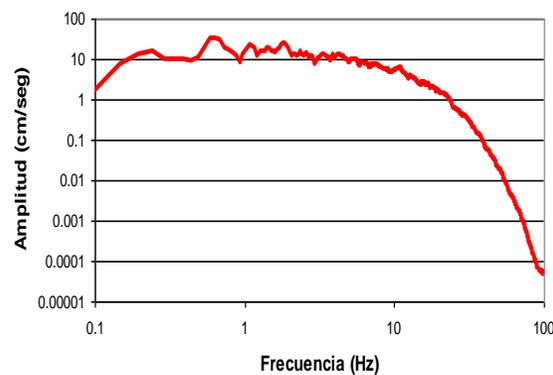
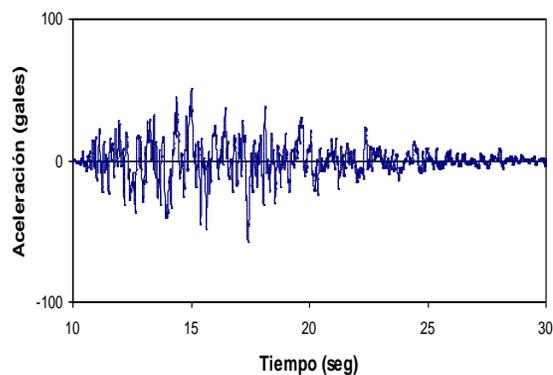
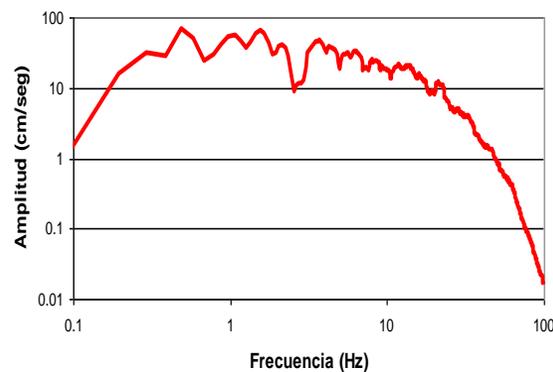
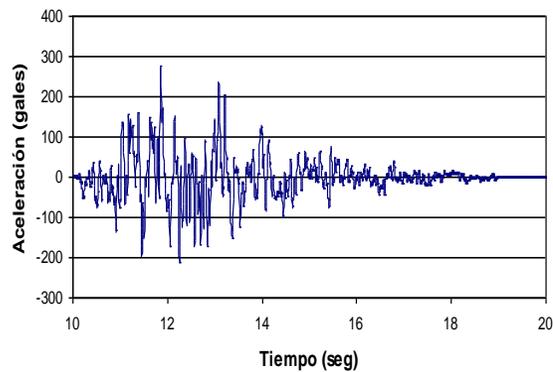


Sismo Semilla	Semilla Mw.	Dist. Epicentral (Km.)	Profundidad (Km.)	Simulación1 Mw.
Sismo de Calima Febrero 8 - 1995	6.4	129.76	102	6.8
Sismo Armenia Enero 25 – 1999	6.2	37.65	18.6	6.7



Upegui y Monsalve (2007)

SIMULACIÓN ESPECTROS DE FASE



Sismo Semilla	Semilla Mw.	Dist. Epicentral (Km.)	Profundidad (Km.)	Simulación1 Mw.
Sismo de Calima Febrero 8 - 1995	6.4	129.76	102	6.8
Sismo Armenia Enero 25 - 1999	6.2	37.65	18.6	6.7

Upegui y Monsalve (2007)

CONCLUSIONES

- 1.- La rápida instalación de una red provisional y un detallado mapa de las fallas de la región, permitieron la determinación del área de ruptura del sismo principal.
- 2.- La variación del parámetro b de la ecuación de Richter, en el sector de la falla Armenia, nos indica la actividad de dicha falla como la reacomodación de esfuerzos producidos por el evento principal.
- 3.- La distribución de las réplicas y la inversión de forma de onda del evento principal, permitió establecer un área de ruptura de 124 km², en un rectángulo de 10.6 X 11.7 km, con una dislocación estimada $\Delta_u = 48.4$ cm.

CONCLUSIONES

4.- El mecanismo obtenido por inversión del tensor de momento, corresponde a una falla normal con desplazamiento lateral izquierdo, $\phi = 356^\circ \pm 10^\circ$, $\delta = 67.3^\circ$, $\lambda = -33.8^\circ$ y

$$M_0 = 2.1 * 10^{25} \text{ dina} - \text{cm} \quad M_w = 6.2 .$$

5.- La relación de Gutenberg y Ritcheer para energía, es válida para sismos en la región.



PERTINENTE
CREATIVA
INTEGRADORA

MUCHAS GRACIAS

 @uniquindio

 uniquindioconectada

 uniquindioconectada