

## ESTUDIO DE EFECTOS GEOFISICOS DEL TERREMOTO DE LIMON MEDIANTE PERCEPCION REMOTA Y ANALISIS HIDROMETEOROLOGICO

Jorge A. Amador<sup>1</sup>, Rafael E. Chacón<sup>2</sup> & Omar G. Lizano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Geofísicas y Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, Fax: (506) 234-2703; Correo Electrónico: JAMADOR @UCRVM2.BITNET.

<sup>2</sup> Departamento de Hidrología, Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica

**ABSTRACT:** This work is related to the study of several aspects of some of the geophysical effects of the 22 April 1991 earthquake in the Atlantic Coast of Costa Rica. Changes in the shore line nearby Limón, associated to the uplift of the earth's crust, and sediment plumes and coastal currents are analyzed by means of LANDSAT (2 April 1991) and SPOT (19 June 1991) imagery. This analysis is complemented with hydrometeorological data and field work. In relation to the uplift of the earth's crust, the SPOT image shows an area of variable width to the north of Limón and in the neighborhood of the Pájaros and Uvita islands, that is not identified in the LANDSAT image prior to the event. Field work confirmed, that such an area is a mixture of dead coral reefs and consolidated sand. This uplift is of non-continuous nature and is in the order of 40-50 cm near La Estrella river, 40 cm in the Muelle Alemán and approximately 2 m in Playa Bonita. Post-event precipitation rates and river flows were generally above normal means, such that together with the landslides, produced unusual sediment transport rates in the rivers of the region. These sediment discharges, specially in Banano and La Estrella rivers show well defined sediment concentration patterns that led to identify coastal currents with a principal component towards the north, in contrast to what has been published in the scientific literature.

**RESUMEN:** El presente trabajo estudia varios aspectos de algunos efectos geofísicos del terremoto del 22 de abril de 1991 en la Costa Atlántica de Costa Rica. Los cambios en la línea de costa al norte de Limón, asociados al levantamiento de la corteza terrestre durante el sismo, las descargas de sedimentos de los ríos de la región y las corrientes costeras asociadas, son analizados mediante imágenes LANDSAT (2 de abril de 1991) y SPOT (19 de junio de 1991). El análisis anterior se complementa con la ayuda de datos hidrometeorológicos y trabajo de campo. En relación con el levantamiento de la corteza terrestre, la imagen SPOT muestra una zona costera de ancho variable en el litoral norte de Limón y en los alrededores de las islas Pájaros y Uvita, que no se identifica en la imagen LANDSAT antes del terremoto. El trabajo de campo confirmó que esa zona está constituida principalmente por arrecifes coralinos muertos y arena consolidada. El levantamiento ocurrido no es continuo y del orden de 40 - 50 cm cerca del río La Estrella, 40 cm en el Muelle Alemán y cerca de 2 m en Playa Bonita. Las lluvias y caudales post-evento, fueron en general superiores a lo normal, lo que asociado a los deslizamientos ocurridos, provocaron un arrastre inusual de sedimentos en los ríos de la región. La descarga de estos ríos, en especial, en el Banano y La Estrella, presentan patrones de concentración bien definidos y permiten identificar corrientes costeras cercanas con componente principal hacia el norte, en contraste con lo que ha sido publicado en la literatura científica.

### ANTECEDENTES

La historia sísmica de Costa Rica muestra importantes períodos de actividad, durante los cuales, eventos de gran magnitud han causado cuantiosos daños materiales y la pérdida de un número considerable de vidas humanas.

Durante los últimos años, varios terremotos han sacudido el territorio nacional. Dos ejemplos recientes asociados a este período fueron los sismos del 25 de marzo y del 22 de diciembre de 1990. Posteriormente a esas fechas, un terremoto de gran magnitud estremeció la Costa Atlántica de Costa Rica. Este evento de magnitud 7,4 en la escala de Richter ocurrió a las 3:57 p.m. del 22 de abril de 1991. El epicentro se localizó cerca de la cuenca media del Río Telire, aproximadamente 40 km al suroeste de Puerto Limón. Goes et al. (1993) proveen información más detallada sobre otros aspectos y características de este terremoto.

De acuerdo con informes periodísticos locales (no citados en la bibliografía) y la Comisión Nacional de Emergencia (p.ej. Rosales, 1991), más de 300 km de carreteras nacionales y caminos vecinales fueron parcial o totalmente destruidos. Un número estimado de más de 10 000 casas fueron dañadas, de las cuales, alrededor del 40% de ellas fueron consideradas como inhabitables. Más de 10 000 personas se vieron afectadas directamente por las secuelas del terremoto con la pérdida de propiedades o casas. El número de personas heridas fue estimado en 585. La cantidad de muertes ocurridas a raíz del sismo presenta sin embargo, aspectos contradictorios. La Comisión Nacional de Emergencia (CNE, 1991; Rodríguez y Jiménez, 1993) indican que el terremoto dejó un saldo de 48 muertes; informes de periódicos locales y la Cruz Roja Nacional hablan de alrededor de 60 fallecidos (Lavell, 1992) y Goes et al. (1993), citando a NEIC (1991) como fuente de información, atribuyen al sismo 75 muertes. Al respecto de esta problemática y otros aspectos sociales asociados al sismo, Lavell (1992), presenta un análisis discursivo del impacto del terremoto en términos humanos, de infraestructura y de desarrollo.

Además de lo anterior, durante los días siguientes al sismo y debido a las condiciones

imperantes en la zona, se informó por la prensa local, de brotes importantes de enfermedades como diarrea, sarampión, malaria, varicela y el denominado síndrome post-terremoto caracterizado por depresiones nerviosas y alejamiento de las zonas de trabajo por temor a la actividad sísmica.

A pesar, de que no siempre es posible evaluar completamente los daños causados por un terremoto como el del 22 de abril de 1991, el costo estimado para la reparación de obras civiles y para mitigar los efectos directos a la población asciende a más de USA \$200 millones (Rodríguez & Jiménez, 1993).

### EFFECTOS GEOFISICOS DEL TERREMOTO

Entre los efectos geofísicos asociados al terremoto pueden nombrarse: la extensiva licuefacción en áreas de suelos aluviales observados en las costas de Costa Rica y Panamá (Rodríguez & Jiménez, 1993); los surgimientos de arena y lodo de estructura cónica con alturas entre 10 y 15 cm y diámetro máximo de 1,5 m (Montalto & Cerdas, 1991); el levantamiento de uno o varios bloques de la corteza terrestre (Rojas, 1991; Denyer & Arias, 1991) y deslizamientos, que de acuerdo con Montalto & Cerdas (1991), en su mayoría fueron de tipo superficial en la capa regolítica, que arrastraron cobertura vegetal cuyo desarrollo radicular era muy superficial. Algunos de estos deslizamientos son del orden de las decenas de kilómetros cuadrados y mostraron la estructura típica de forma de herradura con una superficie de ruptura aproximadamente circular. Montalto & Cerdas (1991), también informan de la destrucción de vegetación provocada por la caída de árboles de palma y banano, principalmente.

Además de los efectos anteriores, se presentaron taponamientos de los cauces de los ríos y quebradas originados por material detrítico y la vegetación arrastrada por los deslizamientos; el desbordamiento de ríos e inundaciones en las cuencas bajas de la zona con el consiguiente arrastre de material de fondo en suspensión y las descargas de sedimentos hacia el mar de los ríos de la región.

En vista de la importancia que reviste el estudio de estos efectos, sobre todo para adoptar las medidas de prevención y planificación ante este tipo de emergencias, el presente trabajo tiene por objeto analizar algunos de ellos mediante el uso integral y sinóptico que proveen las técnicas de la percepción remota con el complemento de datos geofísicos de campo.

### OBJETIVOS

Son tres los efectos del terremoto, que han sido considerados como de interés para el desarrollo de la presente investigación, por poseer, las características físicas espacio-temporales que permiten la aplicación de las técnicas y procedimientos de la percepción remota mediante el uso de imágenes de satélite. Estos efectos son:

- i) el levantamiento de uno o varios bloques de la corteza terrestre cerca de Puerto Limón y que causó alteraciones en la línea de costa,
- ii) el transporte de sedimentos desde las cuencas de los ríos hacia las aguas oceánicas costeras ocasionados principalmente por los deslizamientos asociados a la ocurrencia del sismo y
- iii) la descarga de sedimentos hacia el mar y su relación con las corrientes oceánicas costeras.

Las imágenes de satélite conjuntamente con datos de campo, hacen posible evaluar la utilización de estas técnicas en el estudio de los efectos anteriores y permitirían en forma específica:

- i) proveer información y evidencia del cambio en la línea de costa por comparación de su posición antes y después del evento,
- ii) estudiar las subsecuentes condiciones severas del tiempo para analizar intensidades altas de lluvia en las áreas asociadas con inundaciones fluviales y
- iii) vincular diferentes aspectos del transporte de sedimentos desde las cuencas afectadas hacia las aguas oceánicas cercanas y su relación con las corrientes costeras.

### BREVE DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### Características generales

La zona de estudio comprende las cuencas de los ríos Moín y Otros, Banano, Bananito y la Estrella. Estas cuencas se localizan en la región este del país, en la provincia de Limón, entre los 82° 40' y 83° 20' de longitud oeste y entre los 09° 40' y 10° 05' de latitud norte. En la figura 1 se muestra la zona de estudio y la red de estaciones hidrometeorológicas utilizadas.

Algunas de las características físicas de las cuencas se presentan en la Tabla 1.

#### Aspectos generales de la precipitación

La zona de estudio está influenciada por el régimen lluvioso de la vertiente del Caribe. Esta vertiente está bajo el predominio de los vientos alisios (dirección media del este - noreste en el hemisferio norte), el cual, se intensifica durante

**Tabla 1**  
Características físicas de los ríos y cuencas utilizadas en el estudio.

Cuenca	Area (km <sup>2</sup> )	Longitud del río (km)	Elevación máxima (m s.n.m.)	Pendiente promedio del río (%)
Río Moín y Otros	364	20	400	2,0
Río Banano	207	34	2025	5,0
Río Bananito	208	24	950	3,3
Río La Estrella	1005	52	2050	3,3

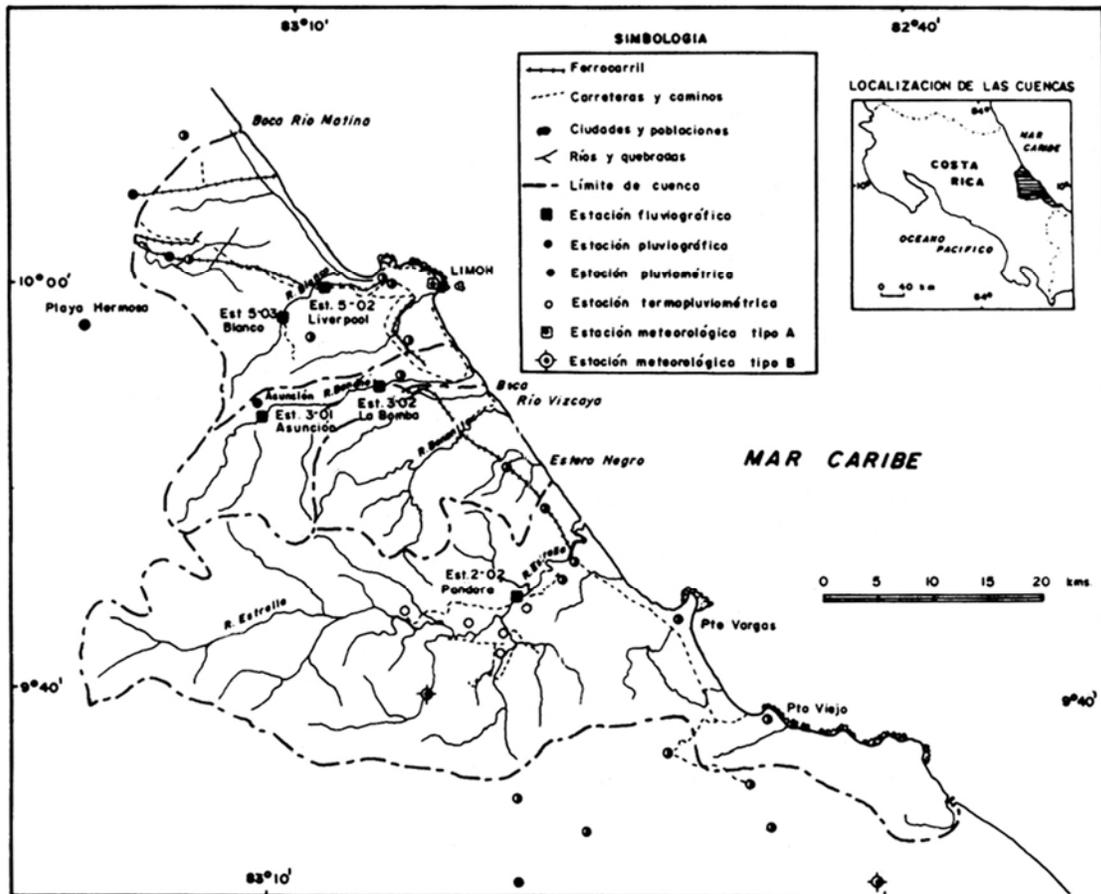


Fig. 1: Zona de estudio mostrando los ríos y cuencas de la región y la localización de las estaciones usadas para el análisis hidrometeorológico. La lista de estaciones y sus características se presentan en la Tabla 1.

los meses de diciembre a abril y en julio y agosto. Durante los meses de diciembre a abril, la vertiente se ve sometida a lluvias de varios días de duración. Estas lluvias son provocadas por la intensificación del viento alisio, su asociación con las masas frías provenientes de Norteamérica y a la interacción con la pronunciada orografía.

En los meses de mayo a noviembre las precipitaciones predominantes son de tipo convectivo, caracterizándose por ser muy intensas, de corta duración y muy localizadas.

En relación con la distribución diaria de la lluvia, Chacón & Fernández (1985) anotan que durante el período diciembre- abril, ésta ocurre en especial durante las noches, mientras que, en los meses de mayo a noviembre, la lluvia ocurre generalmente entre las 12 y 18 hora local.

#### USO DE LA PERCEPCION REMOTA Y ASPECTOS TEORICOS DEL PROBLEMA

Desde el punto de vista general, el trabajo permite evaluar localmente la utilidad de imágenes de satélite en el contexto de los efectos provocados por un fenómeno geofísico de gran magnitud como lo fue el del 22 de abril de 1991, en especial, si se considera que algunos de estos efectos son de la dimensión espacial requerida, de manera que puedan ser identificados por medio de datos obtenidos de sensores remotos.

En forma específica, debido a su carácter sinóptico, es conveniente el uso de la percepción remota para conocer los cambios ocurridos en la línea de costa a fin de establecer la acción necesaria para la planificación y modificación de la

infraestructura civil cercana a la costa, en especial la dedicada a la navegación marítima. Puerto Limón es el principal puerto costarricense en el Caribe y es factor clave para la importación y exportación de productos primarios para la economía nacional como el petróleo, los granos y el banano. Además de lo anterior, el desarrollo turístico de la zona es creciente y prometedor y requiere de un conocimiento razonable de los aspectos geofísicos en relación con las situaciones de riesgo por desastres y eventos naturales adversos.

Para este estudio, se utilizaron imágenes de satélite adquiridas antes y después del evento principal del 22 de abril. Los sensores HRV (High Resolution Visible) a bordo del satélite SPOT proveen la información digital adecuada (resolución espacial de aproximadamente 20 m x 20 m en el modo multispectral y de 10 m x 10 m en el modo pancromático) para el estudio de la zona expuesta debida al levantamiento de la corteza cerca de las costas de Puerto Limón. Además, estos datos y los del LANDSAT-TM (30 m x 30 m en el modo multibanda) podrían ser utilizados para evaluar aspectos varios del transporte de sedimentos en especial en las aguas oceánicas cercanas a la zona afectada. En esta parte de la investigación, imágenes LANDSAT fueron usadas

para proveer la línea base de comparación en lo relativo a la línea de costa, transporte promedio hacia el mar asociado a los ríos de la región afectada y su relación con las corrientes costeras.

La descarga de sedimentos de los ríos sobre el mar es un aspecto que tiene grandes implicaciones ecológicas en el ambiente marino, ya que la calidad de estas aguas está en estrecha relación con el uso de la tierra de las cuencas hidrográficas. Una vez que estas descargas alcanzan la costa, son dominadas por las corrientes marinas, por lo que la distribución de sedimentos son también, un indicativo de las direcciones de estas corrientes.

En el Caribe adyacente a Costa Rica, los trabajos de Cortés (1981) y Cortés & Risk (1985) relacionan las descargas del río La Estrella con el deterioro de uno de los mayores sistemas coralinos en la costa, por medio de la existencia de una corriente marina hacia el sureste que deposita sedimentos sobre los arrecifes en Cahuita. La mayoría de los trabajos realizados en el Caribe describen la existencia de un giro ciclónico de la circulación oceánica, manejada por los casi permanentes alisios en esa región (Molinari et al., 1981; Kinder, 1983; Fu & Holt, 1983; Kinder et al., 1985). Según Molinari y colaboradores, este giro ciclónico se debe a la interacción de este flujo

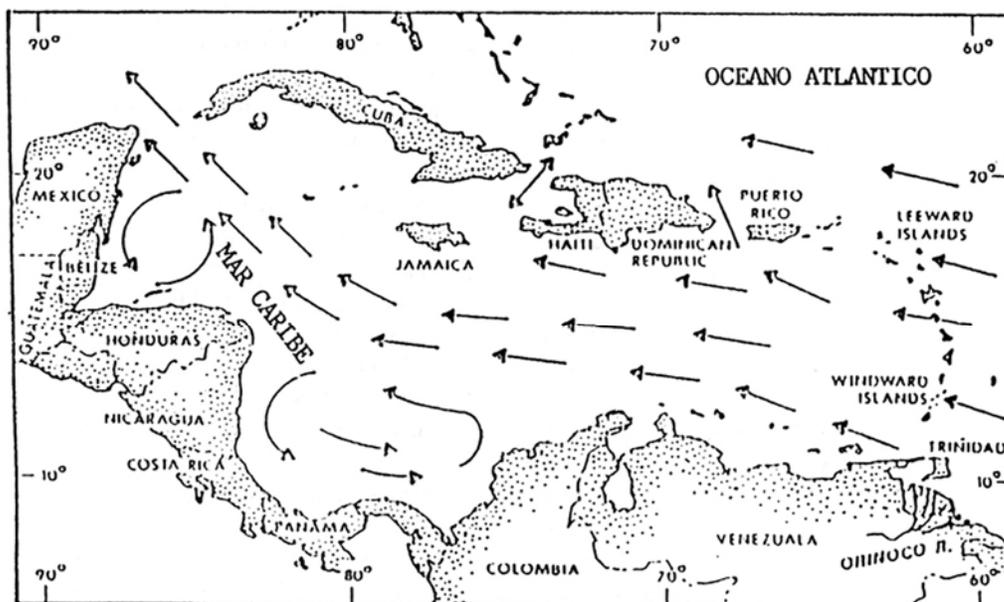


Fig. 2: Corrientes oceánicas superficiales medias en el Caribe (tomada de Kjerfve, 1986).

**Tabla 2**  
Características de las estaciones meteorológicas e hidrológicas utilizadas

Cuenca	Número (N)	Estación (W)	Latitud (m s.n.m.)	Longitud (1991)	Elevación	Período
Río Banano	81003	Limón	10° 00'	83° 03'	5	22/4 a 30/6
Río Bananito	83003	Asunción	09° 54'	83° 10'	130	22/4 a 30/6
	79012	Playa Hermosa	09° 58'	83° 21'	100	02/5 a 30/6
Río Sixaola	850202	Pandora	09° 44'	82° 58'	15	22/4 a 30/6
	810503	Río Blanco	09° 59'	83° 09'	15	22/4 a 30/6

con la batimetría al noreste de Nicaragua, la cual hace que la corriente retorne hacia el sureste, paralela a la costa caribeña de Costa Rica (Fig. 2). Por otro lado, Sukhovei (1986) explica este vórtice como debido a la gran precipitación sobre la región, la cual produce gran descarga de los ríos, formando una franja de agua poco salina que da origen a una corriente gradiente en esa dirección. No todas las investigaciones de circulación en el Caribe confirman, sin embargo, este giro ciclónico, como demuestran Wust (1964) y Kinder (1985). Más aún, la mayoría de los estudios de circulación han sido realizados fuera de la plataforma continental y las alteraciones que el flujo pueda tener cerca de la costa, muy poco o nada se han estudiado. Por otro lado, Kjerfve (1986) sugiere que aunque la marea en el Caribe es menor de 0,5 m, más del 50% de la variabilidad de las corrientes cerca de la costa, está asociada con los ciclos de marea. En el aspecto anterior, los sensores remotos representan uno de los mejores medios para estudios oceanográficos sobre distribución de sedimentos como indicativo de corrientes costeras (Froidfond et al., 1991).

Imágenes de satélite han sido comúnmente usadas para proveer las características generales de movimiento y transporte de sedimentos (Robinson, 1985; Ritchie et al., 1988; Froidfond et al., 1991). En este trabajo se analizan imágenes SPOT y LANDSAT, antes y después del terremoto (ver sección siguiente para detalles y características de las imágenes), para inferir la dinámica costera al sureste de Limón y las descargas de sedimentos de los ríos Banano y La Estrella después del terremoto.

Como se desprende de lo anterior, el uso de la percepción remota constituye una herramienta de gran utilidad científica y permite la participación multidisciplinaria en el estudio de problemas geofísicos como los causados por el terremoto del 22 de abril de 1991.

#### DATOS Y RECURSOS DISPONIBLES

Diferentes tipos de datos con información geofísica fueron utilizados en el presente estudio.

- a. Una imagen SPOT HRV-PA en forma digital del 19 de junio de 1991.
- b. Un cuarto de escena LANDSAT-TM en seis bandas (tres en el visible, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo cercano) en forma digital del 2 de abril de 1991.
- c. Dos imágenes SPOT-HRV, a escala 1 : 50 000 en forma pictórica del 25 de marzo de 1987 y del 19 de junio de 1991.
- ch. Datos hidrometeorológicos complementarios (precipitación y caudales) de la región en estudio (en la Tabla 2 aparecen las estaciones utilizadas)
- d. pronóstico de marea para Puerto Limón para las fechas de toma de las imágenes SPOT.

ANIMA, un paquete de análisis de imágenes desarrollado en el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, fue utilizado para el procesamiento de los datos digitales. Una breve descripción de ANIMA se

puede encontrar en Amador et al. (1993). Soley & Burgos (1992) describen con mayor detalle los aspectos computacionales de ANIMA. Para el despliegue y manejo de imágenes fue utilizado un software de dominio público (p.e. IMDISP). El análisis de sedimentos se realizó por medio del paquete BILKO, distribuido por la UNESCO bajo el programa TREDMAR para la educación y entrenamiento en el uso de los sensores remotos en las ciencias marinas.

### METODOLOGIA

La corrección geométrica de las imágenes utilizadas, fue realizada mediante la técnica de extracción de puntos de control terrestre. Esta técnica está descrita en detalle en Campbell (1987).

Inicialmente, para estudiar algunos de los problemas geofísicos causados por el terremoto, se consideró conveniente el uso de imágenes de satélite SPOT. A pesar de que se conoce que los sensores HRV del satélite SPOT proveen información adecuada (mayor resolución que las LANDSAT) para estudiar los problemas rela-

cionados con los objetivos del trabajo, no fue posible obtener esa información, de ahí que fuera necesario incluir datos iniciales del satélite LANDSAT como punto de comparación. En esta fase, una imagen LANDSAT-TM del 2 de abril de 1991 (20 días antes del terremoto) fue utilizada para excluir la zona expuesta cercana a la costa ocurrida después del evento. La identificación en esta imagen, de los aspectos de interés para este trabajo, fue realizada mediante técnica visual. Además se realizó una inspección visual de las imágenes SPOT (25 de marzo de 1987 y 19 de junio de 1991), se identificó la línea de costa para ambas y se compararon sus posiciones relativas.

Como las imágenes LANDSAT-TM y SPOT no tienen la misma resolución espacial, fue necesario realizar ajustes para superponer y comparar las imágenes. La comparación entre las imágenes disponibles se realizó mediante técnicas visuales y con la ayuda de ANIMA.

Información hidrometeorológica complementaria, fue utilizada para estimar la distribución espacial y temporal de la lluvia y relacionarla con las inundaciones y el transporte de sedimentos. La descarga de sedimentos fue analizada utilizando

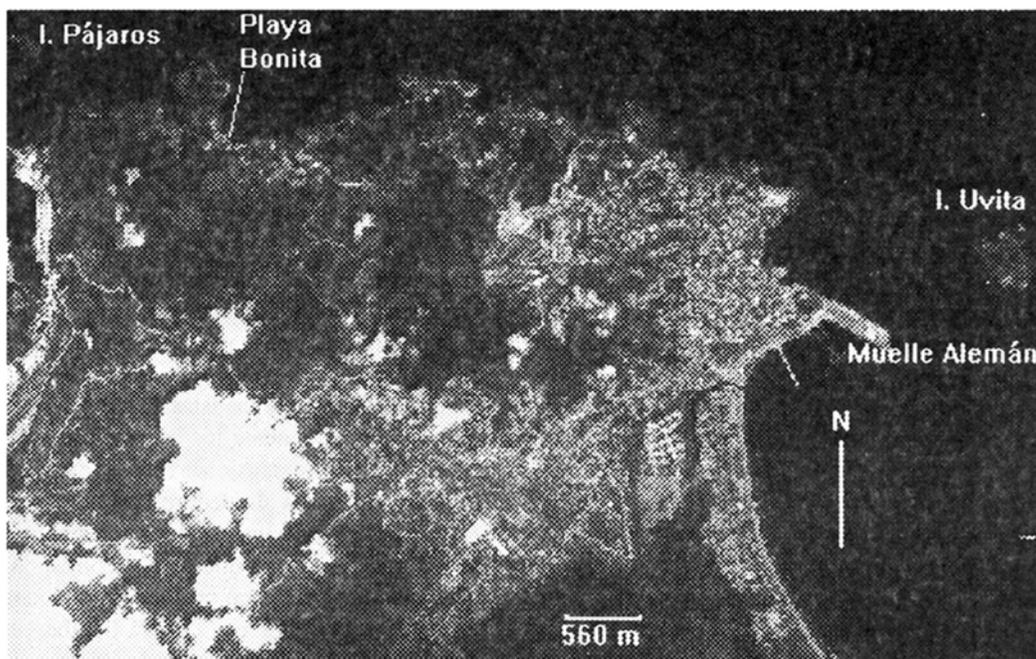


Fig. 3: Subescena LANDSAT del 2 de abril de 1991 cerca del litoral norte de Limón.

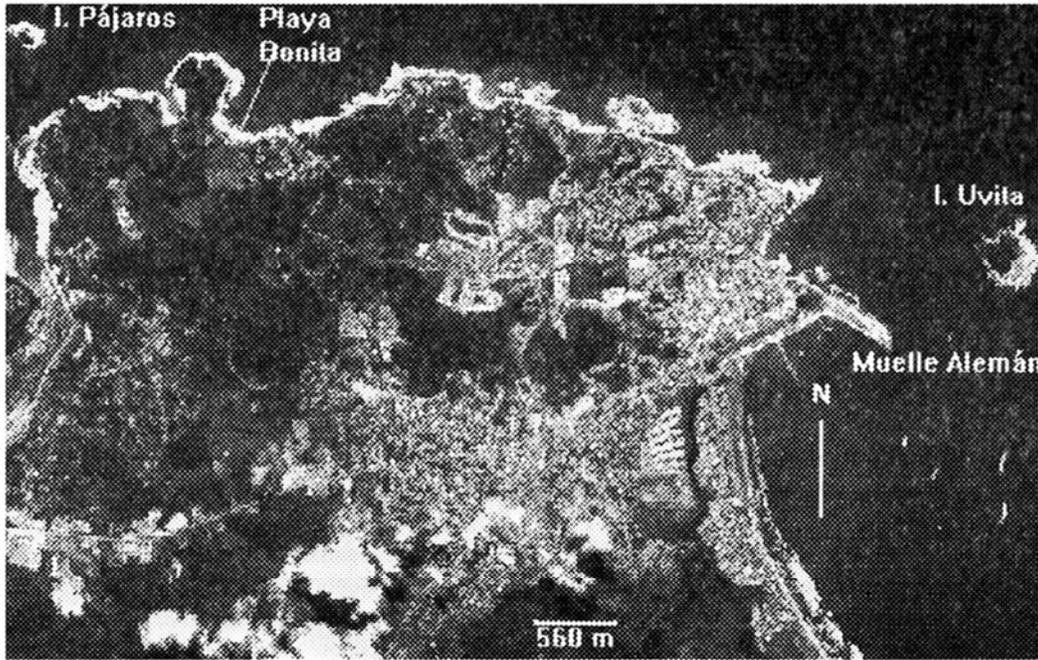


Fig. 4: Subescena SPOT del 19 de junio de 1991 cerca del litoral norte de Limón.

BILKO. Para identificar las distintas masas de agua, con concentraciones distintas de sedimentos, se realizaron varios transectos desde la boca de los ríos para medir la variación del número digital de la imagen, la cual está relacionada con su reflectancia y ésta a su vez, con la concentración de sedimentos.

Finalmente, los principales resultados fueron analizados y contrastados tomando en cuenta las técnicas visuales utilizadas y los datos y observaciones realizadas por trabajo de campo organizado en la región afectada. Las giras de campo fueron efectuadas el 27 de abril de 1991 y el 25 y 26 de noviembre de 1993. En la primera, los sitios estudiados corresponden a una pequeña zona alrededor de Limón que incluye el Aeropuerto, Playa Bonita, Portete y Moín. En la segunda, se incluyó el Aeropuerto de Limón, el Muelle Alemán, Playa Bonita, Moín y las bocas de los ríos Banano y Estrella. Para la última gira de campo, se obtuvo un pronóstico de marea para Puerto Limón, de acuerdo con los procedimientos de la Oficina de Servicio Mareográfico (SERMAR) del Instituto Meteorológico Nacional.

## RESULTADOS

### Levantamiento de la corteza y cambio en la línea de costa

#### Análisis de las imágenes

En la figura 3, se muestra una subescena de la imagen LANDSAT del 2 de abril de 1991 que incluye el litoral norte de Puerto Limón y las islas Pájaros y Uvita. En esta zona, se aprecia claramente la delimitación entre la región marina y la territorial y no hay evidencia de arrecifes coralinos expuestos a lo largo de la línea de costa norte. En el caso de las islas Pájaros y Uvita, se delinear perfectamente los bordes territoriales y no se identifican extensiones rocosas expuestas de importancia en sus alrededores. Se hace notar, en el caso de la isla Uvita, la espuma de mar cerca de su porción sureste, lo que parece corresponder a una zona de aguas poco profundas. En contraste con la figura anterior, en la figura 4 (subescena de la imagen SPOT del 20 de junio de 1991) se aprecia en forma clara en las zonas mencionadas arriba,

un borde blanco a lo largo de la línea de costa. Esta región en blanco, posee por sus características, una firma espectral diferente a la de la vegetación y casas aledañas, lo que permite el contraste mostrado en la figura. Durante el trabajo de campo, esta zona fue identificada como una mezcla de arrecifes coralinos muertos con incrustaciones de arena consolidada y ha sido asociada con el levantamiento provocado por el terremoto del 22 de abril de 1991. Áreas con detalles semejantes al anterior, se presentan en las islas Pájaros y Uvita, en especial al este y norte de esas islas respectivamente.

Aún cuando la resolución espacial en las imágenes originales no es comparable, la combinación de la técnica visual utilizada y el trabajo de campo permiten concluir que la zona expuesta al norte de Limón como consecuencia del terremoto, es identificable mediante el uso y características de las imágenes de satélite usadas en este trabajo.

#### Observaciones de las giras de campo

Durante el desarrollo de la primera gira de campo, se comprobó la existencia de una zona del litoral costero que había sido aparentemente expuesta como resultado del levantamiento de la corteza cerca de Limón. Cortés et al., (1993), identificaron parte de los arrecifes coralinos en la zona de Playa Bonita como una población en decadencia debido a la exposición sufrida. En esta playa, el levantamiento estimado en función de la exposición de los corales y del cambio en el nivel aparente del mar fue de más de 1 m.

Para la segunda gira, se usó el nivel de las mareas en función del tiempo con el fin de relacionarlas con otros parámetros en las zonas visitadas. Los resultados del nivel de las mareas indican que para el Caribe, el rango es generalmente del orden de 40 cm. Las principales observaciones y mediciones de esta gira pueden resumirse de la siguiente forma:

#### 1) Boca del Río Banano (9:00 a.m., 25/11/93, pico de la marea alta)

- i) existencia de dos terrazas bien definidas; se nota invasión de especies vegetales en la margen derecha de la desembocadura del río, en la zona

entre la línea de costa o terraza vieja y la terraza nueva (la distancia entre los límites de estas terrazas es de aproximadamente 30 m);

- ii) en la terraza vieja se encontraron plantas de cocos con raíz expuesta a 30 m del límite de la terraza nueva.

#### 2) Aeropuerto de Limón (Fig. 5a)

- i) evidencia de terraza nueva situada a 15-20 m del límite de la terraza vieja (observadores locales con preparación para observaciones meteorológicas y oceanográficas indican que aún en condiciones de fuerte oleaje, el mar no penetra hasta la terraza vieja);
- ii) vegetación rastrera reciente invade terraza vieja.

#### 3) Muelle Alemán (Fig. 5b)

i) marca de población de cirripedios muertos a 40 cm arriba de la marca de la población viva, la cual, coincide con la altura de máxima marea;

ii) la marca de la altura de la población viva de cirripedios en los pilotes del muelle, coincide con marca correspondiente en el tubo de un mareógrafo, el cual, fue instalado después del terremoto del 22 de abril de 1991 (no hay evidencia de población muerta de cirripedios en el tubo del mareógrafo).

#### 4) Zona aledaña a Playa Bonita (4 p.m., 25/11/93; cerca del mínimo de marea baja)

- i) poco oleaje con alturas de olas de 0,5 m;
- ii) diferencia de hasta 2 m en el nivel de los corales viejos expuestos con respecto al nivel actual de marea;
- iii) línea de costa vieja con distancias variables de hasta 60 m con respecto a la línea de corales no expuesta;
- iv) vegetación y pastos invaden zona entre la terrazas (Fig. 5c).

#### 5) Boca del río La Estrella (10:00 a.m., 26/11/93; cerca de pico de marea alta)

- i) existencia de dos terrazas bien definidas, con distancias muy variables entre sus límites;

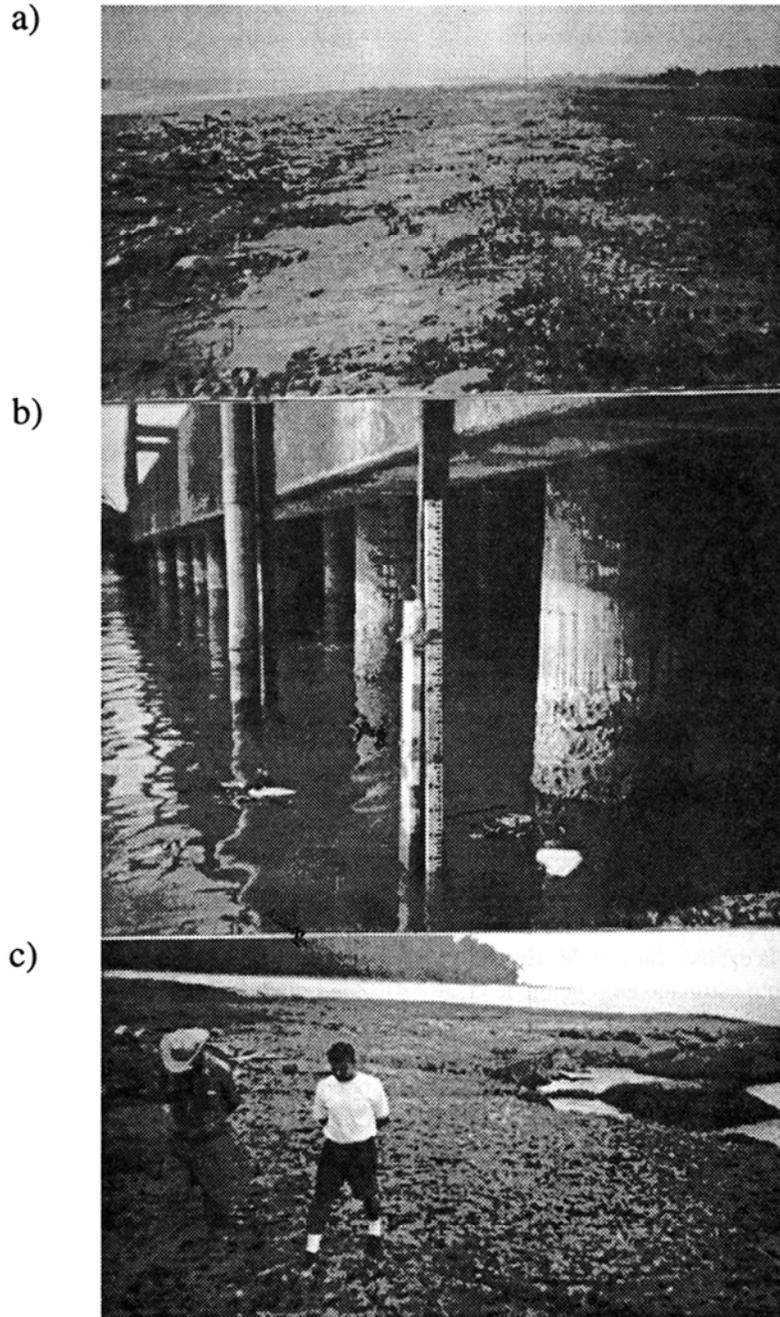


Fig. 5: Fotos tomadas durante la gira de campo del 25 y 26 de noviembre de 1991. a) vista al sureste del Aeropuerto de Limón mostrando una distancia aproximada de 15 a 20 m entre el límite de la terraza vieja (a la derecha) y la nueva cerca de la línea de playa (a la izquierda); b) vista de la parte baja del Muelle Alemán en donde se nota a la derecha, sobre el pilote, la población muerta de cirripedios 40 cm arriba de la línea de máxima marea y hacia el centro y la izquierda respectivamente, la regla de medición y el tubo del mareógrafo sin evidencia de cirripedios (el instrumento fue instalado después del terremoto del 22 de abril de 1991) y c) parte expuesta de arrecifes coralinos cerca de Playa Bonita, Limón.

ii) evidencia de terraza vieja con una longitud aproximada de 200 m, con una diferencia de nivel en algunos tramos de hasta 50 cm con respecto a la terraza nueva.

**Comportamiento hidrometeorológico**

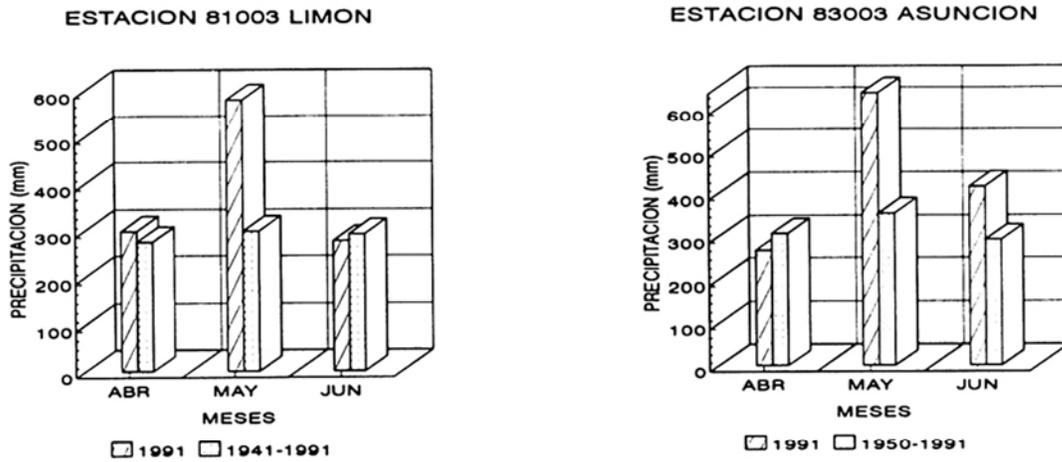
**Comportamiento de la precipitación**

Debido a la estrecha relación entre la precipitación y los caudales de los ríos, los resultados de estas variables se presentan en forma combinada (Figs. 6 y 7).

Durante los meses de abril a junio de 1991 la

precipitación registrada en la zona de estudio se situó con valores superiores a la media. En la parte superior de la figura 6 se compara la precipitación registrada en 1991 con la media en las estaciones Limón para el período 1941-1991 y en Asunción para el período 1950-1991. En esta figura se puede observar que en Limón, la precipitación registrada en mayo de 1991 supera en un 95 por ciento a la media, los meses de abril y junio se situaron con valores normales. En Asunción, el mes de mayo superó en un 80 por ciento a la media del período 1950-1991. El mes de junio supera a la media en un 43 por ciento.

**PRECIPITACION MEDIA MENSUAL**



**CAUDAL MEDIO MENSUAL**

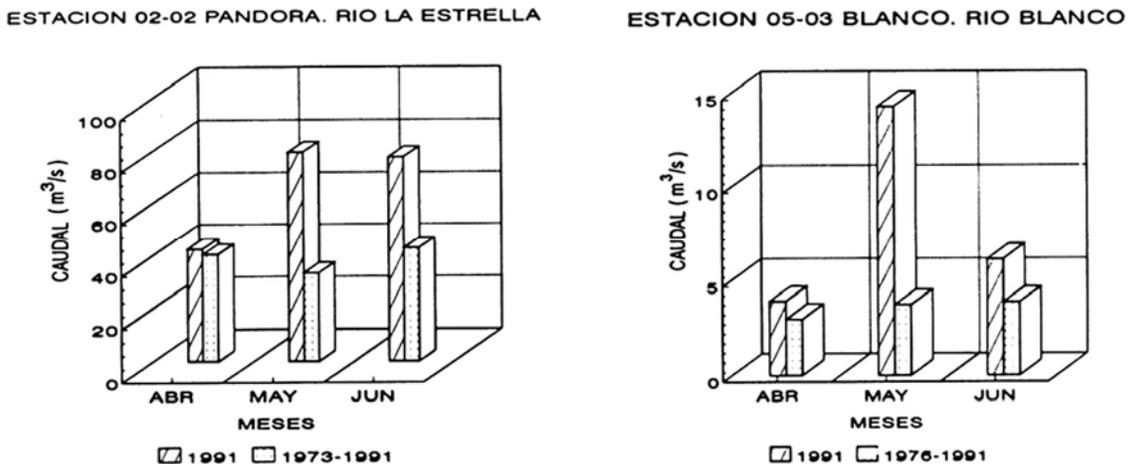
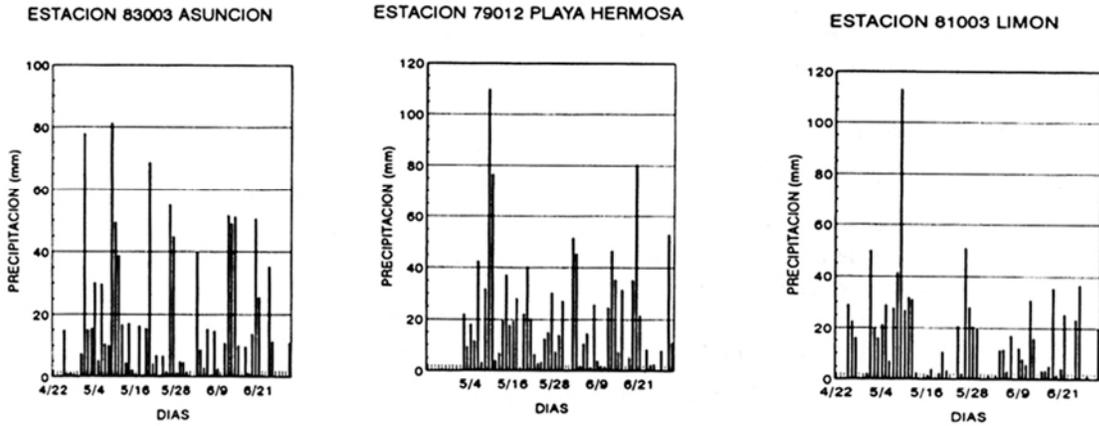


Fig. 6: Precipitación media mensual (mm) en las estaciones Limón y Asunción (parte superior) y caudal medio mensual (m³/s) en las estaciones Pandora y Blanco (parte inferior). La simbología inserta en los gráficos indica el período de análisis usado para cada estación.

PRECIPITACION DIARIA



CAUDAL MEDIO DIARIO

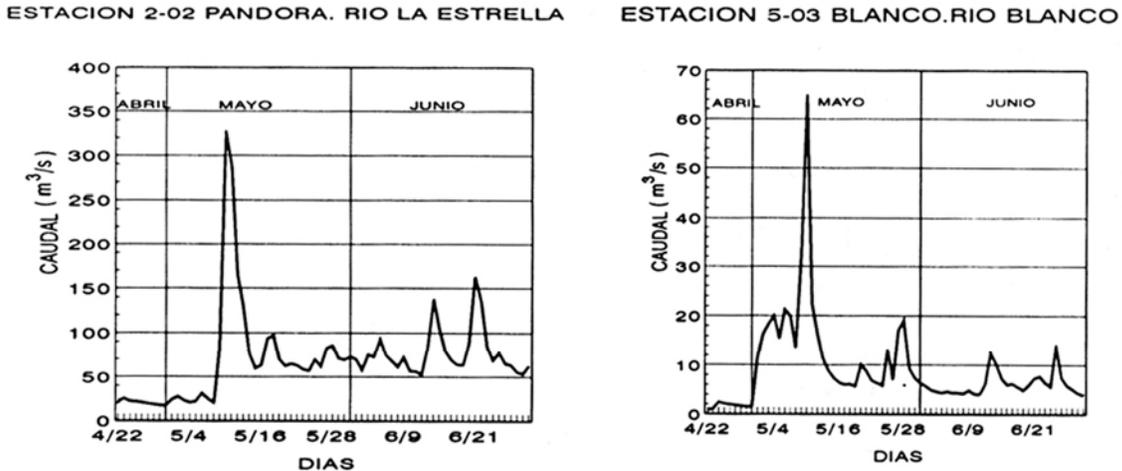


Fig. 7: Precipitación diaria (mm) en las estaciones Asunción, Playa Hermosa y Limón (parte superior) y caudal medio diario (m³/s) para las estaciones Pandora y Blanco (parte inferior). El período de análisis es del 22/04/91 al 30/06/91, excepto para Playa Hermosa que es del 02/05/91 al 30/06/91.

En la figura 7 (parte superior) se presenta la distribución diaria de la precipitación en las estaciones Asunción, Playa Hermosa y Limón. Se puede observar que durante el período de estudio un 80 por ciento de los días presentaron lluvias. Las precipitaciones más significativas durante el mes de mayo se registraron los días 1; 8, 9 y 10; 20; 26 y 27. En el mes de junio, las tormentas se presentaron los días 12 y 13; 19, 20 y 21 (esta tormenta un poco menos severa en Limón) y el 24 y 25. En la mayor parte de los casos mencionados, la precipitación diaria fue superior a 20 mm.

Comportamiento de los caudales y sedimento en suspensión

En la parte inferior de la figura 6 se comparan los caudales promedio mensuales registrados de abril a junio 1991 con la media en las estaciones Pandora y Blanco. En esta figura se observa que el mes de abril se sitúa dentro de un valor normal, mientras que en los meses de mayo y junio los caudales alcanzan valores hasta de un 149 por ciento sobre la media. En cuanto al comportamiento de los caudales diarios, en la figura 7

(parte inferior) se puede observar que los eventos más importantes se registraron durante los días 9 y 10 de mayo con caudales máximos diarios de 328 y 65 m<sup>3</sup>/s en las estaciones Pandora y Blanco. El otro evento importante se presenta los días 12, 13 y 14 de junio con caudales máximos diarios de 138 y 12,5 m<sup>3</sup>/s. Finalmente el 21 de junio en la estación Pandora el caudal registrado fue de 163 m<sup>3</sup>/s (ICE, 1993).

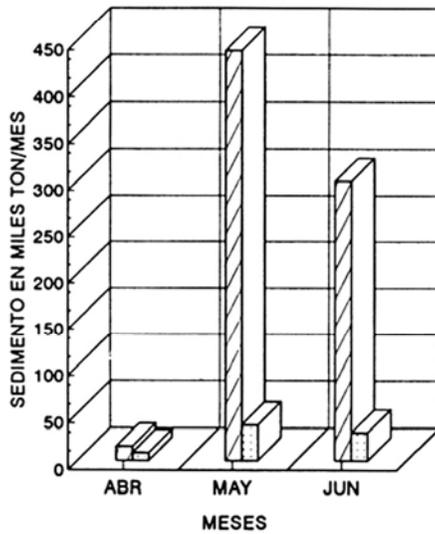
En la figura 8 se presentan los valores de sedimento en suspensión con base en las muestras tomadas en los ríos La Estrella y Blanco. En esta figura se muestra la variación durante los meses de abril a junio de 1991 y su comparación con respecto a la media. Es significativo el gran arrastre de sedimentos durante el mes de mayo y junio, donde se alcanzan los valores de 450 000 ton/mes en la estación Pandora y 18 645 ton/mes en la estación Blanco para el mes de mayo (ICE, 1994). Los valores anteriores se compararon con los registrados durante otros años. Como ejemplo se

puede citar el año de 1989, en el que los caudales de la estación Pandora para mayo, alcanzaron un 52% sobre el promedio, resultando en una descarga de sedimentos en suspensión de 22 116 ton/mes, en contraste con las 450 000 ton/mes para mayo de 1991.

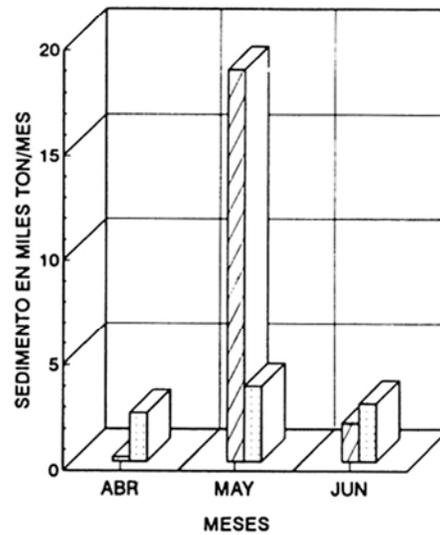
De acuerdo con Chacón & Fernández (1985), los meses de diciembre y enero presentan en términos generales lluvias más intensas, de más larga duración y que cubren mayores extensiones en la zona Atlántica. Esto hace que en estos meses, sean más frecuentes las inundaciones en las partes bajas de la zona, contrastando con lo ocurrido durante el período post-terremoto. De lo anterior, se puede concluir que la alta pluviosidad registrada durante los meses de mayo y junio y el deterioro físico de las cuencas causado por los deslizamientos asociados al terremoto del 22 de abril en la provincia de Limón, trajeron como consecuencia grandes inundaciones y un arrastre inusual de sedimentos.

### SEDIMENTO EN SUSPENSION

ESTACION 02-02 PANDORA. RIO LA ESTRELLA



ESTACION 05-03 BLANCO. RIO BLANCO



▨ 1991 □ 1973-1991

▨ 1991 □ 1977-1991

Fig. 8: Sedimento en suspensión (miles de toneladas por mes) para las estaciones Pandora y Blanco. La simbología inserta en los gráficos indica el período de análisis para cada estación.

### Descarga de sedimentos hacia el mar y su relación con corrientes costeras

Las descargas al mar de los sedimentos de los ríos Banano y La Estrella se muestran en las figuras 9 y 10. Estas figuras son subescenas de la imagen SPOT del 19 de junio de 1991. Es evidente en ambas figuras, la gran concentración y penetración mar adentro de las plumas de los ríos al sureste de Limón. Estas concentraciones de sedimentos están correlacionadas con las tormentas que se produjeron durante los días posteriores al evento sísmico principal (como mostraron las Figs. 6, 7 y 8) y corresponden al arrastre de material provocado por los deslizamientos ocurridos a raíz del terremoto.

Estas descargas de carácter inusual permiten conocer mejor aspectos varios de la dinámica costera al sur de Limón. La pluma de sedimento del río Banano (Fig. 9) muestra una dispersión hacia el noreste y norte cerca de la costa. Esta corriente parece luego, retornar hacia el sureste mar afuera como indican resultados preliminares de la información SPOT analizada. La pluma de sedimento del río La Estrella (Fig. 10) presenta claramente un transporte a lo largo de la costa hacia el noroeste y el norte de la desembocadura.

El deterioro de los arrecifes en Cahuita, es atribuido por Cortés (1981), al mecanismo de transporte de sedimentos hacia el sureste desde el río La Estrella. De acuerdo con los datos de la imagen SPOT utilizada en este trabajo, es evidente



Fig. 9: Subescena SPOT del 19 de junio de 1991 mostrando la descarga de sedimentos hacia el mar del río Banano. Los puntos indican las superficies de discontinuidad en relación con la concentración de sedimentos.

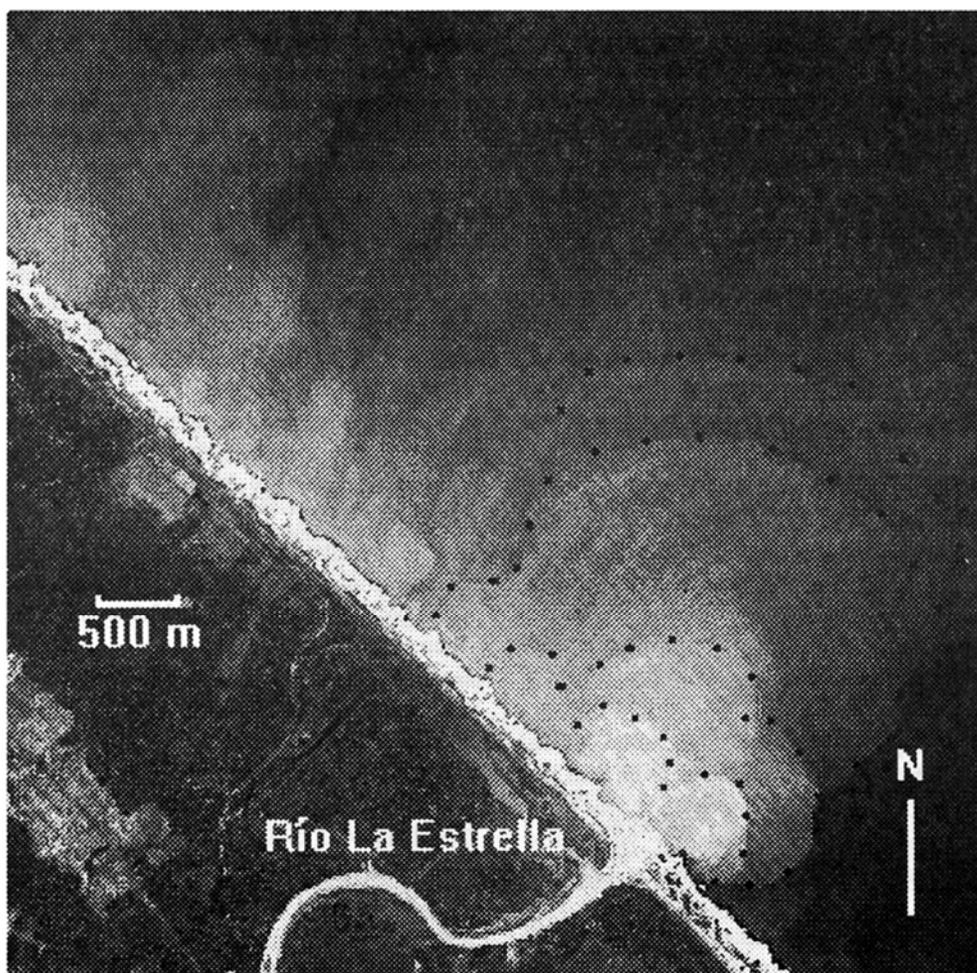


Fig. 10: Subescena SPOT del 19 de junio de 1991 mostrando la descarga de sedimentos hacia el mar del río La Estrella. Los puntos indican las superficies de discontinuidad en relación con la concentración de sedimentos.

un transporte de sedimentos en sentido contrario (hacia el norte y noroeste). Es importante destacar, que aún en presencia de descargas inusuales, como lo son las debidas a las condiciones post-terremoto, las corrientes costeras cercanas, no parecen interactuar directamente con los arrecifes al sureste de la boca del río La Estrella. Un mecanismo que explicaría la presencia de sedimentos en los arrecifes de Cahuita, podría estar asociado a un lento proceso de difusión. Por otro lado, las observaciones que se hicieron durante la segunda visita a Limón evidenciaron transporte de sedimentos hacia el norte y noroeste, las cuales también son respaldadas por los residentes de la zona. De lo anterior, se puede concluir que, las corrientes propiamente costeras al sureste de Limón

no siguen el patrón de las corrientes profundas como las indicadas en los trabajos de Molinare et al. (1981) y Kinder (1983) y que presentan características de alta variabilidad. De acuerdo a Kjerfve (1986), esta variabilidad podría estar relacionada, entre otros aspectos, con los ciclos de marea.

## CONCLUSIONES

La comparación de la imágenes LANDSAT y SPOT, permiten identificar dentro de los límites de resolución, una área de características espectrales diferentes a la vegetación e infraestructura cercanas, alrededor de la costa norte de Limón y

al norte y este de las islas Pájaros y Uvita, respectivamente. El trabajo de campo, permite identificar además, esa área con una zona de corales expuesta asociada al levantamiento de uno o más bloques de la corteza terrestre relacionado con el terremoto del 22 de abril de 1991. Las estimaciones realizadas en las giras de campo indican que el levantamiento alcanza alturas que van desde 40-50 cm cerca de la desembocadura del río La Estrella, a 40 cm en el Muelle Alemán, hasta el orden de 2 m en la zona cercana a Playa Bonita. En ninguno de estos casos, la zona expuesta parece ser producto de condiciones de oleaje o marea. La diferencia entre la nueva línea de costa y la vieja es de una extensión variable, como se desprende de la posición de los límites de las terrazas. Estas terrazas son fácilmente distinguibles en playas arenosas como las que se encuentran al sureste de Limón, con valores que van desde unos pocos metros a varias decenas de metros, como es el caso de 15 a 20 m al frente del Aeropuerto de Limón, de 30 m a la izquierda de la desembocadura del río Banano y cerca de 50 m en la boca del Río La Estrella. El nuevo nivel de marea en playas muy rocosas presenta distancias muy variables alcanzando más de 60 m en la zona cercana a Playa Bonita.

En relación con las tormentas ocurridas después del terremoto, estas son de características superiores a lo normal. Los deslizamientos asociados al sismo del 22 de abril de 1991, sumados a las condiciones de alta precipitación, produjeron como consecuencia grandes inundaciones y un arrastre inusual de sedimentos en las cuencas de los ríos de la zona. De las imágenes analizadas y de las observaciones realizadas, se infiere una corriente costera con componentes principales hacia el noroeste y norte; que luego mar afuera, parece sumarse a la prevaleciente corriente hacia el sureste como se informa en la mayoría de los trabajos publicados (p.e., Molinari et al., 1981, Kinder, 1985).

Como extensión de este trabajo se sugiere, estudiar la relación entre las condiciones del viento, presión atmosférica, marea y las condiciones de oleaje en la zona expuesta al norte de Limón y la utilización de técnicas de análisis digital como la de Crippen (1992), para cuantificar si es posible,

el área expuesta asociada al levantamiento. Un estudio con mayor detalle de la descarga de los ríos y las condiciones de marea en sus desembocaduras, permitiría conocer mejor la dinámica costera y su relación con el deterioro de sistemas ecológicos importantes como los arrecifes coralinos de Cahuita.

### AGRADECIMIENTOS

Se reconoce la colaboración del Departamento de Hidrología del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) al proveer parte de los datos usados en este estudio. El manejo inicial de los datos digitales fue llevado a cabo con la ayuda del Centro de Informática de la Universidad de Costa Rica (UCR).

A E. Cyrus, de la Dirección General Forestal del Ministerio de Agricultura y Ganadería; a A. López, del Departamento de Geología del ICE y a E. Alfaro de la Oficina SERMAR del IMN el agradecimiento de los autores por la ayuda brindada. A J. Soley, A. Burgos e I. Vargas del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) y a J. Cortés del Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la UCR por su ayuda, comentarios y discusiones. Un agradecimiento a los editores por las sugerencias para mejorar el manuscrito. Un especial reconocimiento a J. Tanner del Instituto Panamericano de Historia y Geografía por su apoyo para la realización de este trabajo. F. Ureña del CIGEFI y S. Rojas de la Escuela de Geología de la UCR colaboraron en la preparación de algunas de las figuras.

### REFERENCIAS

- Amador, J. A., Burgos, A. S., Soley, F. J., Serpas, G. and Vargas, A., 1993: Remote sensing at the Centre for Geophysical Research, University of Costa Rica. -*Int. J. Remote Sens.*, **14**(12): 2391-2401.
- Campbell, J. B., 1987: Introduction to remote sensing. -551 págs.; The Guilford Press, New York, London.
- Crippen, R. E., 1992: Measurement of subresolution terrain displacements using SPOT pancromatic imagery. - *Episodes*, **15**(1): 56-61.

- Chacón, R. E. & Fernández, W., 1985: Temporal and spatial rainfall variability in the mountainous region of the Reventazón River basin, Costa Rica. - *J. Climatology*, **5**: 175-188.
- CNE, 1991: Plan regulador para la zona Atlántica de Costa Rica. - 79 págs.; Comisión Nacional de Emergencia, San José, Costa Rica.
- Cortés, J., 1981: The coral reef at Cahuita, Costa Rica: A reef under stress. - 176 págs. Tesis de Maestría. McMaster University, Hamilton, Canadá.
- Cortés, J. & Risk, M.J., 1985: A reef under siltation stresses: Cahuita, Costa Rica. - *Bull. Mar. Sci.*, **2**: 339-356.
- Cortés, J., Soto, R., Jiménez, C. & Astorga, A., 1993: Death of intertidal and coral reef organisms as a result of a 7.5 earthquake. - *Proc. 7th Intern. Coral Reef Symposium, Guam*: 239-244.
- Denyer, P. & Arias, O., 1991: Efectos geológicos del terremoto de Limón, Costa Rica. - 35 págs. Informe Proyecto de Investigación 113-90-071. Escuela de Geología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Fu, L.L. & Holt, B., 1983: Some examples of oceanic mesoscale eddies by the SEASAT synthetic-aperture and. - *J. Geophys. Res.*, **88(C3)**: 1844-1852.
- Froidefond, J., Castaing, P., Mirmand, M. & Ruch, P., 1991: Analysis of the turbid plume of the Gironde (France) based on SPOT radiometric data. - *Rem. Sens. Environ.*, **36**: 149-163.
- Goes, S.D.B., Velasco, A.A., Schwartz, S.Y. & Lay, T., 1993: The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica ( $M_w = 7.7$ ) earthquake and its tectonic implications: A broadband seismic study. - *J. Geophys. Res.*, **98(B5)**: 8127-8142.
- ICE, 1993: Boletín Hidrológico. - 203 págs. Publicación N° 20. Departamento de Hidrología, Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica.
- ICE, 1994: Boletín de Sedimentos en Suspensión. - 357 págs. Publicación N° 3. Departamento de Hidrología, Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica.
- Kinder, T. H., 1983: Shallow currents in the Caribbean Sea and Gulf of Mexico as observed with satellite-tracked drifters. - *Bull. Mar. Sci.*, **33(2)**: 239-246.
- Kinder, T.H., Herburn, G. W., & Green, A. W., 1985: Some aspects of the Caribbean circulation. - *Marine Zoology*, **68**: 25-52.
- Kjerfve, B., 1986: Physical flow processes in Caribbean waters over a range of scales. - *En: Caribbean Coastal Marine Productivity. UNESCO Reports in Marine Science* 41. 59 págs.; París.
- Lavell, A., 1992: El terremoto de Limón, abril 22 de 1991: Vulnerabilidades sociales, económicas e institucionales. - 52 págs.; Programa Centroamericano de Investigación de la Confederación Universitaria Centroamericana (CSUCA). San José, Costa Rica.
- Molinari, R. L., Spillane, M., Brooks, I., Atwood, D. & Duckett, C., 1981: Surface currents in the Caribbean Sea as deduced from Lagrangian drifters. - *J. Geophys. Res.*, **86**: 6539-6542.
- Montalto, F. & Cerdas, A., 1991: Informe preliminar de amenazas geológicas, terremoto de Telire-Limón del 22 de abril de 1991, Costa Rica, Centro América. - 28 págs.; Comisión Nacional de Emergencia, San José, Costa Rica.
- NEIC, 1991: Preliminary determination of epicenters report, National Earthquake Information Center, Boulder, Colorado.
- Ritchie, J.C. & Cooper, C.M., 1988: Comparison of measured suspended sediment concentrations with suspended sediment concentrations from LANDSAT-MSS data. - *Int. J. Remote Sens.*, **9(3)**: 379-387.
- Robinson, I.S., 1985: Satellite oceanography. An introduction for oceanographers and remote sensing scientists. - 455 págs., Ellis Horwood.
- Rodríguez, L. & Jiménez, I., 1993: Inventario de emergencias y desastres en Costa Rica. - 96 págs.; Departamento de Documentación, Análisis y Archivo, Comisión Nacional de Emergencia, San José, Costa Rica.
- Rojas, W., 1991: El terremoto del 22 de abril de 1991 en la región caribe y la sismicidad asociada en el mes de abril, 1991. - 67 págs, Informe preliminar de datos sismológicos. Laboratorio de Sismología, Escuela de Geología, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Rosales, V.A., 1991: Pérdidas en infraestructura, sismo del 22 de abril de 1991, Provincia de Limón - 18 págs.; Dirección Prevención y Mitigación, Comisión Nacional de Emergencia, San José, Costa Rica.
- Soley, F. J. & Burgos, A. S., 1992: Un sistema computacional de bajo costo para el Análisis de Imágenes digitales ANIMA. - 20 págs.; Informe Interno, Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Sukhovei, V.F., 1986: Seas of the world ocean. - 93 págs.; Leningrad (Gidrometeoizdar).
- Wust, G., 1964: Stratification and circulation in the Antillean Caribbean basin. - 201 págs.; Columbia University Press, New York.