

## EVENTO PRINCIPAL Y REPLICAS IMPORTANTES DEL TERREMOTO DE LIMON

Walter Montero<sup>1</sup>, Mario Pardo<sup>2</sup>, Lautaro Ponce<sup>2</sup>, Wilfredo Rojas<sup>1</sup> y Mario Fernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Centroamericana de Geología, Apartado 35-2060 UCR, San José.

<sup>2</sup>Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Casilla, 2777, Santiago.

**ABSTRACT:** Combining local, regional and teleseismic seismological information, we find the principal aftershocks ( $M_c \geq 4.4$ ) of the Limon earthquake of April 22, 1991 ( $M_w = 7.7$ ). They define a rupture area of  $85 \times 45 \text{ km}^2$ , it is similar to that found using small magnitude earthquakes ( $M_c \geq 4.4$ ). Using the first arrivals reported by seismological stations located at different epicentral distances, allow us to obtain a focal mechanism solution that corresponds with a thrust oblique faulting event (strike  $120^\circ$ , dip angle  $30^\circ$ , slip  $63^\circ$ ). Our interpretation of an accelrogram obtained 70 km southwest of the mainshock epicenter, permit us to identify five subevents during the rupture process, this defines the Limon earthquake as a complex and multiple event. Finally, we find that many aftershocks occurred on thrust and strike slip secondary faults; they are located a different distances and trends from the mainshock epicenter.

**RESUMEN:** Combinando datos sismológicos obtenidos con estaciones locales, regionales y telesísmicas se definen las réplicas principales (magnitud  $M_c \geq 4,4$ ) y el área de ruptura del Terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 ( $M_w = 7,7$ ). Este se encuentra es de  $85 \times 45 \text{ km}^2$  y coincide con el encontrado con estaciones locales para temblores de magnitud  $\geq 4,4$ . Datos de primeros impulsos obtenidos de diferentes distancias epicentrales, permiten definir el mecanismo focal del evento principal, el cual corresponde con una falla inversa oblicua (rumbo  $120^\circ$ , inclinación  $30^\circ$  y deslizamiento  $63^\circ$ ). La interpretación de un acelerograma obtenido 70 km al SW del epicentro, permite identificar cinco subeventos durante el proceso de ruptura. Esto permite interpretar el Terremoto de Limón como múltiple y complejo. Finalmente se encuentra que algunas de las réplicas ocurrieron en fallas secundarias inversas y de desplazamiento de rumbo, localizadas a diferentes distancias y direcciones del evento principal.

### INTRODUCCION

El Terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 ( $M_w = 7,7$ ) ocurrió en una zona que era considerada de bajo potencial sísmico. Este fue un terremoto sumamente destructivo que causó un daño muy extendido a la infraestructura local y causó muchas muertes a lo largo de la costa caribe de Costa Rica y del noroeste de Panamá. Un pequeño tsunami fue generado y un levantamiento cosísmico fue

determinado a lo largo del litoral. El levantamiento alcanzó un máximo de 1,5 m en Puerto Limón y decreció rápidamente hacia el NW de esta ciudad. El levantamiento decreció lentamente hacia el SW, desapareciendo cerca de la frontera con Panamá. Además, extensas áreas sufrieron licuefacción y grandes deslizamientos fueron observados. Este estudio presenta los parámetros focales del evento principal y las réplicas más importantes. También se discute la sismicidad inducida por el evento

principal y asociada con la reactivación de fallas secundarias. Finalmente se presenta una interpretación neotectónica respecto al origen y las implicaciones de este terremoto.

### PARAMETROS FOCALES DEL EVENTO PRINCIPAL

Después del terremoto de Nicoya del 5 de octubre de 1950 ( $M_s = 7,7$ ), el Terremoto de Limón es el más grande que ha ocurrido en Costa Rica durante este siglo. Un terremoto similar parece que ocurrió a lo largo de la costa caribe, el 7 de mayo de 1822, con una magnitud estimada  $M_s = 7,5$  (Boschini & Montero, este volumen). Los reportes históricos describen efectos macrosísmicos similares al Terremoto de Limón de 1991, sugiriendo que el área fuente de ambos eventos fue la misma.

la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Ambas localizaciones se muestran en la figura 1. La solución NEIC se encuentra desplazada 10 km hacia el NE respecto a nuestra solución. La diferencia entre las localizaciones es debida al bien conocido desplazamiento de los temblores de América Central hacia al NE, por causa de la distribución asimétrica de las estaciones sismológicas las cuales se ubican especialmente hacia el noreste del epicentro (Norte América y Europa).

El epicentro obtenido a partir de la red local esta localizado 40 km al SE de Puerto Limón, el cual también esta dentro del área de ruptura de este terremoto (Fig. 1). Consideramos que la profundidad focal determinada usando datos locales (24 km) es mejor que la profundidad fija de 10 km encontrada por NEIC. A una profundidad de 24 km, la ruptura inicial se ubicaría dentro del

**Tabla 1**  
Hipocentros del Evento Principal

T. Origen (UTC)	Latitud (° N)	Longitud (° W)	Prof. km	Magnitud Ms - mb	Fuente
21:56:52,22	9°37,82'	83°09,41'	24,00	- -	RSN-UPA-OVSICORI
21:56:51,80	9°41,10'	83°04,38'	10,00	7,6 - 6,3	NEIC

La magnitud de ondas superficiales reportada para el Terremoto de Limón fue  $M_s = 7,6$ , la magnitud de ondas de cuerpo  $m_b = 6,3$  y una magnitud momento  $M_w = 7,7$  fue obtenida del momento sísmico que fue determinado entre 1,1-4,0,  $10^{20}$  Nm (National Earthquake Information Center, NEIC). La Tabla 1 muestra los hipocentros del evento principal localizados tanto por NEIC usando información principalmente telesísmica y algunos pocos datos locales y nuestra localización del sismo usando datos locales de la Red Sismológica Nacional (RSN), del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) y de la Universidad de Panamá (UPA). La RSN es la red sismológica operada por

basamento debajo de las rocas sedimentarias. Esto concuerda con la geometría de una falla lítrica determinada de la distribución de réplicas obtenidas de las estaciones sismológicas portátiles (Montero et al., 1991).

El área de ruptura estimada de las localizaciones de réplicas es de 85,45 km<sup>2</sup>, con un eje mayor paralelo a la costa noreste caribe y que cubre la región comprendida entre Puerto Limón y el borde fronterizo entre Costa Rica y Panamá (Fig. 1). El área de ruptura determinada de las réplicas principales coincide con el área estimada incluyendo estaciones portátiles ubicadas después del evento principal (Ponce et al., 1991; Montero et al., 1991).

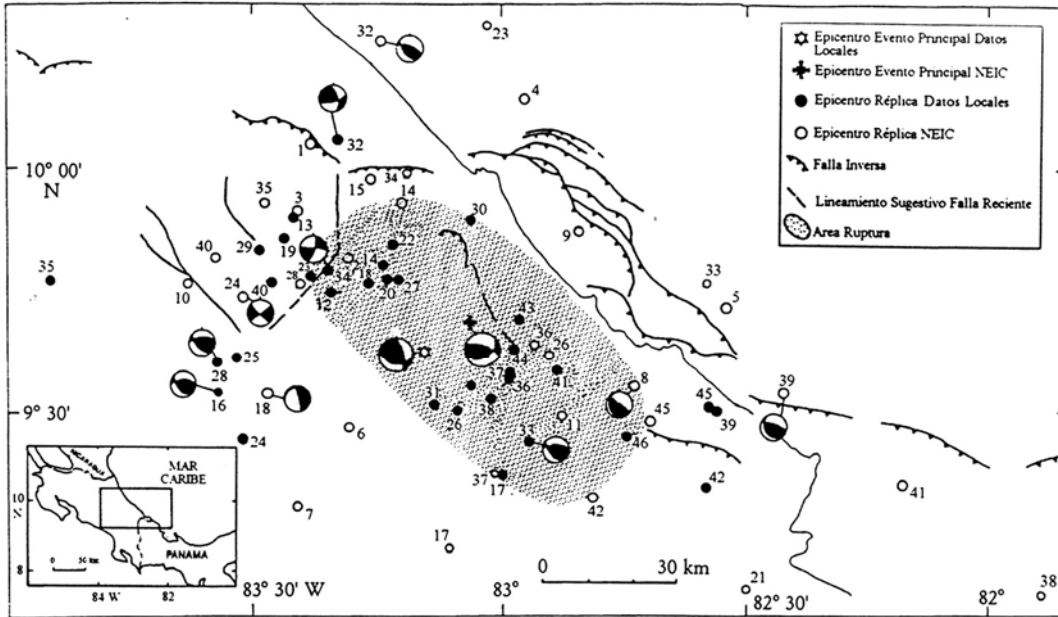


Fig. 1: Esquina inferior izquierda. Vista general de Costa Rica. La región limitada por un pequeño rectángulo se agranda en la figura principal donde se muestra una vista detallada del área epicentral. Los epicentros mostrados fueron localizados por la red RSN y por NEIC (Tabla 2). El mecanismo focal asociado a algunos temblores fue obtenido usando datos de polarización de la red RSN o reportado por NEIC. Los cuadrantes negros representan regiones compresivas. Los cuadrantes blancos representan zonas de dilatación. El área de réplicas tiene dimensiones de alrededor de 8545 km<sup>2</sup>. También se muestra los eventos principales localizados por la RSN y NEIC respectivamente. Sus mecanismos focales se detallan en la figura 2.

El mecanismo focal del evento principal fue reportado por diferentes agencias y corresponde con una falla inversa con una pequeña componente lateral izquierda, que se inclina hacia el continente en una dirección SSW. Nuestro mecanismo focal (Fig. 2a) fue obtenido usando los primeros impulsos de la onda P de las estaciones de la RSN, OVŠICORÍ y UPA. También incluimos datos de polarización de la onda P provenientes de lecturas con pequeños residuos, tal como se reportan en el Preliminary Determination of Epicenters (PDE, U. S. Geological Survey). Esta solución corresponde con una falla inversa oblicua (rumbo =  $120^\circ$ , buzamiento =  $30^\circ$ , deslizamiento =  $63^\circ$ ). La misma es consistente con la solución del centroíde del tensor momento (rumbo =  $103^\circ$ , buzamiento =  $25^\circ$ , deslizamiento =  $58^\circ$ ) (Dziewonski et al., 1992) (Fig. 2b) y también con la solución reportada por Goes et al. (1993) para el modelaje de las ondas de cuerpo (rumbo entre  $90^\circ$  -  $120^\circ$ , inclinación  $15^\circ$  -  $20^\circ$ , deslizamiento  $50^\circ$  -  $80^\circ$ ) y de las ondas superficiales (rumbo  $107 \pm 5^\circ$ , inclinación  $21 \pm 10^\circ$ , deslizamiento  $56 \pm 11^\circ$ ), y también con la falla inferida a partir de réplicas bien controladas, que sugieren una inclinación promedio de  $23^\circ$  para el plano de ruptura (Ponce et al., 1991; Montero et al., 1991). Un mecanismo focal como el encontrado

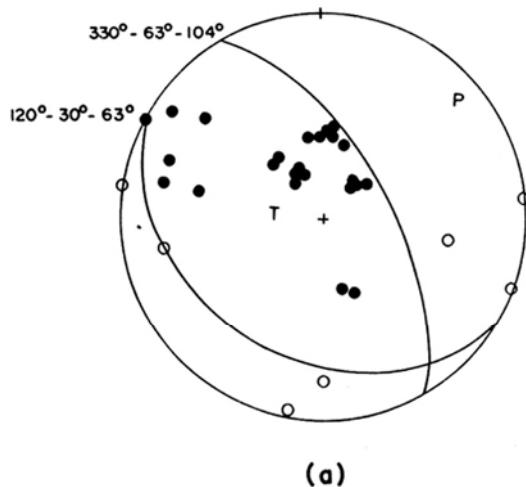


Fig. 2a: Mecanismo focal obtenido usando datos de polarización de las redes RSN, OVŠICORÍ y UPA. También se incluyen datos de primeros impulsos que tienen pequeños residuos en el reporte PDE.

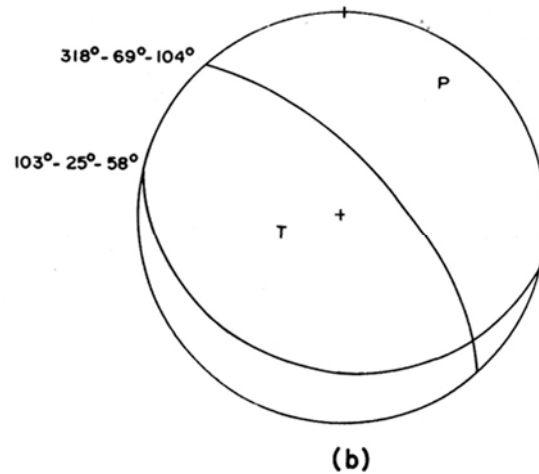


Fig. 2b: Solución del mecanismo focal a partir del centroíde del tensor momento reportado por Dziewonski et al. (1992).

explica bastante bien el levantamiento vertical observado a lo largo de la costa, usando un modelo de dislocación homogénea y un área de ruptura similar a la estimada de las réplicas (Montero et al., 1991; Ponce et al., 1991).

#### LA COMPLEJIDAD DEL PROCESO DE RUPTURA

Los registros de movimiento fuerte observados en San Isidro de El General sugieren que el proceso de ruptura fue múltiple y complejo. La estación acelererográfica está localizada a 68 km del epicentro y es operada por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica. Fue posible identificar al menos cinco subeventos durante el proceso de ruptura principal. Las correspondientes ondas S están claramente registradas y ocurren a un tiempo  $t$  de 3,5, 7,2, 13,8 y 21,2 segundos después de la llegada de la primera onda S (Fig. 3). La amplitud se incrementa sistemáticamente desde el primer subevento hasta el último, el cual es el de mayor amplitud en el proceso de ruptura. Santana et al. (1991) reportaron una aceleración pico de 0,2 g en la componente horizontal NS correspondiente a este último subevento. Los tiempos S-P leídos del

acelerograma para el primer, tercer, cuarto y quinto subeventos son prácticamente constantes relativos a la estación San Isidro, indicando que la máxima distancia estimada entre estos difieren por menos de 10 km. Esta observación sugiere que la ruptura se propagó bilateralmente hacia el noreste y sureste desde el hipocentro del evento principal, rompiendo al menos cinco subfallas y liberando progresivamente más momento sísmico. De acuerdo al tiempo de arribo de los subeventos, el momento sísmico liberado ocurrió principalmente durante los primeros 25 segundos. Este último resultado es similar al encontrado por Goes et al. (1993), aunque ellos reportan con base en el modelaje de ondas de cuerpo, una pequeña liberación de momento sísmico entre 25 y 40 segundos, aunque sin subeventos reconocibles.

#### LOCALIZACION DE LAS PRINCIPALES REPLICAS

Las principales réplicas y la sismicidad inducida ocurrió durante un período de cinco semanas después del evento principal. Esta se reporta en los Monthly Listings del NEIC correspondientes a los meses de abril y mayo de 1991, y se muestran en la Tabla 2 y en la figura 1.

Aunque la magnitud mínima reportada incluida en el cuadro 2 es  $m_b = 4,0$ , el conjunto de datos es probablemente completo únicamente para eventos con magnitudes  $m_b \geq 4,8$  (Zúñiga, 1988).

Todos los temblores con magnitud coda  $M_c \geq 4,4$  ( $M_c = -1,21 + 2,38 \log C + 0,0012 \nabla$ ; donde  $C$  es la duración coda en segundos y  $\nabla$  es la distancia epicentral medida desde la estación San José en kilómetros), según estimación de la RSN, fueron relocalizados. Estos se muestran en el cuadro 2 y en la figura 1. Solo no fueron relocalizados los primeros once eventos y los eventos numerados 15 y 21 (Fig. 1) porque no fue posible leer tiempos de arribo precisos de los registros analógicos.

El procedimiento usado para relocalizar los hipocentros de estos temblores, incluye la aplicación de una corrección por retardo de tiempo a cada estación local en el modelo de corteza usado para localizarlos (Matumoto et al., 1977). Los tiempos de retardo fueron obtenidos de los residuos promedio de arribo de tiempo de las ondas P y S obtenidos de un grupo seleccionado de diez réplicas bien registradas y localizadas precisamente, donde se usó también datos de la red temporal local (Ponce et al., 1991). El programa de localización hipocentral usado fue el HYPO71PC (Lee y Valdés, 1985).

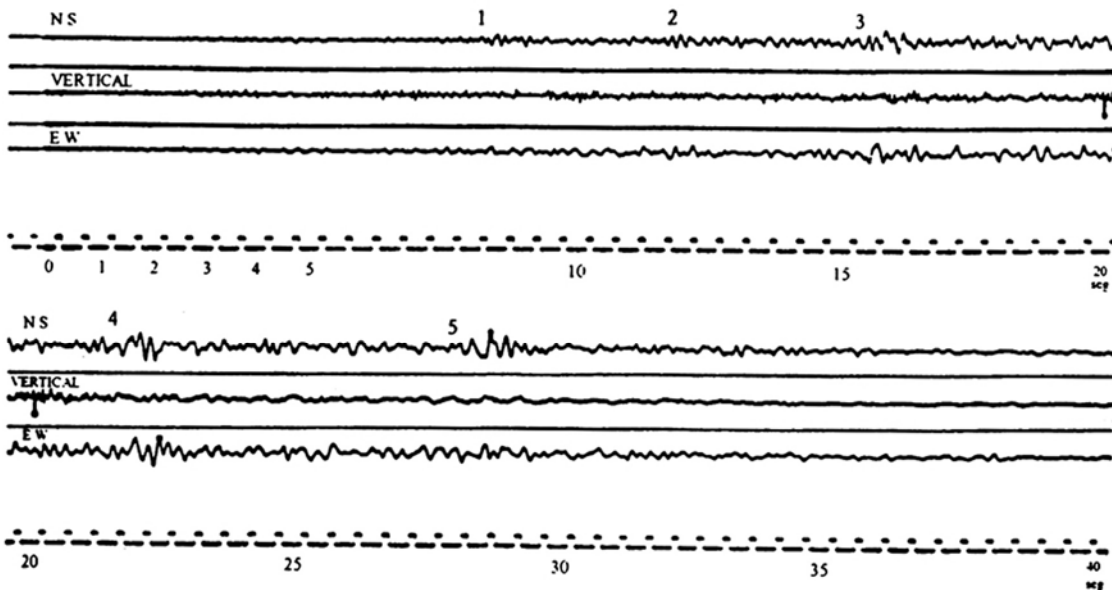


Fig. 3: Acelerograma de la estación San Isidro (ISD). Las ondas S de cinco subeventos están numeradas. Estas reflejan la complejidad del proceso de ruptura.

Tabla 2

Hipocentros y magnitudes de las principales réplicas de la secuencia sísmica del terremoto de Limón. En fuente, 1 significa PDE/NEIC y 2 RSN/TS. (\*) en la última columna significa que el sismo no está relacionado con el área de ruptura del evento principal.

N	Fecha mo/d	T. Origen (UTC)	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Prof. km	Magnitud mb Ms	Fuente
01	04/22	22:07:13.3	10°03.00'	83°22.62'	10G	5.2 -	1
02	04/22	22:08:31.9	09°49.20'	83°18.24'	10G	5.4 -	1
03	04/22	22:19:25.6	09°54.90'	83°24.78'	10G	5.4 -	1
04	04/22	22:41:51.4	10°08.88'	82°57.06'	10G	5.1 -	1
05	04/22	22:51:35.1	09°43.38'	82°32.00'	10G	5.2 -	1
06	04/22	23:13:24.1	09°27.96'	83°18.24'	10G	4.8 -	1
07	04/22	23:16:08.2	09°18.60'	83°24.60'	10G	4.9 -	1
08	04/23	05:37:05.5	09°33.30'	82°43.68'	10G	5.1 5.1	1
09	04/23	05:55:49.1	09°52.68'	82°50.46'	10G	4.9 -	1
10	04/23	06:02:21.3	09°46.08'	83°37.86'	10G	4.7 -	1
11	04/23	06:13:19.9	09°29.46'	82°52.32'	10G	4.5 -	1
12	04/23	07:44:08.1	09°46.90'	83°22.97'	12.5	4.4 (Mc)	2(*)
13	04/23	08:22:01.7	09°53.60'	83°24.92'	06.2	4.5 (Mc)	2
14	04/23	08:32:38.1	09°56.04'	83°11.88'	10G	5.0 4.9	1
	04/23	08:32:38.2	09°48.14'	83°14.02'	06.4	4.9 (Mc)	2
15	04/23	08:58:47.7	09°58.80'	83°15.60'	10G	4.6 -	1
16	04/23	09:26:01.7	09°33.11'	83°33.81'	05.5	4.4 (Mc)	2(*)
17	04/23	11:33:12.2	09°13.26'	83°06.12'	10G	4.4 -	1
	04/23	11:33:15.6	09°22.20'	82°59.20'	03.4	4.6 (Mc)	2
18	04/23	18:56:41.2	09°32.28'	83°28.02'	10G	5.0 4.4	1
	04/23	18:56:44.7	09°45.89'	83°16.34'	22.5	4.9 (Mc)	2
19	04/23	22:07:23.7	09°51.46'	83°26.26'	10.1	4.5 (Mc)	2(*)
20	04/24	02:45:00.4	09°46.42'	83°13.73'	03.1	4.4 (Mc)	2
21	04/24	04:41:48.4	09°08.40'	82°30.00'	10G	4.3 -	1
22	04/24	14:21:51.7	09°50.85'	83°12.87'	04.1	4.6 (Mc)	2
23	04/24	17:54:02.1	10°17.88'	83°01.20'	10G	4.6 -	1
	04/24	17:54:01.7	09°44.55'	83°20.28'	16.9	4.9 (Mc)	2
24	04/24	19:13:02.1	09°44.46'	83°31.02'	13G	5.6 6.1	1(*)
	04/24	19:12:57.8	09°26.43'	83°30.97'	12.8	5.5 (Mc)	2
25	04/24	21:34:03.3	09°37.19'	83°32.27'	21.8	4.4 (Mc)	2(*)
26	04/25	02:16:32.6	09°37.32'	82°53.94'	10G	4.6 4.5	1
	04/25	02:16:33.6	09°29.49'	83°05.62'	05.1	4.9 (Mc)	2
27	04/25	02:47:45.0	09°46.45'	83°12.50'	05.1	4.8 (Mc)	2
28	04/25	07:55:28.9	09°46.14'	83°24.36'	10G	4.6 4.6	1(*)
	04/25	07:55:28.	09°36.38'	83°34.07'	12.3	4.7 (Mc)	2
29	04/25	14:32:04.4	09°50.00'	83°29.08'	09.0	4.7 (Mc)	2(*)
30	04/25	15:54:41.6	09°53.66'	83°03.44'	30.5	4.4 (Mc)	2
31	04/25	18:08:31.6	09°30.92'	83°08.15'	05.0	4.5 (Mc)	2
32	04/27	05:42:41.7	10°15.36'	83°14.58'	10G	5.3 4.8	1(*)
	04/27	05:42:43.	10°03.66'	83°19.90'	22.2	5.2 (Mc)	2
33	04/27	08:25:39.3	09°46.80'	82°34.68'	10G	4.3 3.4	1
	04/27	08:25:43.	09°26.09'	82°56.75'	08.0	4.6 (Mc)	2

Tabla 2 (continuación)

N	Fecha mo/d	T. Origen (UTC)	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Prof. km	Magnitud		Fuente
						mb	Ms	
34	04/27	13:05:07.5	09°59.70'	83°11.28'	10G	4.5	-	1
	04/27	13:05:09.4	09°47.32'	83°21.84'	12.1	4.8 (Mc)		2
35	04/29	12:49:39.4	09°55.86'	83°28.26'	10G	4.5	-	1(*)
	04/29	12:49:40.	09°46.64'	83°54.58'	22.5	4.7 (Mc)		2
36	04/29	22:44:59.0	09°38.46'	82°55.92'	10G	4.8	4.6	1
	04/29	22:45:00.5	09°34.94'	82°58.27'	05.4	4.9 (Mc)		2
37	04/29	22:48:38.5	09°22.20'	83°00.60'	10G	4.0	-	1
	04/29	22:48:42.0	09°35.76'	82°58.26'	03.7	4.6 (Mc)		2
38	05/02	07:05:32.0	09°07.56'	81°53.04'	10G	-	-	1
	05/02	07:05:28.9	09°31.54'	83°01.70'	30.0	4.8 (Mc)		2
39	05/04	03:42:54.5	09°32.52'	82°25.08'	10G	5.6	6.2	1(*)
	05/04	03:42:55.2	09°29.98'	82°33.33'	25.1	5.4 (Mc)		2
40	05/14	19:53:10.6	09°49.14'	83°34.68'	33N	4.5	-	1(*)
	05/14	19:53:09.1	09°46.16'	83°27.88'	05.4	4.7 (Mc)		2
41	05/15	14:34:25.0	09°21.18'	82°10.56'	33D	5.2	4.5	1(*)
	05/15	14:34:35.3	09°35.21'	82°53.03'	26.2	4.9 (Mc)		2
42	05/19	00:03:23.5	09°19.38'	82°48.84'	17D	4.8	4.2	1(*)
	05/19	00:03:24.0	09°20.45'	82°34.75'	37.4	4.7 (Mc)		2
43	05/22	11:16:47.4	09°41.32'	82°57.86'	16.6	4.5 (Mc)		2
44	05/26	03:05:23.8	09°37.86'	82°58.32'	06.7	4.4 (Mc)		2
45	05/27	18:40:27.9	09°28.92'	82°41.64'	10G	5.0	5.0	1(*)
	05/27	18:40:27.3	09°30.19'	82°33.81'	10.2	5.0 (Mc)		2
46	05/27	18:59:15.5	09°26.75'	82°44.47'	30.0	4.4 (Mc)		2

Las localizaciones de las réplicas reportadas por NEIC no están restringidas por datos locales, excepto el evento 24 (Tabla 2, Fig. 1). En general la estación más cercana que reportó los sismos está situada en el centro de Panamá y está localizada entre 3° y 3,5° del área de ruptura. Las siguientes estaciones más cercanas se ubican a distancias mayores a 10 de los epicentros reportados. Con respecto a los epicentros localizados usando las redes locales, los epicentros del NEIC están desplazados un promedio de 20-25 km al NNE, reflejando el mismo error mencionado previamente.

Nuestros epicentros relocalizados están bien restringidos, con errores estimados menores a 5 km, excepto para los temblores localizados cerca del borde fronterizo entre Costa Rica y Panamá. Las profundidades focales determinadas no están tan bien controladas, porque las estaciones locales estaban en general localizadas a distancias mayores

que las profundidades focales. Además, la cobertura azimutal no fue adecuada y algunas veces el arribo de la onda S fue difícil de leer. Por estas razones, las réplicas relocalizadas únicamente pueden definir la proyección horizontal del área de ruptura (Fig. 1). Para establecer con precisión sus límites en el sector noroeste, también incluimos algunas réplicas con magnitudes menores que  $M_c = 4,4$ .

Los hipocentros de las réplicas principales se localizaron principalmente bajo el continente, sugiriendo que la parte frontal de la falla se propagó asísmicamente hacia la superficie, a través de una sección sedimentaria de baja competencia y resistencia. Solo pocas réplicas se localizaron cerca del hipocentro del evento principal, sugiriendo que el evento principal liberó prácticamente toda la energía acumulada alrededor de la zona donde se inició la ruptura del sismo.

### FALLAMIENTO SECUNDARIO ASOCIADO CON EL TERREMOTO DE LIMON

Un parte importante de la energía sísmica liberada durante la secuencia de réplicas estuvo asociada con fallas que no están directamente relacionadas con la zona de ruptura del evento principal. Un incremento de la sismicidad ocurrió después del Terremoto de Limón en muchas fallas localizadas al suroeste (norte de San Isidro de El General), hacia el sureste (Noroeste de Panamá) y hacia el oeste (p. e., Moravia de Chirripó, Irazú) del área de ruptura (Fig. 1). Estos eventos se muestran en la figura 1 y en la Tabla 2 con un asterisco en la última columna; muchos pequeños temblores asociados con estos sismos fueron localizados por la RSN y por la red portátil cerca de los sistemas de fallas mencionados.

Los dos temblores de mayor magnitud ( $M_s \geq 6,0$ ) de este tipo de sismicidad fueron:

- (1) El evento del 24 de abril,  $M_s = 6,1$  (N° 24 en el cuadro 2), el cual causó daños adicionales en la región localizada 20 km al norte de San Isidro de El General. La solución NEIC del plano de falla utilizando ondas P corresponde con fallamiento de desplazamiento de rumbo con una pequeña componente inversa (Fig. 1). Las soluciones del tensor momento y del centroide del tensor momento de Harvard (CMT) también corresponden con un fallamiento de desplazamiento de rumbo, pero con una pequeña componente normal (Dziewonski et al., 1992). El rumbo de los planos nodales varía entre  $N 55^\circ - 58^\circ E$  y  $N 31^\circ - 35^\circ W$ , y tienen un alto ángulo de inclinación. La dirección del esfuerzo máximo horizontal es NNE. El momento sísmico fue estimado entre  $1,8 - 2,0 \cdot 10^{15}$  Nm.
- (2) El sismo del 4 de mayo,  $M_s = 6,2$  (N° 39 en el cuadro 2), produjo daño adicional y licuefacción en algunos poblados del área de Bocas del Toro del noroeste de Panamá. Provocó dos muertes y treinta y seis lesionados en poblados de Changuinola y Almirante. El momento sísmico reportado por NEIC a partir

del CMT es  $2,1 \cdot 10^{15}$  Nm y el mecanismo focal corresponde con una falla inversa con una pequeña componente de rumbo. El plano nodal seleccionado concuerda con la vergencia del patrón estructural del Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP), y tiene rumbo  $N 42^\circ E$  y se inclina  $21^\circ$  al SW. El plano de falla es prácticamente paralelo con el plano de ruptura del Terremoto de Limón.

Un pequeño tsunami fue reportado en la terminal de Petróleo de Chiriquí Grande asociado al temblor del 15 de mayo,  $m_b = 5,2$  (N° 41 en la Tabla 2, Fig. 1). El último temblor  $M_s \geq 5,0$  de la secuencia sísmica ocurrió el 27 de mayo (N° 45 en el cuadro 2, Fig. 1). Este temblor lesionó gente y provocó daño ligero en el noroeste de Panamá. La solución CMT de Harvard corresponde con una falla inversa con un momento sísmico estimado de  $3,8 \cdot 10^{17}$  Nm (Dziewonski et al., 1992). Nosotros seleccionamos el plano nodal de rumbo  $N 29^\circ W$ , inclinación  $9^\circ$  y deslizamiento  $108^\circ$  como el plano de falla, en concordancia con la vergencia del CDNP. Este temblor puede ser relacionado con la ruptura de una pequeña aspereza localizada dentro del área de ruptura del terremoto del 26 de abril de 1916 ( $M_s = 7,3$ ).

### ORIGEN TECTONICO E IMPLICACIONES DEL TERREMOTO DE LIMON

El Terremoto de Limón ocurrió en el CDNP, en la región trasarco de la cordillera de Talamanca, alrededor de 125 km al noreste de la zona de subducción de la placa del Coco bajo la microplaca de Panamá. El CDNP es un cinturón en forma de ese constituido por fallas inversas y plegamientos que se extiende con un rumbo y vergencia variables a lo largo del borde caribe de Panamá y del este de Costa Rica. Este ha sido definido como el borde norte de la microplaca de Panamá (Adamek et al., 1988; Silver et al., 1990). Una revisión de las diferentes fronteras tectónicas que definen la microplaca de Panamá, incluyendo una breve descripción de sus características estructurales se presenta en Montero et al. (este volumen).



El mecanismo focal de falla inversa indica que este temblor está asociado con el sobrecorrimiento de la microplaca de Panamá sobre la litósfera oceánica de la placa Caribe. El eje principal de compresión está en dirección NE-SW. Por lo tanto se propone que la falla inversa donde ocurrió el Terremoto de Limón corresponde con el límite noroeste de la microplaca de Panamá.

La fuente de los esfuerzos que originó el Terremoto de Limón puede ser relacionada con la indentación del levantamiento del Coco que ocurre al sureste de Costa Rica. El levantamiento del Coco, que corresponde con una traza fósil de un punto caliente ubicada dentro de la placa del Coco, está subduciéndose bajo el borde pacífico sureste de Costa Rica desde hace aproximadamente 1 m.a.d.p. (Lonsdale & Klitgord, 1978; Montero et al., este volumen). El Terremoto de Limón ocurrió en una falla inversa lítrica debido a la compresión noreste transmitida a través de un fuerte acoplamiento entre el levantamiento del Coco, que se comporta como un indentador rígido, y la parte sureste de Costa Rica que actúa como un material viscoelástico (Montero, en prensa).

Un sistema imbricado de fallas inversas existe a lo largo del área trasarco de la cordillera de Talamanca (Fig. 1). Esta es prácticamente paralela a los sistemas de fallas inversas de la fila costera y de la fosa Mesoamericana. Estos además son prácticamente perpendiculares a la dirección de convergencia y al rumbo del levantamiento del Coco. Montero (1990) y Kolarsky (1991) sugirieron que la región trasarco también está tectónicamente controlada por la colisión del levantamiento del Coco. Del lado continental algunas de estas fallas fueron reactivadas por la ocurrencia del Terremoto de Limón.

Finalmente, enfatizamos que la microplaca de Panamá es un bloque tectónico cuya actividad parece estar controlada en la región oeste de Panamá y este de Costa Rica, por la colisión del levantamiento del Coco y por la interacción entre Panamá y la cuenca de Colombia.

### CONCLUSIONES

1. El terremoto de Limón fue una ruptura múltiple. La ruptura aparentemente se propagó

bilateralmente desde el hipocentro hacia el noroeste y el sureste. Al menos cinco subeventos están presentes en el proceso de ruptura, los cuales fueron progresivamente desprendiendo el momento sísmico. El momento sísmico se liberó durante los primeros 25 segundos.

2. El evento ocurrió en una falla inversa NW-SE con una pequeña componente de desplazamiento lateral izquierdo. La proyección horizontal del área de ruptura es de 85,45 km, con el eje más largo con dirección noroeste y paralelo a la costa caribe.
3. Prácticamente no ocurrieron réplicas importantes cerca del hipocentro del evento principal. Esto sugiere que la zona núcleo del terremoto liberó prácticamente toda la energía de deformación acumulada.
4. Los hipocentros de las principales réplicas están localizadas dentro del área continental, sugiriendo que la parte frontal de la falla se propagó asísmicamente hacia la superficie a través de una secuencia sedimentaria de baja resistencia.
5. El evento principal y la secuencia sísmica activaron fallas en el este de Costa Rica que parecen relacionadas con la extensión continental del CDNP.
6. La falla inversa donde ocurrió el Terremoto de Limón define el borde noroeste de la microplaca de Panamá. El Terremoto de Limón también puede ser asociado con la deformación trasarco que se relaciona con la colisión del levantamiento del Coco con el borde sureste de Costa Rica.

### REFERENCIAS

- Adamek, S., Frohlich, C., & Pennington, W., 1988: Seismicity of the Caribbean-Nazca boundary: Constrains on microplate tectonics of the Panama region. - *J. Geophys. Res.*, **93**: 2053-2075.
- Boschini, I. & Montero, W. (este volumen): Sismicidad histórica e instrumental: Costa Rica. - *Rev. Geol. América Central*, vol. esp.: El Terremoto de Limón.
- Dziewonski, A. M., Ekström, G., & Salganik, M. P., 1992: Centroid-moment tensor solutions for April-June, 1991. - *Phys. Earth Planet. Inter.*, **71**: 6-14.

- Goes, S., Velasco, A., Schwartz, S., & Lay, T., 1993: The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica (Mw = 7.7) earthquake and its tectonic implications: A broadband study. - *J. Geophys. Res.*, **98**: 8127-8142.
- Kolarsky, R., 1991: Late Cretaceous-Cenozoic tectonics and sedimentation in southern Central America (Costa Rica Panama). - 351 págs. Universidad de Texas (Tesis de Maestría).
- Lee, W.H.K., & Valdés, C. M., 1985: HYPO71PC: A personal computer version of the HYPO71 earthquake location program. - U. S. Geol. Sur. Open-File Report 85-749.
- Lonsdale, R., & Klitgord, K., 1978: Structure and tectonic history of the eastern Panama Basin. - *Geol. Soc. Am. Bull.*, **89**: 981-999.
- Matumoto T., Ohtake, G. Latham & J. Umaña, 1977: Crustal structure in southern Central America. - *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**: 121-134.
- Montero, W., 1990: Deformación neotectónica en el centro-sur de Costa Rica. Modelo de origen. - Resúmenes VI Congreso Geológico de América Central 19-23 de noviembre de 1990, San José, Costa Rica, conf. 63.
- Montero, W. (en prensa): Neotectonics and related stress distribution in a subduction-collisional zone: Costa Rica. - En: Seyfried (ed.): *Geology of an evolving island arc*.
- Montero, W., Camacho, E., Espinosa, A.F. & Boschini, I., (este volumen): Sismicidad y marco neotectónico de Costa Rica y Panamá. - *Rev. Geol. América Central*, vol, esp.: El Terremoto de Limón.
- Montero, W., Ponce, L., Pardo, M., Domínguez, J., Boschini, I., Rojas, W., Suárez, G., & Camacho, E., 1991: The Limon, Costa Rica Earthquake of April 22, 1991 (Ms = 7.5). Seismicity, Focal Mechanism and Tectonic implications. - (abstract), *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, **72**: 301.
- Ponce, L., Pardo, M., & Domínguez, J., 1991: El terremoto de Limón, Costa Rica del 22 de abril de 1991, Ms = 7.5. - 35 págs. Informe Técnico, Instituto de Geofísica, UNAM: Contrato 870.147.1 ROSTLAC-UNESCO.
- Santana, G., Vargas, W., Sancho, V., Segura, C., Ramírez, A., & Sibaja, J., 1991: Registros de aceleraciones del terremoto de Limón, 22 de abril de 1991. - 46 págs. Reporte INIII-58-91, Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica.
- Silver, E. A., Reed, D. L., Tagudin, E. & Heil, D. J., 1990: Implications of the north and south Panama thrust belts for the origin of the Panama orocline. - *Tectonics*, **9**: 261-281.
- Zuffiga, F. R., 1988: A study of homogeneity of the NOAA earthquake data file in the Mid-America region by the magnitude signature technique. - *Geofis. Inter.*, **28**: 103-119.