

INSTITUTO DE INVESTIGACION: OBSERVATORIO VULCANOLOGICO Y
SISMOLOGICO DE COSTA RICA, UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR

LEVANTAMIENTO COSISMICO ASOCIADO AL
TERREMOTO DEL 22 DE ABRIL DE 1991, Ms=7.5
VALLE DE LA ESTRELLA, LIMON, COSTA RICA
PARTE I

ELABORADO POR:

F. DE OBALDIA, T. MARINO, R. VAN DER LAAT, E. MALAVASSI,
F. HERNANDEZ

OBSERVATORIO VULCANOLOGICO Y SISMOLOGICO DE COSTA RICA,
UNIVERSIDAD NACIONAL

R. MORERA, F. TREJOS.
CATASTRO NACIONAL, REGISTRO PUBLICO, MINISTERIO DE JUSTICIA

K. SLATTERY
MINA ZENT, REFINADORA COSTARRICENSE DE PETROLEO

K.C. McNALLY.
UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA SANTA CRUZ

OCTUBRE-1991

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCION	3
DATUM ALTIMETRICO.....	4
CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	5
SISMOTECTONICA.....	5
METODOLOGIA.....	8
PROCEDIMIENTOS DE CAMPO Y ANALISIS DE ERRORES.....	9
PROPAGACION DE ERRORES.....	10
PRESENTACION DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	12
CAMBIOS COSISMICOS DOCUMENTADOS POR METODOS DIFERENTES	21
DESCRIPCION DE LOS PATRONES DE DEFORMACION OBSERVADOS.	23
CONCLUSIONES.....	26
RECOMENDACIONES.....	27
AGRADECIMIENTOS.....	28
REFERENCIAS.....	29

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: NIVELACION CENTRO DE LIMON.....	13
TABLA 2: NIVELACION MOIN-DOCE MILLAS.....	15
TABLA 3: NIVELACION CIENEGUITA-WESTFALIA.....	17
TABLA 4: NIVELACION MOIN-RIO ROJO.....	19

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: MAPA GEOTECTONICO DE COSTA RICA Y ESQUEMA INTERPRETATIVO.....	6
FIGURA 2: MAPA QUE MUESTRA PUERTO LIMON Y ALREDEDORES.	7
FIGURA 3: NIVELACION TRIGONOMETRICA.....	9
FIGURA 4: NIVELACION Y DEFORMACION ENCONTRADA EN PUERTO LIMON.....	14
FIGURA 5: NIVELACION Y DEFORMACION ENTRE MOIN Y DOCE MILLAS.....	16
FIGURA 6: NIVELACION Y DEFORMACION CIENEGUITA Y WESTFALIA.....	18
FIGURA 7: NIVELACION Y DEFORMACION MOIN-RIO ROJO.....	20
FIGURA 8: COMPARACION ENTRE EL RECONOCIMIENTO DE PLAFKER ET AL (1991) Y LA NIVELACION TRIGONOMETRICA.	22
FIGURA 9: DEFORMACION EN TRES DIMENSIONES DE LA CORTEZA EN PUERTO LIMON.....	24
FIGURA 10: DEFORMACION DE LA CORTEZA EN LIMON, CORRELACION ENTRE VISTA DE PLANTA Y TRIDIMENSIONAL.....	25

**LEVANTAMIENTO COSISMICO ASOCIADO
AL TERREMOTO DEL VALLE DE LA ESTRELLA, Ms 7.5,
OCURRIDO EL 22 DE ABRIL DE 1991.**

F. De Obaldía (*), T. Marino (*), R. Van der Laat (*), E. Malavassi (*), F. Hernández (*), R. Morera (**), F. Trejos (**), K. Slattery (***) y K. C. McNally (****)

- (*) Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- (**) Catastro Nacional, Registro Público, Ministerio de Justicia.
- (***) Mina Zent, Refinadora Costarricense de Petróleo.
- (****) Charles F. Richter Seismological Laboratory and Institute of Tectonics, University of California, Santa Cruz.

RESUMEN

El levantamiento cosísmico del terremoto del 22 de abril de 1991 (Ms=7.5) ha sido documentado cerca de Puerto Limón, Costa Rica. Nuestros datos de nivelación sugieren la existencia de un complejo patrón de levantamiento en la vecindad de Puerto Limón que es un arrecife coralino levantado. Podemos reconocer tres bloques que muestran máximos de levantamiento separados por mínimos de levantamiento que corresponden con mínimos relativos o subsidencia. Estos bloques están alineados en dirección aproximada NNW-SSE. En contraste, al SE de Puerto Limón el patrón de levantamiento es más simple y el total de levantamiento es casi constante (0.2-0.3 m).

El sistema de fallas inversas del norte de Panamá intersecta la costa del Caribe en la vecindad de Puerto Limón. Las proyecciones tierra adentro de este sistema, orientadas aproximadamente E-W, corresponden a fallas de desplazamiento lateral izquierdo. Por lo tanto, el gran levantamiento documentado cerca de Puerto Limón está relacionado con movimiento cosísmico a lo largo de fallas inversas en la transición de un ambiente tectónico altamente compresivo caracterizado por fallas inversas a un ambiente menos compresivo, caracterizado por fallas de movimiento lateral.

Nuestro levantamiento por nivelación trigonométrica de 53 Km de largo, con exactitud de $\pm(5-10)$ mm/km, puede ser dividido en dos perfiles. El primer perfil sigue la costa del caribe por 26 Km desde Doce Millas, al NW de Puerto Limón, hasta Westfalia, al SE de Puerto Limón. El segundo perfil, orientado aproximadamente E-W, se inicia en el muelle de Limón

y sigue la línea del ferrocarril hasta el muelle de Moín por 8 km y luego continúa por la carretera hacia San José por 18 Km hasta el Río Rojo.

El perfil a lo largo de la costa del Caribe se inicia con subsidencia (-0.5 m) en Doce Millas, no se reporta cambio cosísmico en Nueve Millas, pero de allí hacia el SE hay un levantamiento progresivo hasta alcanzar el máximo de Portete (1.51 m). Al SE de Portete el levantamiento decrece rápidamente hasta el extremo SE de Puerto Limón en donde el levantamiento alcanza 0.55 m en Cieneguita y 0.23 m en el Aeropuerto de Limón. Entre el Aeropuerto de Limón y Westfalia el levantamiento es más regular (0.23-0.24 m).

El perfil E-W contiene la extensión sur del máximo de Portete cerca de Pueblo Nuevo. Tierra adentro de Moín, tres máximos y mínimos de levantamiento son observados. Ellos son el máximo de Moín (1.32 m), el mínimo de Bartolo (0.49 m), el máximo de Sandoval (1.75 m), el mínimo de Río Blanco (-0.67 m), el máximo de Liverpool (0.95 m), y el mínimo de Río Rojo (-0.85 m). Pocos kilómetros tierra adentro de Río Rojo se ha comprobado subsidencia por medio de observaciones de campo.

ABSTRACT

The coseismic uplift of the April 22, 1991 ($M_s = 7.5$) destructive earthquake has been documented near Puerto Limón, Costa Rica. Our leveling data suggests a complex pattern of uplift at the vicinity of Puerto Limón which is an uplifted coral reef. We can recognize three blocks that show highs of uplift separated by lows that correspond with smaller uplift or subsidence. These blocks are aligned N-NW to S-SE. In contrast, southeast of Puerto Limón the uplift pattern is simpler and the amount of uplift nearly constant (0.2-0.3 m).

The North Panama Thrust Belt (NPTB) intersects the Caribbean shore in the vicinity of Puerto Limón. Inland projections of the NPTB, oriented approximately E-W, correspond to left lateral strike slip faults. Therefore, the large uplift documented near Puerto Limón is probably related with coseismic movement along thrust faults at the transition from a highly compressive backthrust to a less compressive environment.

Our 53 Km long trigonometric leveling survey, accuracy $\pm(5-10)$ mm/km, is divided in two profiles. The first profile followed the Caribbean shore for 26 km from Doce Millas, NW of Puerto Limón, to Westfalia, SE of Puerto Limón. The second profile (E-W) started at the Limón dock, for 8 km followed the railroad tracks to the Moín dock and then followed the road to San José to the west for 18 km to Río Toro.

The shore profile started with subsidence (-0.5 m) at Doce Millas, no change at Nueve Millas and progressive uplift

to the SE to the Portete maximum (1.51 m). SE of Portete the uplift decreases rapidly to the SE extreme of Puerto Limón, where at Cieneguita the uplift is 0.55 m. and 0.23 m. at the Limón Airport. Between the Airport and Westfalia the uplift is nearly constant (0.23 -0.24 m).

The E-W profile shows the southern extension of the Portete high near Pueblo Nuevo. From Moín inland three highs and lows are observed. They are the Moín high (1.32 m), the Bartolo low (0.49 m), the Sandoval high (1.75 m), the Río Blanco low (-0.67 m), the Liverpool high (0.95 m), and the Río Rojo low (-0.85 m). Inland from Río Rojo field observations have documented subsidence.

INTRODUCCION

El terremoto del Valle de La Estrella, Ms=7.5, ocurrido el 22 de abril de 1991, afectó la costa del caribe ubicada al SE de Costa Rica e importantes sectores de la Provincia de Bocas del Toro, Panamá. El levantamiento fue tan grande en Puerto Limón que fue notado a simple vista por los habitantes de esa ciudad inmediatamente después del sismo. Los primeros datos que documentaron el levantamiento de la costa en la vecindad de Puerto Limón fueron colectados por geodestas del OVSICORI-UNA, durante los días posteriores al evento principal.

La llegada al país del Dr. Plafker (USGS-Menlo Park) y del Dr. Ward y del Dr. Weber (Universidad California en Santa Cruz) catalizó una expedición con funcionarios del OVSICORI-UNA para documentar exhaustivamente el levantamiento cosísmico y buscar posibles evidencias de ruptura superficial de la falla.

Esta expedición visitó la costa del Caribe desde Boca de Matina al noroeste de Puerto Limón, hasta la isla de Bastimentos y Bocas del Toro en la Bahía de Almirante, Panamá. Este trabajo concluyó que los cambios de elevación de la costa están en un rango de 0.20 m. a 1.50 m. Estos cambios fueron determinados utilizando criterios biológicos relacionados con el crecimiento de algas y corales, morfología de las playas, altura y depósitos de mareas y entrevistas con pobladores de las costas. La cuantificación de los mismos se realizó utilizando un nivel de mano y miras plegables. Este estudio concluyó además que se había producido un tsunami a pocos minutos del evento principal y que no se había producido ruptura en superficie de la falla principal.

Una de las razones por las cuales la medición de la deformación cosísmica se ha realizado en forma expedita

después de ocurrido el evento principal es porque en OVSICORI-UNA hace más de tres años se había constituido un grupo de trabajo interesado en la documentación de la deformación cosísmica de los grandes eventos que ocurren en el país. Este trabajo se ha venido realizando en forma conjunta con la Dra. Karen C. McNally de la Universidad de California en Santa Cruz quien ha facilitado equipo y otros recursos para realizar estudios de deformación cosísmica en Costa Rica. La metodología empleada había sido escogida como la más idónea en caso de ocurrencia de deformación cosísmica de la magnitud observada en este sismo.

El itinerario de nivelación trigonométrica fue realizado sobre bancos de nivel establecidos en distintas épocas por el Instituto Geográfico Nacional, todas previas al terremoto.

Aunque los resultados de este trabajo pueden ser utilizados con fines científicos, el mismo tiene también aplicación práctica inmediata. El trabajo se propuso los siguientes objetivos: Realizar un control vertical de la red existente con el fin de cuantificar la deformación cosísmica en Puerto Limón y alrededores, por comparación con los niveles obtenidos para épocas anteriores. Además, obtener parámetros para utilizar como referencia en modelos que combinan información sismológica y geodésica para explicar la geometría de la falla responsable del evento principal. La aplicación práctica más importante de este trabajo es brindar información sobre el fenómeno ocurrido a instituciones públicas o privadas cuya actividad pueda verse afectada por el levantamiento. Tal es el caso de Acueductos y Alcantarillados, Recope, Municipalidad de Limón, Japdeva, Senara y Compañías Bananeras del Atlántico.

EL DATUM ALTIMETRICO

Los oceanógrafos físicos de la Universidad Nacional laboran en la actualidad en definir un datum o cero altimétrico a través de la instalación de dos mareógrafos, uno en el muelle Moín y otro en el muelle Alemán, ya que desafortunadamente no había ningún mareógrafo en operación durante el terremoto. Sin embargo, esta tarea requerirá varios años de observación. Cuando este datum se obtenga deberá realizarse una corrección a los datos aquí presentados.

Ante la inexistencia de un datum altimétrico se procedió a escoger como cero altimétrico puntos de la red en donde el levantamiento de la costa de Plafker et al (1991) sugirió la inexistencia de cambios cosísmicos. Así por ejemplo, el banco de nivel (S-34) de Nueve Millas recibió una elevación de -6 mm con respecto a la altura asignada previamente al sismo o sea dentro de la precisión aceptable para el levantamiento.

Además, nuestro levantamiento reproduce al centímetro los montos del levantamiento estimados por Plafker et al (1991) sobre coral de fuego que son considerados los de mayor precisión dentro de su juego de datos. Por ejemplo, tanto nuestra nivelación como Plafker et al (1991) asignan un levantamiento de 0.92 m en Piuta.

CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra localizada entre los paralelos $9^{\circ}54'$ a $10^{\circ}5'$ de latitud norte y los meridianos 83° y $83^{\circ}20'$ de longitud oeste, y corresponde con la ciudad de Puerto Limón y alrededores.

Con base en la terminología que incorpora los conceptos de la Tectónica de Placas, la esquina SE de Costa Rica corresponde a la zona trasarco. Geológicamente, la zona de estudio está ubicada en la Cuenca de Limón de Dengo (1968), una cuenca sedimentaria caracterizada por rocas de la plataforma continental, plegadas y afalladas cuya edad oscila entre el Cretácico y el Terciario Superior. El sistema de fallas inversas del norte de Panamá intersecta la costa del Caribe en la vecindad de Puerto Limón. La esquina SE de Costa Rica está por lo tanto caracterizada por la existencia de un ambiente tectónico altamente compresivo que produce el fallamiento inverso. En general, la naturaleza boyante de la placa del Coco en la mitad sur de Costa Rica (Protti, 1991) induce grandes esfuerzos en la placa del Caribe que se traducen en una alta compresión de ésta última que genera el sistema de fallas inversas del norte de Panamá (ver figura 1).

Sismotectónica

El evento principal del sismo del Valle de La Estrella está ubicado a $9^{\circ}39'$ de latitud norte y $83^{\circ}06'$ de longitud oeste y una profundidad de foco de 17 Km. El mecanismo focal realizado para el evento principal indica un fallamiento de tipo inverso con un plano de falla, interpretado como el plano de ruptura, buzando 40 grados hacia el suroeste o sea debajo de la cordillera de Talamanca (Montero et al., 1991). Dadas las características de los sistemas de fallas inversas a nivel mundial, el ángulo de buzamiento de la falla disminuye hacia el Este hasta ser casi horizontal a medida que la profundidad entre la superficie y el plano de la falla disminuye.

Otro grupo de eventos están alineados en forma paralela a la costa, entre el área epicentral y la costa del Caribe. Los eventos mostraron un fallamiento con dos planos uno casi horizontal y otro casi vertical que se interpretan como fallas de cuña que nacen en profundidad a partir del plano de falla principal y alcanzan la superficie en forma casi perpendicular a ésta.

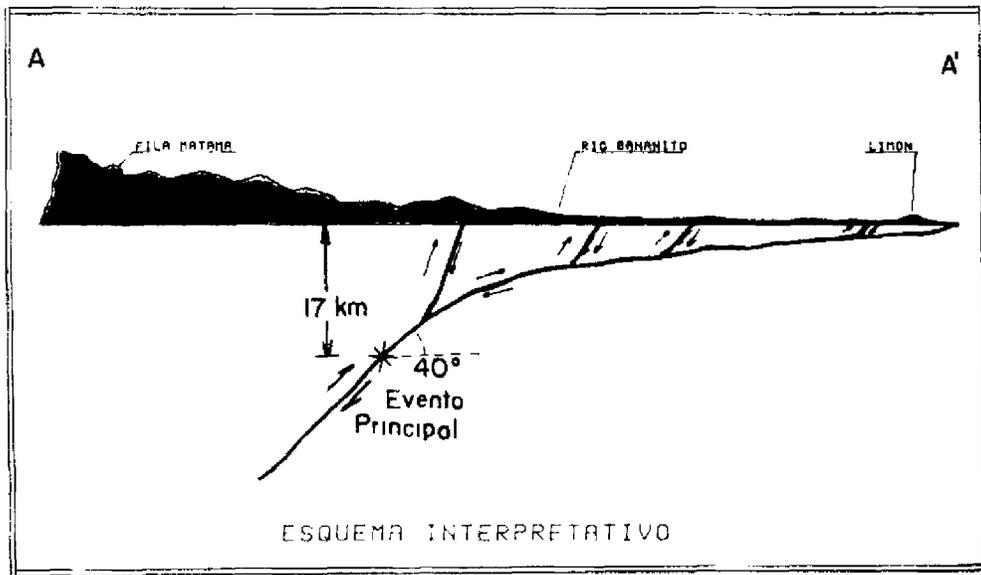
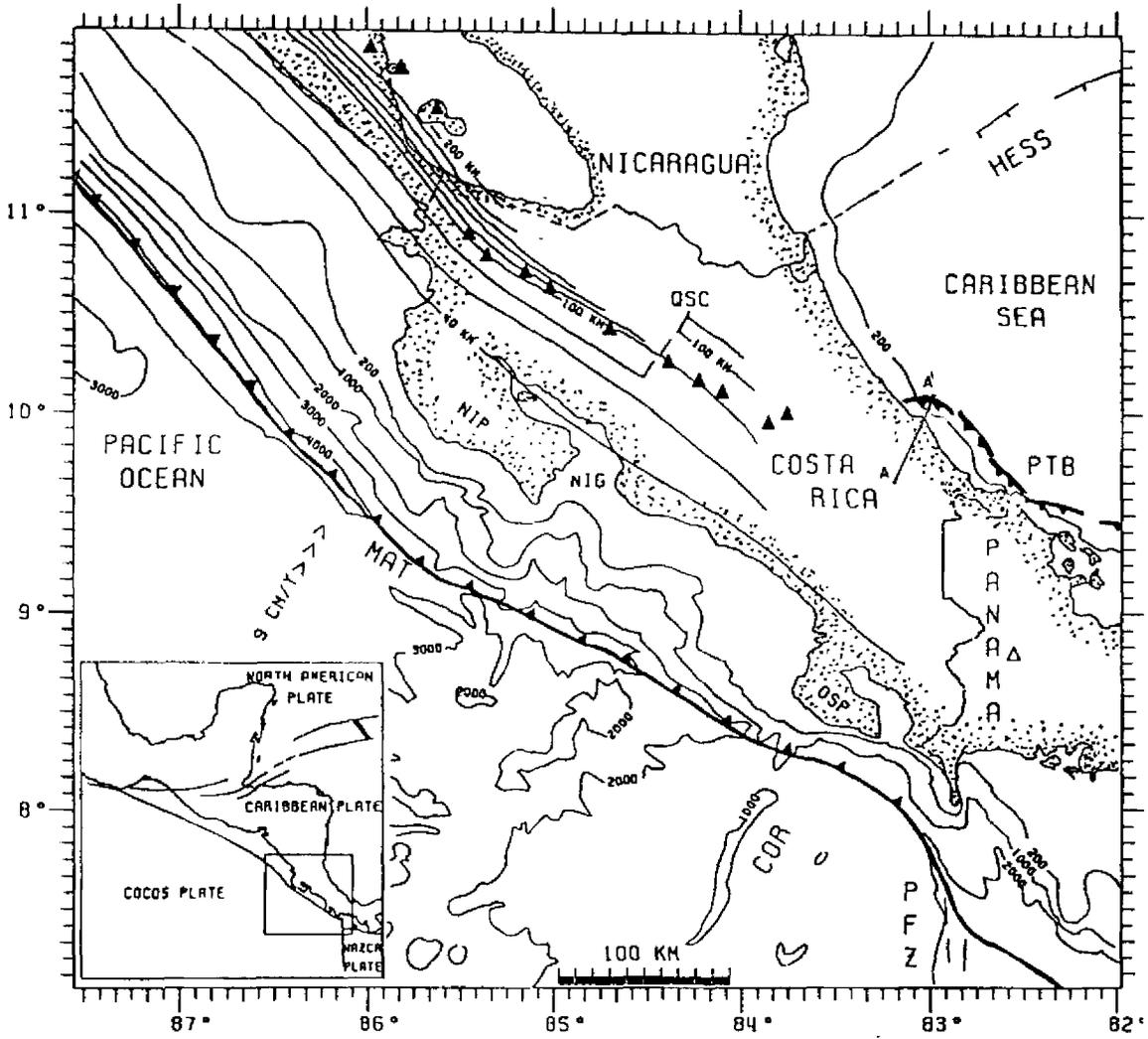


Fig. 1 Mapa geotectónico de Costa Rica, además un esquema interpretativo del comportamiento de la falla después del evento del 22 de abril de 1991. (Montero et. al. 1991).

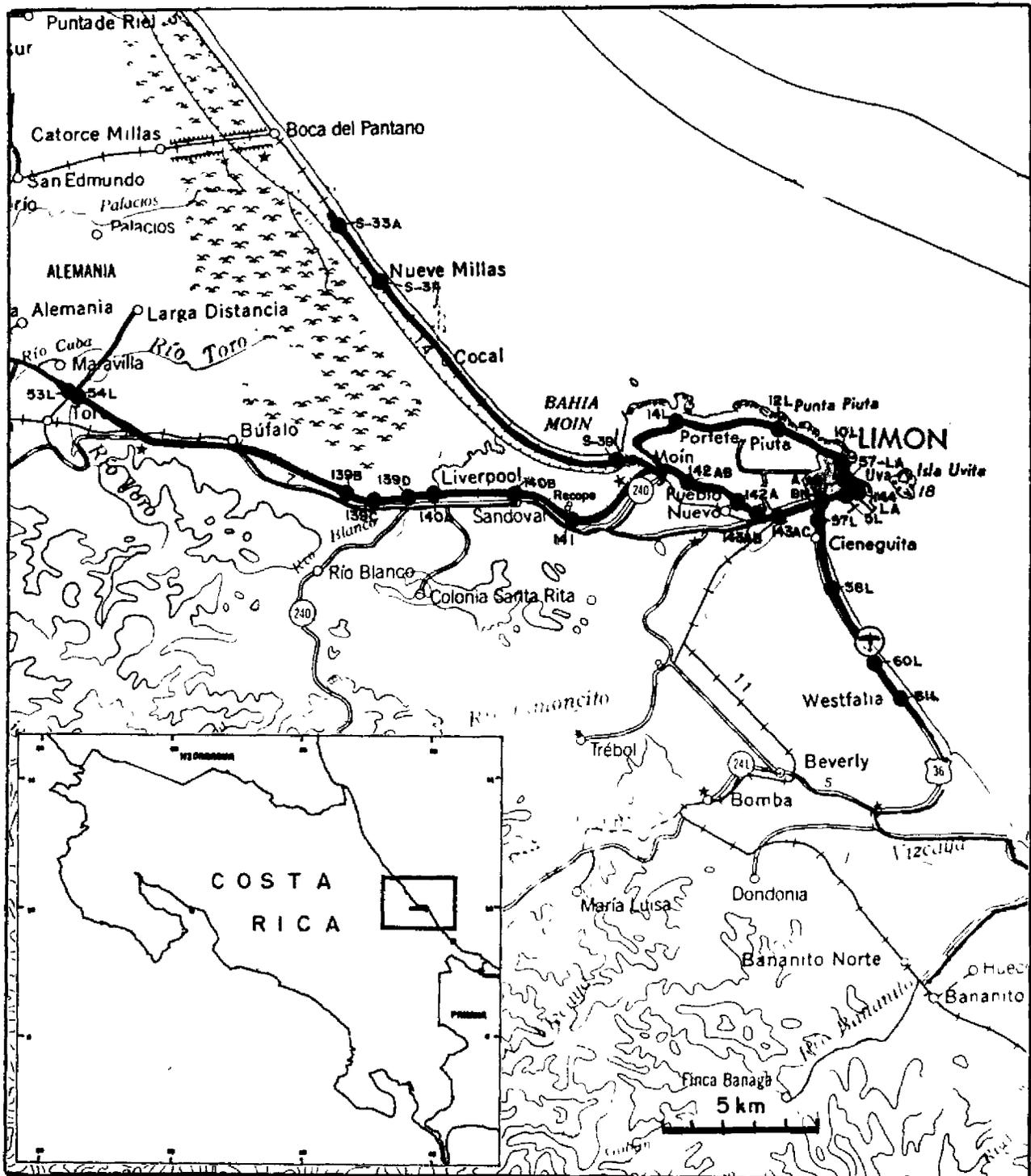


Fig. 2 Mapa que muestra Puerto Limón y alrededores. Las líneas de nivelación de este estudio aparecen a trazos gruesos.

La extensión de la zona de ruptura ha sido definida por la ocurrencia de sismos con mecanismos focales que no corresponden al mecanismo focal del evento principal o fallas de cuña asociadas al mismo. La extensión NW de la zona de ruptura está ubicada al sur de Batáan y corresponde a los mecanismos con fallas de desplazamiento de rumbo que representan la proyección tierra adentro del sistema de fallas del norte de Panamá. Fallas con este tipo de movimiento ocurren también en la fuente sísmica de Moravia de Chirripó, activada a raíz del terremoto y podrían sugerir que la prolongación tierra adentro del sistema de fallas inversas del norte de Panamá se manifieste primero como fallas de corrimiento lateral con dirección EW y que luego cambie de rumbo en dirección NE-SW siguiendo la dirección del Río Chirripó Duchi.

La extensión SE de la zona de ruptura está dada por el mecanismo focal del sismo del 4 de mayo con epicentro en Bocas del Toro a pocos kilómetros de la frontera con Costa Rica que corresponde a un fallamiento normal (Montero et al., 1991).

METODOLOGIA

Para realizar ésta investigación fué necesario llevar a cabo algunos trabajos preliminares como la recopilación de la información existente: hojas topográficas 1:200.000 (Limón), y 1:50.000 (Moín, Río Banano), compilación de la descripción de monumentos, coordenadas y alturas en los archivos del Instituto Geográfico Nacional.

Siempre que se va a realizar un trabajo de nivelación, se debe analizar la exactitud requerida, para la escogencia del método e instrumental adecuado. En el presente trabajo se eligió la nivelación trigonométrica por cuanto reúne criterios de precisión, rapidez y costos deseable para la magnitud del cambio observado. Además de que el instrumental con que cuenta el OVSICORI posibilita la realización de nivelación trigonométrica.

Este método aunque ligeramente menos preciso que la nivelación geométrica permite exactitudes de 5 mm. a 10 mm. por kilómetro de recorrido. El instrumental utilizado consistió en un teodolito informático al medio segundo WILD T2000 (exactitud $\sigma_{\alpha} = \pm 0.5''$) y un distanciómetro electrónico WILD DI3000 con alcance máximo de 14 km. y un error medio de $\pm(5 \text{ mm} + 1\text{ppm})$.

La gran densidad de bancos de nivel encontrados en la vecindad de la Ciudad de Puerto Limón que fue uno de los incentivos principales para desarrollar este proyecto resultó no corresponder con la realidad. Numerosos monumentos

ocupados por las líneas de nivelación preexistentes fueron encontrados en mal estado, dañados por el sismo o por los esfuerzos de reconstrucción iniciados inmediatamente después del mismo.

Completada la fase de compilación de información y control en el campo, se procedió a la definición de los itinerarios a nivelar que se detallan a continuación. El primer tramo de nivelación consistió en una circunvalación de la ciudad de Limón, saliendo del BN 12-L y regresando al mismo punto haciendo un recorrido de 15 km. (ver Fig. 4). El segundo tramo consistió en una línea paralela a la costa en la parte nor-oeste desde el BN S-39 hasta Nueve Millas. (ver Fig. 5). El tercer tramo se ubica al SE de la ciudad de Puerto Limón partiendo desde Cieneguita BN L1 hasta Westfalia pasando por el superpunto LIMON-2 (58-L), que se encuentra en el aeropuerto y que forma parte de la red regional CASA (Central America-Sur America) de GPS (Sistema de Posicionamiento Global), hasta el BN 61-1 recorriendo unos 7 km. (ver Fig. 6). El cuarto tramo de nivelación se inició desde el puerto de Moín (BN S-39), pasando por la Refinadora Costarricense de Petróleo (Recope), Sandoval, Liverpool, Río Madre hasta los ríos Toro y Rojo, sobre la carretera principal que va de Limón a Siquirres haciendo un recorrido de unos 16 km. (ver Fig. 7).

PROCEDIMIENTOS DE CAMPO Y ANALISIS DE ERRORES

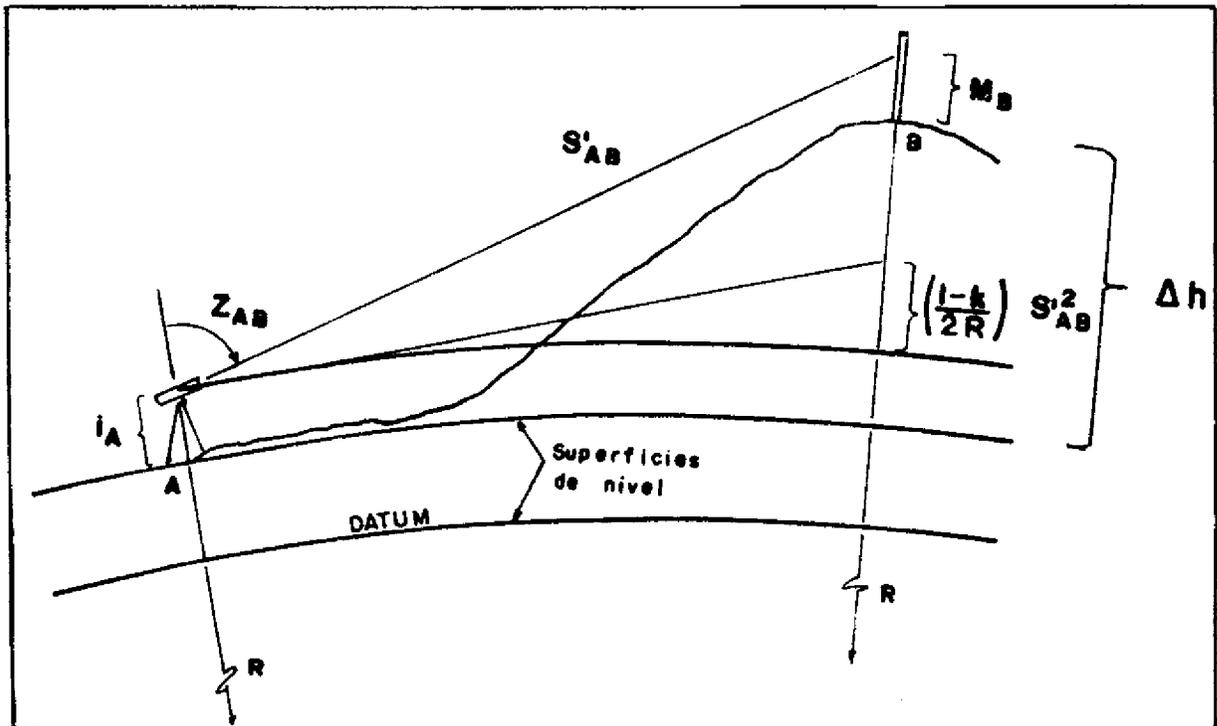


Fig. 3 Nivelación Trigonométrica

Las diferencias de elevación entre dos puntos A y B se obtienen de la siguiente manera:

$$\Delta H_{AB} = S_{AB} \cos Z_{AB} + \left(\frac{1-k}{2R} \right) S_{AB}^2 + i_A - M_B \quad (1)$$

siguiendo a Blachut (1981).

donde ΔH_{AB} indica la diferencia de alturas $H_B - H_A$

S_{AB} es la longitud inclinada AB

Z_{AB} ángulo vertical medido en A (a partir del cenit)

$k = 0.13$ que es el coeficiente de refracción,

$R = 6357881.444$ m. radio de la tierra (Sistema Lambert, de Costa Rica.)

i_A altura del eje horizontal del teodolito en A,

M_B altura de la señal sobre el punto B.

La nivelación trigonométrica se realiza observando ángulos verticales y la distancia horizontal o la distancia inclinada entre dos puntos (ver fig. 3).

La principal fuente de error al determinar la diferencia de elevación es la inseguridad en la corrección por curvatura y refracción causada por las variaciones en las condiciones atmosféricas. Por otro lado las observaciones están sujetas a los errores aleatorios y sistemáticos. Los errores aleatorios son causados por variaciones impredecibles en los instrumentos, factores ambientales y procedimientos, pueden reducirse por medio del control sistemático de los datos en el campo, pero no eliminarse. Los errores sistemáticos son el resultado de inexactitudes en los instrumentos y cambios atmosféricos. Estos se pueden reducir por medio de procedimientos en las técnicas de campo o ser parcialmente eliminados aplicando correcciones a los datos.

PROPAGACION DE ERRORES:

A partir de la fórmula (1) se deriva parcialmente ($\partial \Delta H$) respecto a cada uno de los elementos y se utilizan los errores medio cuadráticos a priori (σ_x) de los instrumentos, de modo:

Para la Distancia $\sigma_s = \pm(5\text{mm} + 1 \text{ ppm})$
 Para los ángulos $\sigma_z = \pm 1''$
 Para las alturas

(Instrumento y prisma) $\sigma_{i_A} = \sigma_{M_B} = \pm 1.5 \text{ mm}$

(refracción y curvatura) $\sigma_{(c+r)} = \pm 1 \text{ mm}$

Luego:

$$\sigma^2 \Delta H_{AB} = \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial S}\right)^2 \sigma_s^2 + \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial Z}\right)^2 \sigma_z^2 + \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial (c+r)}\right)^2 \sigma_{(c+r)}^2 +$$

$$\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial i_A}\right)^2 \sigma_{i_A}^2 + \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial M_B}\right)^2 \sigma_{M_B}^2$$

Se obtiene entonces el error medio cuadrático para una
 diferencia de altura: $\Delta H_{AB} \pm \sigma_{HAB}$

Para un tramo de nivelación, la diferencia de altura es:

$$\Delta H_{1-n} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots \Delta H_n$$

El error propagado se calcula de la siguiente forma:

$$\sigma^2 \Delta H_{1-n} = \sigma^2_1 + \sigma^2_2 + \dots \sigma^2_n$$

Así el resultado se obtiene $\Delta H_{1-n} \pm \sigma_{1-n}$

Aquí se tiene que destacar que los mejores resultados del trabajo se encuentran en el primer circuito de nivelación (primer itinerario) ya que se contó con mayor cantidad de monumentos en buen estado, buenos controles en los cierres y por ende una mejor resolución en los resultados. De éste primer circuito parten el resto de los ramales tanto hacia el noroeste y al sureste por la costa, así como el ramal que va tierra adentro rumbo a Siquirres. En estos últimos la resolución se ve sensiblemente disminuída a medida que nos alejamos del centro de Puerto de Limón, debido a la misma propagación de los errores instrumentales con la distancia y a un menor número de controles de cierre.

Para el cálculo y procesamiento de los datos se utilizaron diferentes programas basados en los algoritmos y procedimientos anteriores obteniéndose los resultados ó las alturas postevento, que luego se compararon con las alturas preventivo. El resultado de la comparación es el listado de

desplazamientos verticales que son el resultado neto de la deformación cosísmica.

Presentación de los Datos Obtenidos

Se utilizaron bancos de nivel (BN) pertenecientes a la red altimétrica, establecida originalmente por el Instituto Geográfico Nacional. Estos tienen distintos nombres y orden, entendiéndose el orden como jerarquía en la exactitud, en este caso las series S y L son de primer orden, mientras que las A, AB, LA pertenecen al segundo orden y el BN L-1 al tercer orden respectivamente. El BN BEL-09 ubicado en el plantel de Recope, fue establecido por una empresa particular con el fin de utilizarlo en el control vertical del plantel para RECOPE. La elevación de este BN fue obtenida a partir de puntos de primer orden de la red de Instituto Geográfico Nacional como el S-39 (Moín) y el 141 (Río Bartolo).

Debido a los montos de la deformación cosísmica y al método empleado en la nivelación, se han utilizado todos los datos de nivelación preexistente independientemente del orden de jerarquía original del banco de nivel. El mapa de la figura 9 presenta la distribución de los bancos de nivel utilizados.

Cuando se ocuparon algunos BN ubicados en puentes sobre la carretera Saopín se enfrentó el problema de que las placas de los BN se encontraban en las secciones colapsadas o alteradas por la maquinaria encargada de la reconstrucción. En esos casos se tomó como cierta la elevación del centro del puente cuando una revisión de la estructura indicó que la misma no había sufrido cambios apreciables en la parte central. Este problema ocurrió principalmente en el tramo Moín-Río Rojo sobre la carretera Saopín.

Para cada tramo de nivelación se presenta un resumen de los datos obtenidos en una tabla y dos gráficos. El primer gráfico presenta la comparación de las alturas postevento documentadas por esta investigación (1991) y las alturas prevento. El segundo gráfico presenta el levantamiento cosísmico. Los términos y contenido de las tablas se describen a continuación.

HITO: Corresponde a los nombres de los bancos de nivel (BN) o "bench marks" reocupados.

ESTE Y NORTE: Son coordenadas planas del sistema Lambert, obtenidas del mapa, hojas topográficas escala 1:50000, Moín y Río Banano del Instituto Geográfico Nacional.

EPOCA 1: Son las alturas en metros (m), todas previas al sismo, establecidos desde 1948 a 1978. Corresponden a nivelaciones geométricas de precisión de 1^o, 2^o y 3er. orden, determinadas por el Instituto Geográfico Nacional

según detallamos.

BN 141 = 1948

BN 139-B, 139-C, 139-D, 140-A, 140-B, 141, 142-A, S-39, S-33A, S-34 = 1958

BN 53-L, 54-L, 57-LA, 57-L, 58-L, 60-L, 61-L, 14-L, 12-L, 10-L, 144-LA, 5-L, 11-A, AyA BN-1, 143-AB, 143-AC, 142-AB = 1978

BEL-09 = 1978 establecido a partir del S-39 y 141

RECOPE-2 = 1978 establecido dentro del plantel.

EPOCA 2: Corresponde a las nuevas alturas en metros (m), encontradas después del sismo del 22 abril de 1991 y obtenidas con nivelación trigonométrica.

σ : Es el error medio cuadrático de las alturas de la época 2

DESPLAZ: Es el desplazamiento o diferencias encontradas entre las alturas nuevas y las alturas viejas.

LUGAR: Es el nombre del lugar en donde se encuentra el hito.

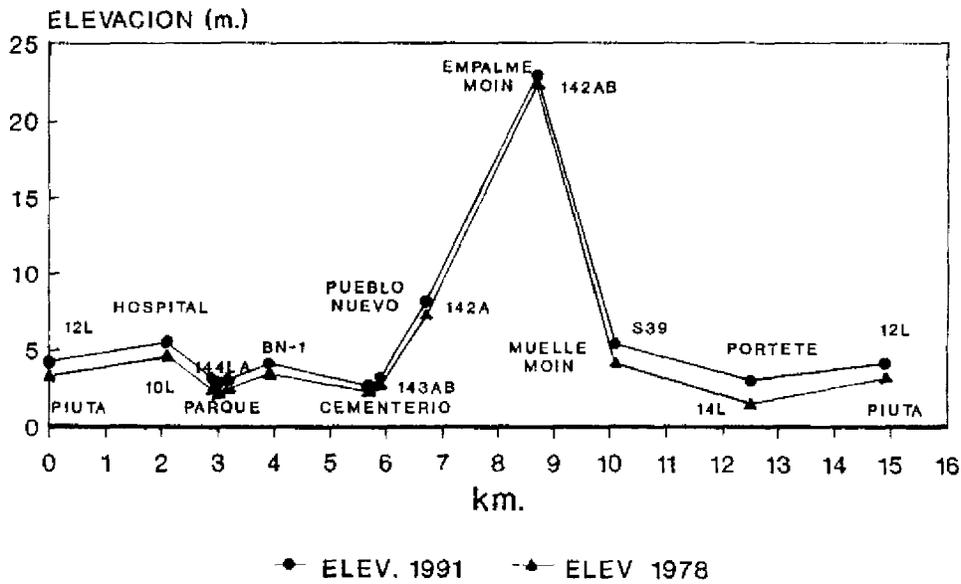
En la primera etapa, se encuentra la circunvalación de Puerto Limón, saliendo del Portal o Piuta, BN 12-L pasando por el Parque, siguiendo por el ferrocarril, llegando hasta el Muelle Moín y regresando a Piuta o sea al BN 12-L.

TABLA 1 NIVELACION CENTRO DE LIMON
COORDENADAS ELEVACIONES

HITO	ESTE	NORTE	EPOCA 1	EPOCA 2	σ	DESPLAZ	LUGAR
12-L	641400	221515	3.264	4.184	± 0.005	0.92	Piuta
10-L	643000	220600	4.582	5.506	± 0.008	0.92	Hospit
57-LA	643250	219900	2.39	3.082	± 0.010	0.69	Parque
144-LA	643300	219750	2.101	2.76	± 0.010	0.66	Parque
5L	643130	219780	2.406	3.047	± 0.011	0.64	Parque
11-A	643185	219700	2.437	3.045	± 0.011	0.61	Muelle
AyA BN-1	642430	219450	3.386	4.051	± 0.012	0.67	EstFer
143-AC	641300	219150	2.605	3.159	± 0.013	0.55	EstFer
143-AB	640850	219100	2.218	2.576	± 0.014	0.36	Cement
142-A	640200	219200	7.247	8.172	± 0.015	0.92	PNuevo
142-AB	640180	219200	22.263	22.848	± 0.015	0.59	E.Moín
S-39	637500	220650	4.072	5.389	± 0.013	1.32	M.Moín
14-L	638600	221750	1.124	2.634	± 0.010	1.51	Portet

Con los datos anteriores de la tabla 1 se construyeron los gráficos de la figura 4 y los mismos muestran un levantamiento positivo a lo largo de todo el circuito, el mayor levantamiento se encuentra entre el Muelle Moín y la playa Portete con un máximo de 1.51 m. El menor levantamiento es de 0.36 m. ubicado 100 m. al este del cementerio.

CIRCUITO NIVELACION DE LIMON COMPARACION 1991 Y 1978



OVSICORI-UNA

CIRCUITO LIMON CENTRO DEFORMACION

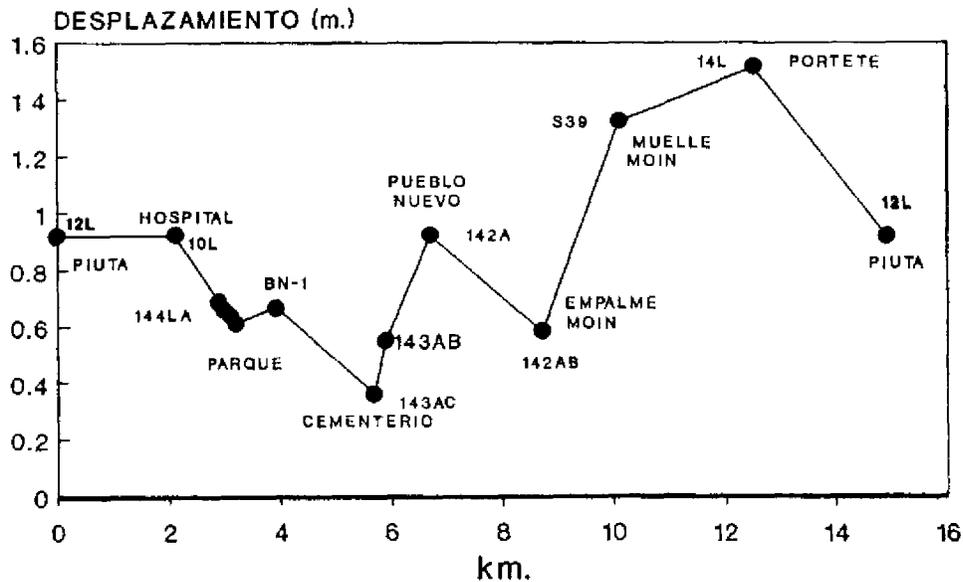


Fig. 4 Nivelación y Deformación encontrada en Puerto Limón.

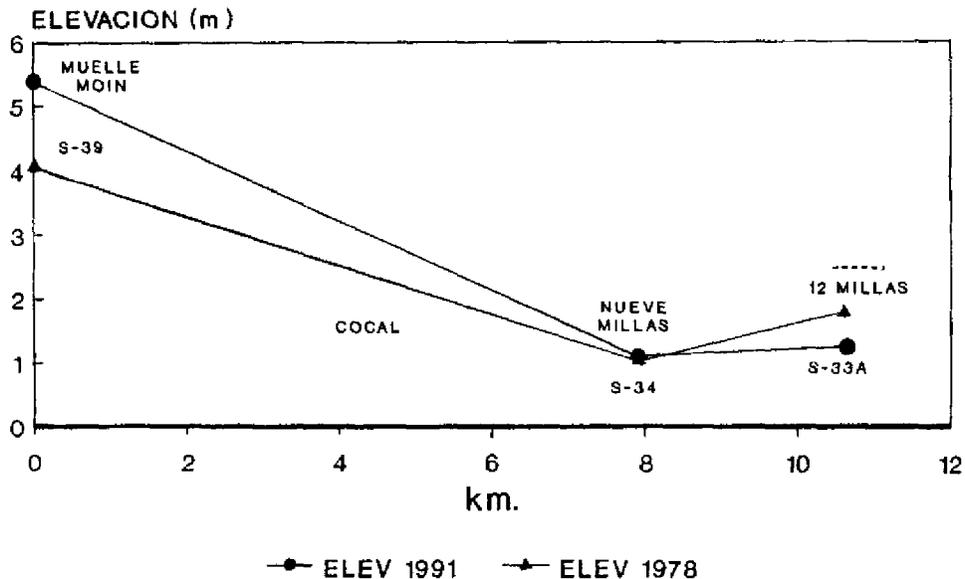
Esta segunda etapa o tramo de nivelación recorre la costa en sentido nor-oeste partiendo del Muelle Moín hacia Doce Millas.

TABLA 2 NIVELACION MOIN-DOCE MILLAS

HITO	COORDENADAS		ELEVACIONES			DESPLAZ	LUGAR
	ESTE	NORTE	EPOCA 1	EPOCA 2	σ		
S-39	637500	220650	4.072	5.389	± 0.013	1.32	M. Moín
S-34	631590	224600	1.022	1.016	± 0.020	-0.01	9 Millas
S-33A	630260	226450	1.804	1.259	± 0.022	-0.55	9 Millas

Aquí se puede notar que desde el Muelle de Moín disminuye el levantamiento hasta encontrar un cero en Cocal, específicamente en el monumento S-34, y luego una subsidencia después de Nueve Millas o sea en el monumento S-33A. (Ver fig. 5)

TRAMO MOIN - DOCE MILLAS COMPARACION 1991 - 1978



OVSICORI-UNA

TRAMO MOIN - DOCE MILLAS DEFORMACION

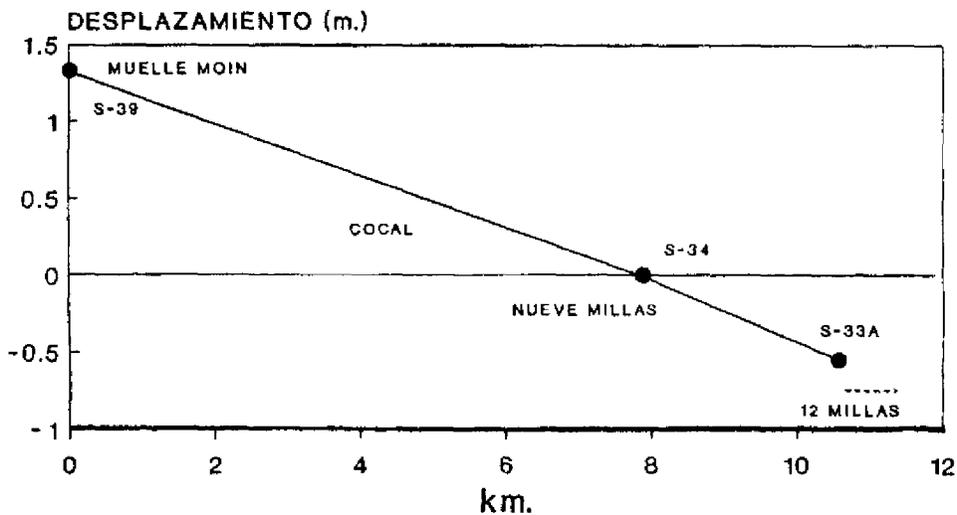


Fig 5 Nivelación y Deformación entre Moín y Doce Millas

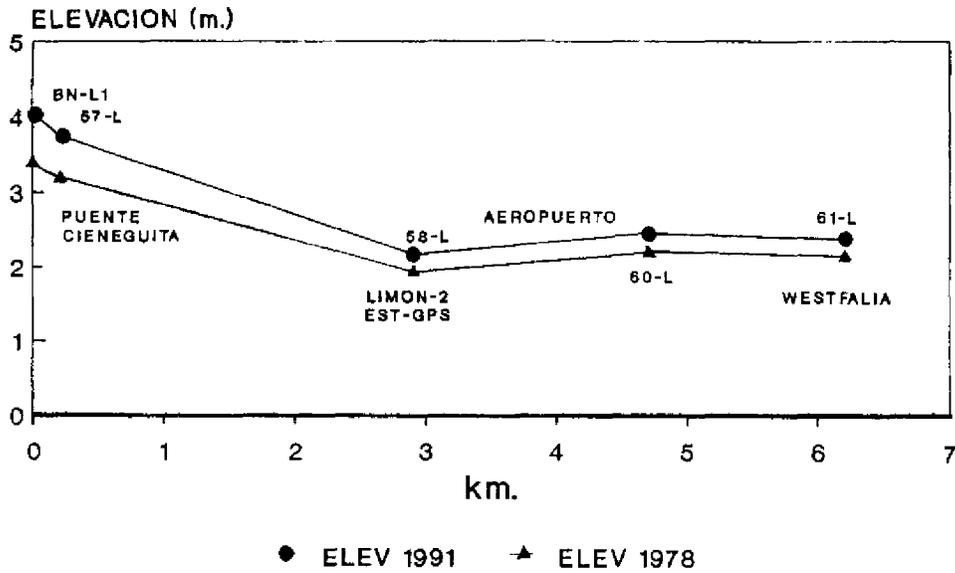
Este tramo costero parte en sentido sur-este desde la entrada a Cieneguita, pasando por el puente del mismo nombre, recorriendo el aeropuerto y llegando hasta la escuela de Westfalia. (Ver tabla 3 y figura 6)

TABLA 3 NIVELACION CIENEGUITA-WESTFALIA

HITO	COORDENADAS		ELEVACION			DESPLAZ	LUGAR
	ESTE	NORTE	EPOCA 1	EPOCA 2	σ		
AyA BN-1	642430	219450	3.386	4.051	± 0.012	0.67	EstFer
57-L	642400	219200	3.193	3.742	± 0.012	0.55	P. Cien.
58-L	643100	216790	1.925	2.154	± 0.015	0.23	Aerp.N.
60-L	644120	215250	2.196	2.446	± 0.015	0.25	Aerp.S.
61-L	644700	214350	2.144	2.389	± 0.018	0.24	Westfalia

En este tramo toda la deformación es positiva, al igual que en el circuito de Limón centro, con la característica que desde el aeropuerto hacia el SE la diferencia entre las alturas viejas y nuevas son casi constantes. (Ver figura 6)

TRAMO CIENEGUITA - WESTFALIA COMPARACION 1991 - 1978



OVSICORI-UNA

TRAMO CIENEGUITA - WESTFALIA DEFORMACION

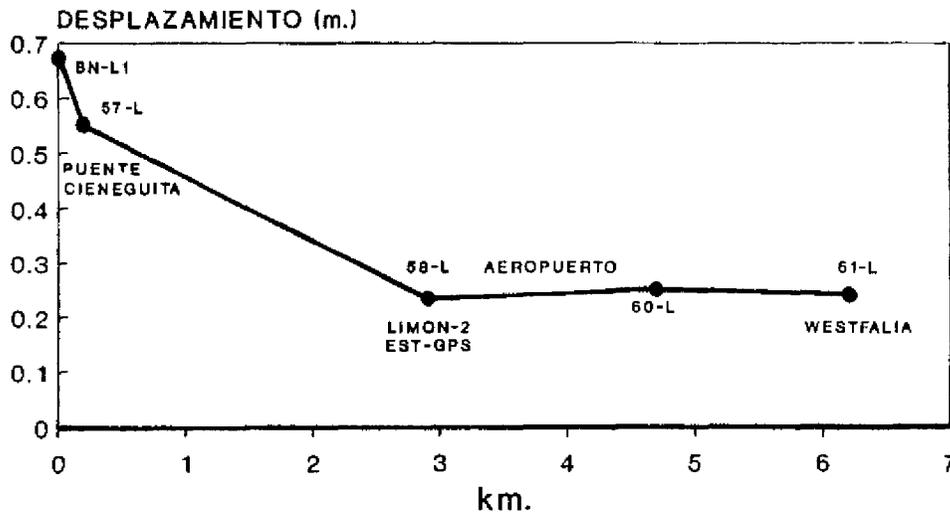


Fig. 6 Nivelación y Deformación Cieneguita-Westfalia

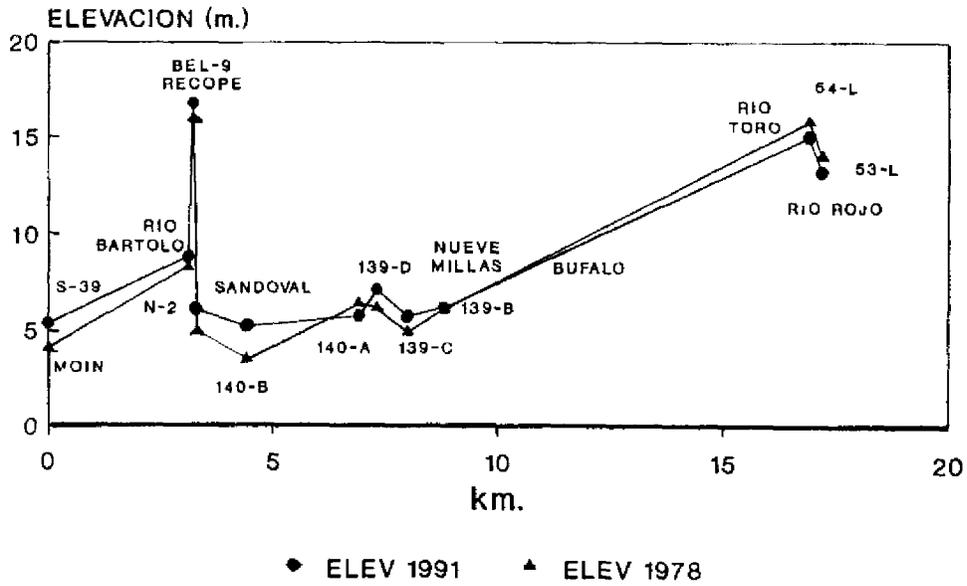
Esta etapa se inicia en el Muelle de Moín y se continúa tierra adentro hacia Siquirres en sentido este-oeste por la carretera Saopín. (Ver tabla 4)

TABLA 4 NIVELACION MOIN-RIO ROJO

HITO	COORDENADAS		ELEVACION			DESPLAZ	LUGAR
	ESTE	NORTE	EPOCA 1	EPOCA 2	σ		
S-39	637500	220650	4.072	5.389	± 0.013	1.32	M. Moín
141	635975	219190	8.306	8.794	± 0.016	0.49	RBartolo
BEL-09	635850	219050	15.98	16.768	± 0.016	0.79	Recope
RECOPE-2	635880	219517	4.986	6.109	± 0.016	1.12	Recope
140-B	633990	219780	3.517	5.264	± 0.017	1.75	Sandoval
140-A	632480	219780	6.453	5.78	± 0.019	-0.67	R.Blanco
139-D	631990	219790	6.225	7.173	± 0.019	0.95	Liverpoo
139-C	631400	219750	4.971	5.781	± 0.019	0.81	Liverpoo
139-B	630550	219700	6.14	6.268	± 0.020	0.13	9 Millas
54-L	622990	222400	15.867	15.072	± 0.024	-0.79	Río Toro
53-L	622800	222570	14.092	13.242	± 0.025	-0.85	Río Rojo

Este fue el segmento de la nivelación más irregular porque de Moín hacia Siquirres se encontró un levantamiento cosísmico muy variable. Un máximo se ubica en Sandoval (1.75 m) y subsidencia en el Río Blanco (-0.67 m), luego otro levantamiento en Liverpool (0.95 m) y subsidencia en Río Toro (-0.79 m) y Río Rojo (-0.85 m). (Ver Figura 7).

TRAMO MOIN - RIO ROJO COMPARACION 1991 - 1978



OVSICORI-UNA

TRAMO MOIN - RIO ROJO DEFORMACION

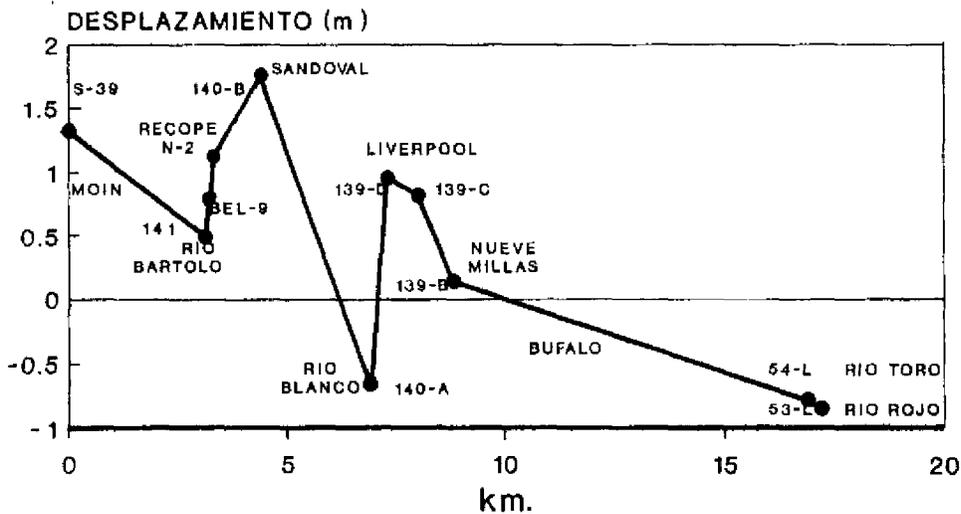


Fig. 7 Nivelación y deformación Moín-Río Rojo

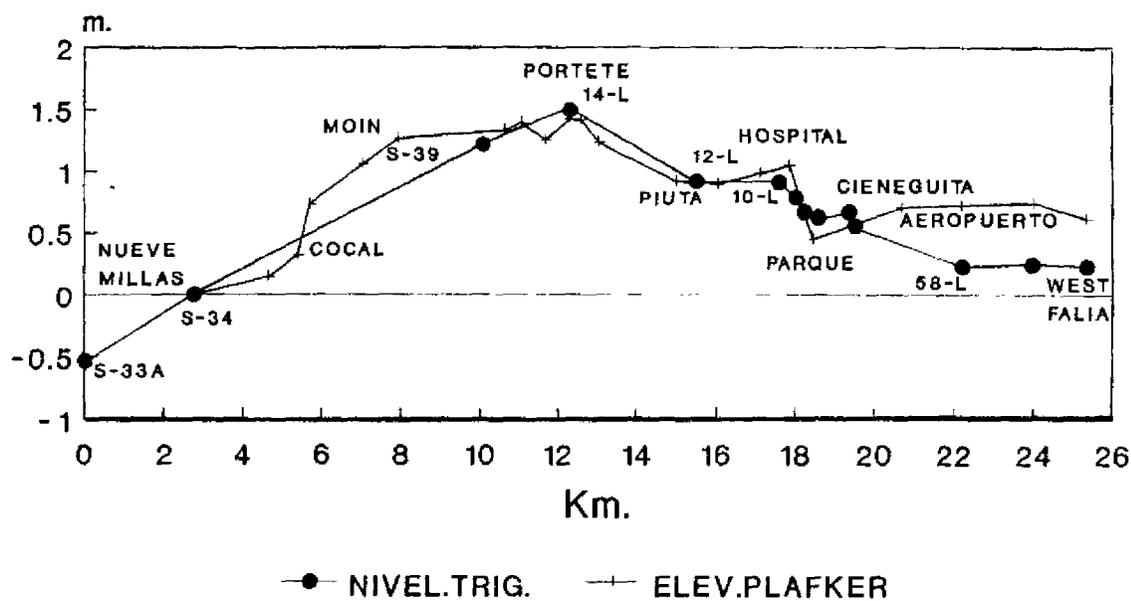
CAMBIOS COSISMICOS DOCUMENTADOS POR METODOS DIFERENTES:

Se realizaron comparaciones entre los datos obtenidos por la expedición de reconocimiento costero realizado por Plafker et al. (1991) y la nivelación trigonométrica realizada por esta investigación. El tramo escogido para realizar la comparación va de Nueve Millas pasando por Moín, Portete, Piuta, Hospital, Muelle Japdeva, Cieneguita, Aeropuerto llegando hasta Westfalia.

El propósito de este análisis es comparar el levantamiento documentado a lo largo de la costa, con aquel encontrado para los BN ubicados a lo largo de las caminos y líneas férrea adyacentes a la línea de costa. Los métodos utilizados por Plafker et al. (1991) para la determinación del levantamiento costero tienen una exactitud desde ± 0.10 m a ± 0.20 m. Las observaciones de la deformación cosísmica a lo largo de la costa tienen mejor precisión cuando provienen de puntos costeros que toman como referencia el coral de fuego, desmejorándose la misma cuando provienen de playas arenosas. La nivelación trigonométrica reproduce al centímetro las alturas obtenidas en el recorrido costero. (Ver figura 8)

El resultado de la comparación entre ambas mediciones muestra una correlación muy buena entre ambos juegos de datos para el sector comprendido entre Moín y Cieneguita si tomamos en cuenta que no se ocuparon exactamente los mismos puntos en ambos estudios. En este sector precisamente es donde el trabajo de Plafker et al. (1991) obtuvo datos de más alta precisión. En contraposición, las discrepancias mayores se encuentran al noroeste y al sureste de Puerto Limón, en puntos medidos sobre playas arenosas por Plafker et al. (1991).

DEFORMACION COSISMICA COMPARACION PLAFKER Y NIV. TRIG. TRAMO COSTERO COCAL-WESTFALIA



OVSICORI-UNA

Fig. 8 Comparación entre el reconocimiento de Plafker et al (1991) y la nivelación trigonométrica del presente trabajo.

DESCRIPCION DE LOS PATRONES DE DEFORMACION OBSERVADOS

El levantamiento cosísmico del terremoto del 22 de abril de 1991 ($M_s=7.5$) documentado en Puerto Limón y alrededores se ha dividido en dos perfiles, para efectos de su descripción, un perfil costero, orientado al noroeste y sureste de Puerto Limón por unos 26 km., y el otro perfil orientado este-oeste, tierra adentro recorre 8 km del Muelle Alemán al Muelle Moín y después unos 18 km desde Moín hasta el Río Rojo.

Sobre éstos perfiles se ubican los desplazamientos verticales más notables. Partiendo de ellos se construyó una figura en tres dimensiones con el fin de obtener una idea global sobre la distribución espacial de la deformación cosísmica (ver figuras 9 y 10). A pesar de que ésta figura puede presentar algunas distorsiones por limitaciones del programa utilizado o por la información limitada con que se cuenta para introducirle al programa, se pueden reconocer en ella tres bloques levantados y separados por mínimos de levantamiento o subsidencia.

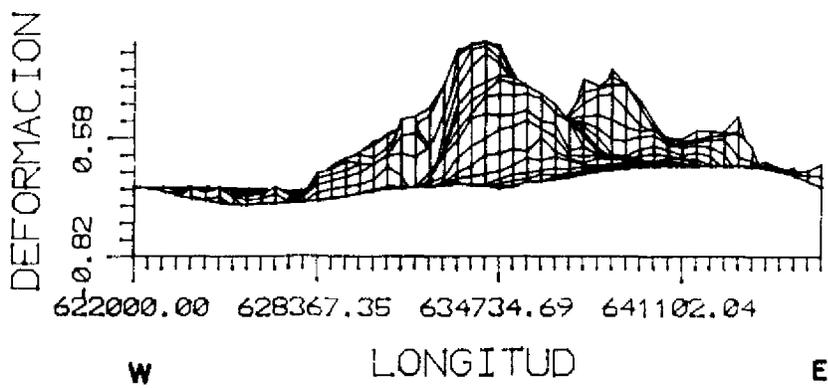
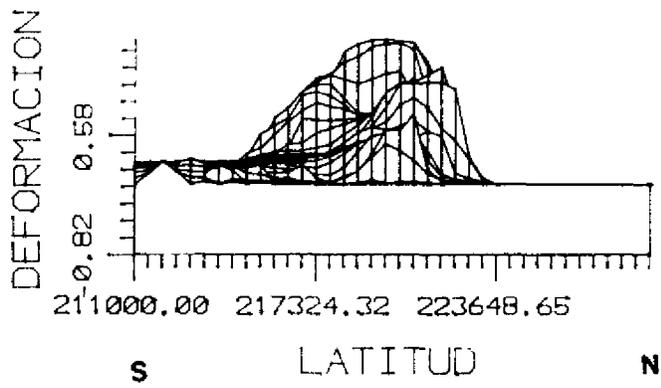
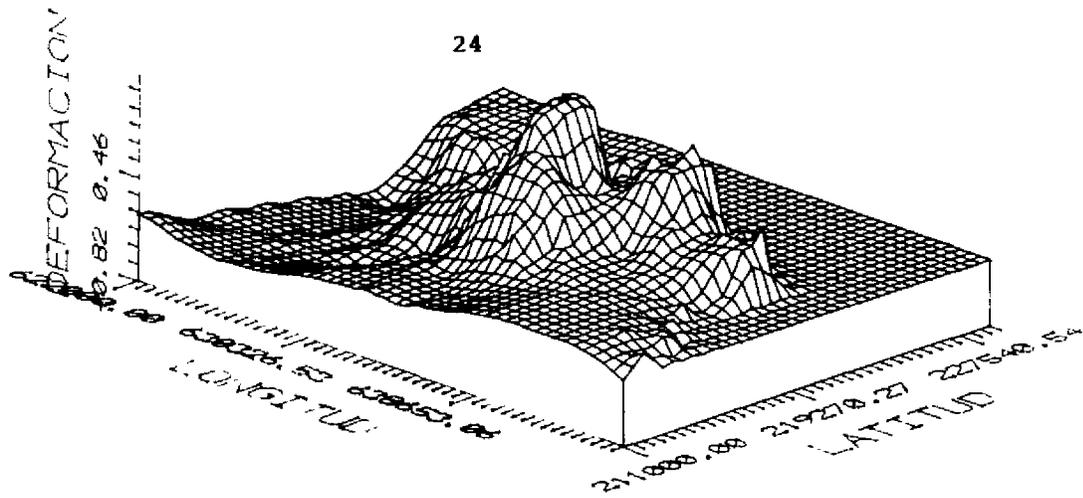


Fig. 9 Deformación en tres dimensiones de la Corteza en Puerto Limón.

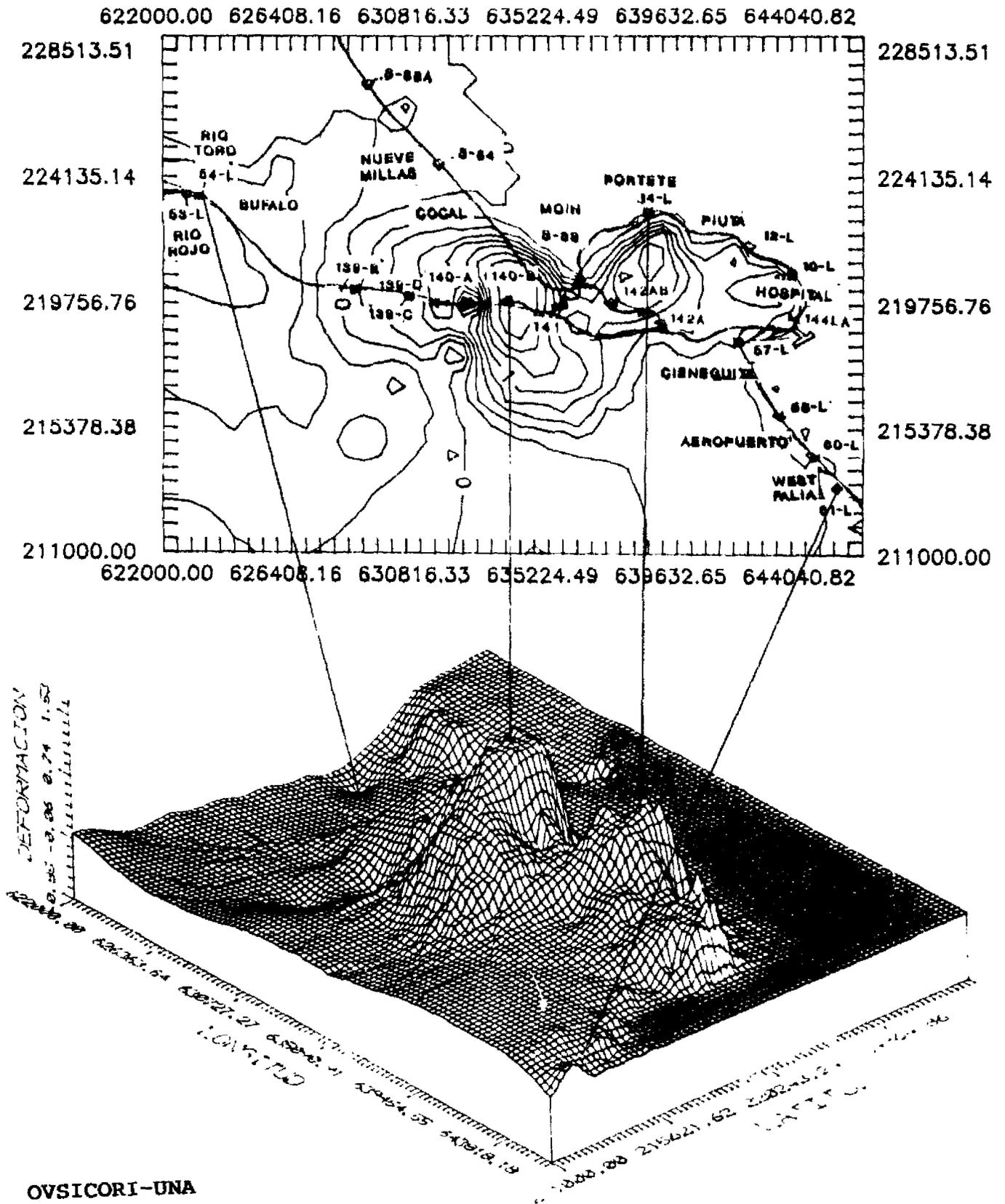


Fig. 10 Deformación de la Corteza en Puerto Limón, correlación entre vista de planta y tridimensional.

CONCLUSIONES

La remediación de bancos de nivel (BN) en Puerto Limón y alrededores, después de ocurrido el terremoto del Valle de La Estrella del 22 de abril de 1991, $M_s=7.5$, ha revelado importantes cambios cosísmicos verticales. Estos cambios se produjeron en mayor magnitud en la vecindad de Puerto Limón y disminuyen hacia el noroeste y sureste de esta ciudad.

En Puerto Limón se encontró un máximo de 1.51 m. ubicado entre el muelle de Moín y la playa Portete y un mínimo de 0.36 m. ubicado al oeste del cementerio de Limón. Los cambios de pendiente como resultado del levantamiento cosísmico de esta área no son uniformes, excepto en el sector Piuta-Hospital. Por esta razón y por su magnitud, los cambios cosísmicos inciden directamente en el régimen de drenajes y potencialmente habrán afectado a aquellas obras de infraestructura en que los cambios de nivel son importantes.

Hacia el noroeste de Puerto Limón, en el tramo Moín-Doce Millas el cambio del levantamiento decrece uniformemente. En contraste, hacia el sureste de Puerto Limón se encontró que toda la deformación cosísmica es positiva y que disminuye en magnitud a medida que la nivelación se aleja de Puerto Limón.

En el tramo de Moín-Río Rojo tres máximos y mínimos de levantamiento son observados. Ellos son el máximo de Moín (1.32 m), el mínimo de Bartolo (0.49 m), el máximo de Sandoval (1.75 m), el mínimo de Río Blanco (-0.67 m), el máximo de Liverpool (0.95 m), y el mínimo de Río Rojo (-0.85 m). Pocos kilómetros tierra adentro de Río Rojo, cerca del Río Cuba, se ha comprobado subsidencia por medio de observaciones de campo.

Se infiere un complejo patrón de levantamiento cosísmico del arrecife coralino de Puerto Limón. Se pueden reconocer tres bloques orientados al NNW-SSE que corresponden a máximos de levantamientos separados por levantamientos relativos menores o subsidencia. El sistema de fallas inversas del noroeste de Panamá intersecta la costa del Caribe en la vecindad de Puerto Limón. Este sistema al proyectarse tierra adentro orientado E-W y corresponde a fallas de desplazamiento lateral izquierdo. Esto sugiere que el gran levantamiento cerca de Puerto Limón está relacionado con movimiento cosísmico a lo largo de fallas inversas en la transición de un ambiente tectónico altamente compresivo, con fallas inversas, a un ambiente menos compresivo, con fallas de corrimiento lateral. La repetición en el tiempo geológico de numerosos terremotos similares al del Valle de La Estrella es responsable del levantamiento del arrecife coralino de Puerto Limón antes del evento del 22 de abril de 1991.

RECOMENDACIONES

Dado el levantamiento cosísmico documentado en Puerto Limón y alrededores y su posible impacto sobre la infraestructura preexistente, se justifica la realización de una densificación y reocupación de la red de nivelación con una exactitud de primer orden. Con esto se llenarían los requerimientos necesarios para el diseño y solución práctica de los problemas que pueda enfrentar cualquier obra de ingeniería preexistente, y se completarían los estudios básicos necesarios para obras de infraestructura futuras.

Se recomienda la continuación hacia el noroeste del tramo Moín-Doce Millas a fin de determinar la extensión máxima hacia el noroeste de la deformación cosísmica.

Con el fin de documentar mejor la deformación cosísmica se recomienda para el sector sureste de Puerto Limón extender la línea de nivelación hasta Beverly, Filadelfia y siguiendo por la línea del ferrocarril para cerrar el circuito en Cieneguita.

Se recomienda unir la línea de nivelación Moín-Río Toro con la línea de nivelación Doce Millas-Limón, por medio de la ocupación del camino que une la carretera Saopín con la línea férrea para continuar por la línea férrea hacia el Este hasta Doce Millas. Esto permitiría ampliar la zona de estudio, controlar la exactitud de las mediciones cerrando este gran circuito.

Finalmente recomendamos la reocupación de la red planimétrica alrededor de Puerto Limón y la toma de fotografías aéreas con control de superficie con base en los puntos altimétricos ocupados por esta investigación para tratar de documentar por métodos fotogramétricos los cambios cosísmicos. También sería de gran utilidad hacer un estudio detallado de la batimetría de la zona cercana a la costa que ha sufrido deformación cosísmica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fué posible gracias al apoyo económico de la Universidad Nacional y de la Fundación Vulcanológica y Sismológica de la América Central (FUVSAC).

La Dra. Karen McNally de la Universidad de California en Santa Cruz facilitó el equipo utilizado y recursos oportunos para asegurar el proyecto.

Nuestro agradecimiento por la colaboración aportada por Leda Araya y William Valverde del Departamento de Cálculo del Instituto Geográfico Nacional y a la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia de la Universidad Nacional. Agradecemos a la Dirección General del Catastro Nacional por haber facilitado la cuadrilla para los trabajos de campo compuesta por Javier Umaña, Luis A. González, Antonio Ramírez S. y Francisco Martínez O. del Departamento de Control Horizontal y Vertical del Catastro. Agradecemos también al Lic. Luis Malavassi, Mina Zent, y al Ing. Carlos Valverde e Ing. Leonel Altamirano del Departamento de Ingeniería de la Refinadora Costarricense de Petróleo por su apoyo en la logística para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Blachut, T. J., Chrzanowski, A., Saastamoinen, J. H., 1980 **CARTOGRAFIA Y LEVANTAMIENTOS URBANOS**. VOL 1, Dirección General de Cartografía del Territorio Nacional, 519 p., México, D.F.
- Davis, R. E., Foote, F. S., Anderson, J. M. and Mikhail, E. M. 1981, **SURVEYING, THEORY AND PRACTICE**, Sixth Edition, 995 p. McGraw Hill Book Company, U.S.A.
- Dengo, G. 1968 **ESTRUCTURA GEOLOGICA, HISTORIA TECTONICA Y MORFOLOGIA DE AMERICA CENTRAL**, ICAII, Guatemala, Centro Regional de Ayuda Técnica, AID, Vol 1, 52 p. México.
- Montero C., Segura J., Malavassi, E., Guendell, F., Gonzalez, V., Fernández, E., De Obaldía, F., Rojas, D., Rodriguez, H., Mata, A, Van der Laat, R., Barboza, V, Barrantes, O, Marino, T., McNally, K. 1991 **INFORME PRELIMINAR TERREMOTO 22 DE ABRIL 1991, Ms:7.4 VALLE DE LA ESTRELLA, LIMON, COSTA RICA, 22 p.** Instituto de Investigación, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional.
- Pelzer, H., Niemeier, W. (Editors), 1986 **DETERMINATION OF HEIGHTS AND HEIGHTS CHANGES**, Contributions to the Symposium on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe, 762 p, Ferd. Dummlers Verlag, Bonn.
- Plafker, G, Ward, S.N., Malavassi, E., Van der Laat, R, Weber, G.E. 1991 **THRUST FAULTING AND TECTONIC UPLIFT ALONG THE CARIBBEAN SEA COAST OF COSTA RICA DURING THE APRIL 22, 1991 EARTHQUAKE**, remitido a la Reunión Anual de la American Geophysical Union, San Francisco, California, 9-13 diciembre 1991.
- Ruegg, J., Kasser, M., Tarantola, A., Lepine, J. and Chouikrat, B. 1982 **DEFORMATIONS ASSOCIATED WITH THE EL ASNAM EARTHQUAKE OF 10 OCTOBER 1980: GEODETIC DETERMINATION OF VERTICAL AND HORIZONTAL MOVEMENTS**, Bulletin of the Seismological Society of América, Vol. 72, No. 6, pp. 2227-2244.
- Vyskocil P., Wassef A., Green, R. (Editors), 1983 **RECENT CRUSTAL MOVEMENTS, 1982**, Developments in Geotectonics 20, 351 pp. Elsevier Science Publishers.

Whalen C.T. 1984 **TRIGONOMETRIC LEVELING FOR CRUSTAL DEFORMATION STUDIES**, PRELIMINARY TEST RESULTS OF PRECISE TRIG-LEVELING WITH T2000-DI5 SYSTEM. Reunión Anual de la American Geophysical Union, AGU, San Francisco, California, Diciembre, 3-7, 1984.