

RED SISMOLÓGICA NACIONAL (RSN: ICE-UCR)
SECCIÓN DE SISMOLOGÍA Y VULCANOLOGÍA,
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA, UCR

**ÁREA AMENAZAS Y AUSCULTACIÓN SÍSMICA Y VOLCÁNICA
INSTITUTO COSTARRICENSE ELECTRICIDAD
C.S. EXPLORACIÓN SUBTERRÁNEA
EN PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

EL TERREMOTO DE CINCHONA DEL 8 DE ENERO DE 2009



Editor: Geól. Rafael Barquero P.

Abril 2009



Colaboradores:

INSTITUTO COSTARRICENSE ELECTRICIDAD (ICE)

Geól. Alvarado I. Guillermo E.
Geól. Barquero P. Rafael
Geól. Boschini I. Ileana
Ing. Climent M. Álvaro
Ing. Laurent K. John
Geól. López S. Allan
Geól. Soto Gerardo J.
Geól. Taylor C. Waldo
Geóg. Vargas V. Alberto

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA (UCR)

Geól. Badilla Elena
Geól. Montero P. Walter
Geól. Mora Ch. Rolando
Geól. Mora F. Mauricio
Geól. Moya Aaron
Geól. Obando A. Luis G.
Geól. Peraldo H. Giovanni
Geól. Rojas Q. Wilfredo
Geól. Taylor C. Magda

Personal de soporte técnico:

ICE

Arias U. Francisco
Barrantes M. José Miguel
Calvo M. Guido
Naranjo Marco T.
Piedra A. Rosey
Rodríguez M. Andrey
Torres C. Rigoberto

UCR

Brenes B. Luis Fernando
Redondo Ch. Carlos
Segura Carlos

CONTENIDO

	Pág.
Prólogo.....	05
Resumen.....	06
CAP I: CONTEXTO HISTÓRICO, GEOLÓGICO, TECTÓNICO LOCAL, SISMICIDAD HISTÓRICA Y REGISTRO SÍSMICO INSTRUMENTAL.....	07
1.1 Contexto histórico.....	07
1.2 Geología de la zona.....	11
1.3 Tectónica de la zona.....	15
1.4 Sismicidad histórica.....	20
1.5 Sismicidad instrumental.....	23
CAP II: TERREMOTO DE CINCHONA.....	34
2.1 Sismo principal, réplicas y sismicidad asociada.....	34
2.2 Intensidades.....	37
2.3 Distribución velocidades onda sísmica.....	38
2.4 Registro de aceleraciones.....	39
2.5 Análisis de la fuente sísmica.....	47
2.6 Análisis de los esfuerzos de Coulomb.....	53
CAP. III: GEOMORFOLOGÍA Y DINÁMICA EXTERNA DE LA ZONA AFECTADA POR EL TERREMOTO DE CINCHONA.....	60
3.1 Geomorfología.....	60
3.2 Flujos de lodo.....	64
CAP IV: ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS DE LOS FLUJOS DE LODO.....	69
4.1 Introducción.....	69
4.2 Antecedentes.....	71
4.3 Los flujos de lodo del 2009.....	74
4.4 Discusión.....	92
CAP. V: OBSERVACIONES GEOTÉCNICAS.....	94
5.1 Respuesta dinámica del terreno.....	94
5.2 Deslizamientos.....	94
5.3 Ausencia regulación uso del suelo.....	96
5.4 Respuesta de la infraestructura habitacional.....	96
5.5 Respuesta de la infraestructura vial.....	98
5.6 Avalanchas.....	99
5.7 Conclusiones.....	100
CAP. VI: EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS Y DAÑOS.....	101
6.1 Introducción.....	101
6.2 Clasificación de costos.....	102
6.3 Caracterización de sectores.....	104
6.4 Acciones de primera respuesta.....	106

6.5 Daño ambiental.....	108
6.6 Turismo.....	110
6.7 Edificios públicos.....	110
6.8 Sector Energía-Telecomunicaciones.....	112
6.9 Sector transportes.....	115
6.10 Sector Vivienda y asentamientos humanos.....	117
6.11 Aspectos complementarios.....	118
6.12 Observaciones finales.....	124
CAP. VII: CONCLUSIONES GENERALES, LECCIONES APRENDIDAS Y RECOMENDACIONES.....	132
REFERENCIAS.....	127

PRÓLOGO

Luego del último gran terremoto de 1991 en Limón (Mw 7,6) un nuevo terremoto sacudió al país el pasado 8 de enero del 2009 en la zona de Vara Blanca -Cinchona. El terremoto ocurrió en una zona del país en donde históricamente al menos otros cinco terremotos han tenido lugar en los últimos 160 años, en todos los casos asociados a fallamiento local. El último de ellos ocurrió en el año 1955, época en la cual los estudios geológicos y sismotectónicos del país eran apenas incipientes y aún no se contaba con instrumentación sismológica en Costa Rica.

Desafortunadamente, esta zona se fue desarrollando históricamente sin considerar sus posibles riesgos y, no obstante las experiencias pasadas con los terremotos, las carreteras y caminos y las poblaciones que surgieron en esas condiciones son hoy afectados de nuevo por un desastre que provocó bastantes daños y hasta muertes.

Ciertamente, la Sismología a nivel mundial no tiene la posibilidad hasta el momento de predecir cuándo ocurrirá un terremoto ni en que lugar, sin embargo, si es posible actualmente definir las zonas de mayor vulnerabilidad ante los sismos, dadas sus características geológico-tectónicas y sus condiciones geomorfológicas. Sin embargo, casi siempre ocurre que en dichas zonas vulnerables ya previamente se ha desarrollado alguna infraestructura y entonces es poco lo que se puede hacer para prevenir sus problemas futuros ya que incluso los pobladores no están en disposición de abandonar sus propiedades. Este complejo problema no es de fácil solución, por lo que las instituciones a cargo de la investigación por lo general no logran que sus recomendaciones sean escuchadas y puestas en práctica como se debería para reducir las pérdidas de vidas humanas y económicas.

Dadas estas condiciones de alta sismicidad de nuestro país con la que debemos convivir día a día, hay que hacer conciencia en la población de los riesgos a los que estamos expuestos y que el gobierno y las instituciones públicas desincentiven el desarrollo en aquellas zonas que se identifiquen como de alto riesgo para que de esta manera, poco a poco y a mediano y largo plazo la población logre desarrollarse en zonas más seguras. Es también necesario que las normas de construcción del Código Sísmico y el Código de Cimentaciones que son instrumentos sumamente valiosos y que se han actualizado en los últimos años, con base en las experiencias de terremotos recientes en nuestro país y en el mundo, sean rigurosamente aplicadas para evitar fallas en las viviendas y la infraestructura nueva que se construyan, lo cual dará más seguridad a la población en caso de sismos.

Por otra parte, es importante que el país cuente con una institución fuerte para la prevención y manejo de las crisis por desastres naturales bien estructurada y con personal técnico permanente que pueda desarrollar planes a mediano y largo plazo tendientes a reducir los efectos adversos de los desastres sobre la población. También, el Ministerio de Educación debe jugar un papel importante en fomentar la educación de las nuevas generaciones en los temas de desastres naturales para que en el futuro no volvamos a repetir los errores del pasado y que las experiencias que se nos presenten no vuelvan a quedar en el olvido.

Se agradece profundamente a todo el personal profesional y técnico de la **Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE)**, de la **Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica** y del **Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)** así como a los medios de prensa y las instituciones públicas que hicieron posible la edición de este valioso documento que esperamos sea de mucha utilidad y también sirva de base a investigaciones futuras. La colaboración de Guillermo Alvarado en la edición fue muy valiosa.

El editor

RESUMEN

El día jueves 8 de enero de 2009 un fuerte sismo sacudió la región norte del Valle Central de Costa Rica, propiamente unos 40 km al norte de la ciudad capital, en el límite de las provincias de Heredia y Alajuela. El sismo tuvo una magnitud M_w 6,2, una profundidad de 4,6 km, una intensidad máxima de IX en la zona mesosísmica, un área de ruptura de unos 72 km² y está asociado con un fallamiento denominado falla Ángel-Varablanca de dirección NW-SE, ubicado en el flanco este del volcán Poás. Este sistema de falla tuvo su última actividad en junio del 2005. La presente actividad se inició el día miércoles 7 de enero de 2009, con un evento precursor de magnitud M_d 4,6, que ocurrió en la zona cercana a la localidad de Varablanca a las 10 am. La actividad de réplicas fue continua por unas tres semanas y se registraron más de 1600 de magnitudes mayores a 2,5 M_d . Se reportaron serios daños en carreteras y caminos, principalmente en la zona entre Cinchona y Varablanca, al norte de Heredia. En viviendas y edificaciones hubo graves daños y alarma general en la población en la parte central del país, 25 personas fallecieron, y hay 17 personas desaparecidas. Algunas obras del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ubicadas en la zona como la presas de PH Toro II y PH Cariblanco fueron afectadas parcialmente. El servicio eléctrico sufrió averías serias en la zona del epicentro y en el área metropolitana se interrumpió por una hora. Los servicios telefónicos se saturaron también por al menos unas dos horas. Históricamente, la zona norte de las ciudades de Alajuela y Heredia, ha sido afectada por varios terremotos importantes, como fueron los ocurridos en 1851 (M 6,0), 1888 (M 6,0), 1911 (M 6,1), 1912 (M 6,1) y 1955 (M 5,8). La última actividad sísmica previa al terremoto del 8 de enero del 2009 fue un enjambre sísmico ocurrido en la misma zona en junio y julio del 2005, relacionado con el sistema de falla Ángel-Varablanca.

Datos del terremoto

HORA LOCAL: 13:21

MAGNITUD: 6,2 M_w (Magnitud del momento sísmico).

PROFUNDIDAD: 4,6 km

UBICACIÓN: 1 km al sur de Cinchona,

Latitud: 10°11.60', Long: -84°10.60'

INTENSIDAD MÁXIMA (Escala Mercalli Modificada): IX en Cinchona e Isla Bonita

Origen Falla de tipo oblicuo de dirección aproximada NW-SE denominada falla Ángel-Varablanca, cuya ruptura se extiende por unos 12 km en la horizontal y unos 6 km en su inclinación en profundidad, generando un deslizamiento promedio a lo largo del plano de falla calculado en 30 cm, con movimiento predominante lateral derecho y una componente de inclinación normal hacia el noreste y con una leve ruptura observada en superficie (entre 2 a 7 cm). Las solución del mecanismo focal realizado por RSN muestran una solución de fallamiento normal con componente de rumbo dextral.

CAPÍTULO I

CONTEXTO HISTÓRICO, GEOLÓGICO Y TECTÓNICO LOCAL, SISMICIDAD HISTÓRICA Y REGISTRO SÍSMICO INSTRUMENTAL

Wilfredo Rojas, Walter Montero, Gerardo J. Soto, Rafael Barquero, Ileana Boschini, Guillermo E. Alvarado, Alberto Vargas

Rojas, W., Montero, W., Soto, G.J., Barquero, R., Boschini, I., Alvarado, G.E., Vargas, A. 2009: Contexto geológico y tectónico local, sismicidad histórica y registro sísmico instrumental. En: Barquero, R. (Ed.): El terremoto de Cinchona, 8 de enero de 2009. Inf. IRSN: 7-33.

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

La ruta del Sarapiquí y su peso en la consolidación del poblamiento de los alrededores del volcán Poás

El temblor nos trajo, como de costumbre, un “temporal” (Wilhelm Marr, 1863)

La búsqueda de una ruta que comunicara Alajuela con el río Sarapiquí y de allí hacia Nicaragua marcó, en el siglo XIX, el poblamiento que desarrollarían los alrededores del volcán Poás. Atravesando las llanuras de San Carlos, por esta vía accedían al valle Central quienes venían del Caribe o de Nicaragua. Históricamente, la construcción del camino a Sarapiquí estuvo ligada al interés de contar con un medio de comunicación que conectara algunos poblados de la depresión intermontana Central con un puerto en el Caribe y de ahí, exportar la producción nacional, principalmente agrícola, a los mercados norteamericanos y europeos.

Establecimiento de la ruta al Sarapiquí

A principios del siglo XIX el Estado costarricense contaba con muy pocos recursos para emprender tan vasta obra pese a su relevancia económica. Debido a ello, firmó una serie de decretos para estimular a que la empresa privada se hiciera cargo de ella. Entre los incentivos estaban las regalías de tierras, el cobro de peaje y derechos de navegación en el río Sarapiquí que le permitirían a la compañía sufragar los gastos incurridos de la posible construcción de la ruta tales como: cobrar un real por cada quintal que se exportara y dos por cada quintal que se importara (Decreto 7 del 27 de octubre de 1851). A pesar de los esfuerzos, el proyecto estuvo lleno de dificultades y limitaciones: escasez de capital, mano de obra (Costa Rica tenía una población aproximada de 80 000 habitantes y de este total solamente un pequeño grupo vivía de la venta de su fuerza de trabajo), nivel tecnológico, insalubridad del clima, conflictos políticos y un marcado desconocimiento geográfico. Por ejemplo, el mapa de Felipe Molina (1851) considerado uno de los mejores de la época, situaba a San José mucho más al oeste y al norte incidiendo en una percepción errónea: se creía que la construcción del camino era fácil ya que la distancia se suponía más corta (Obregón, 1968).

Primeras expediciones: 1819-1835

Las primeras exploraciones se dieron a finales de la época colonial. Algunos de los expedicionarios fueron: Eusebio Rodríguez del Río (1819), Joaquín Mora Fernández (1820), Francisco Quirós (1824), Miguel Alfaro (1827) y Pío Murillo (1832). El propósito era buscar alternativas para mejorar las comunicaciones con Nicaragua y así, colocar los excedentes de la producción agrícola de ese momento respecto al tabaco y a la zarzaparrilla y buscar un vínculo directo con el mercado mundial. Las empresas que intentaron construir un camino hacia el Sarapiquí estaban muy mal o poco organizadas y poseían grandes carencias técnicas, tan solo marcaban posibles rutas, con el agravante que desaparecían rápidamente debido a las condiciones climáticas duras. Lo provechoso de esta etapa fue que permitió conocer las condiciones del entorno, orientando los trabajos para los siguientes años.

Marginación del proyecto: 1836-1846

Esta época evidenció la incapacidad del Estado para hacerse cargo de los principales retos en cuanto a infraestructura vial. El camino de herradura hacia Puntarenas era apenas atendido en los trabajos más urgentes. Por otro lado, la rehabilitación del camino a Matina fue un fracaso debido a la caída del gobierno de Braulio Carrillo. Durante este decenio, el camino al Sarapiquí fue prácticamente olvidado dado el poco interés y la falta de recursos.

Recobrando bríos y conflictos internacionales: 1846-1851

Durante este decenio, la burguesía cafetalera empezó a exportar grandes cantidades de café al mercado inglés. Debido a que la única ruta disponible para llegar a Europa era vía Chile mediante el puerto del Pacífico, los empresarios que controlaban el comercio, exigieron al gobierno retomar con urgencia una salida por Moín ya fuera por Matina o hacia San Juan del Norte vía el río Sarapiquí. Se afirmaba que:

“... con el camino al norte (término que se uso para los proyectos tendientes a unir al valle Central con el Caribe), subirá el precio del café, cueros, zarza, azúcar, chancaca, maderas y otros productos exportables de nuestro riquísimo suelo” (“El Mentor Costarricense”, 1846).

De tal manera, se retomaron varias iniciativas: Silvestre Salazar abrió una vereda que pasaba por el paso de La Palma; Gabriel Solís y Manuel Sancho abrieron otra por el Poás y se ordenó a Pío Murillo limpiar la vereda del Barva. Incluso, se envió una expedición al río Toro Amarillo para verificar si este era navegable cuyos resultados fueron negativos. Pero todos intentos pretendían la utilización del puerto de San Juan del Norte que a la sazón era dominado por Nicaragua, asunto que exigía un acuerdo internacional. Pero para esa época, las disputas limítrofes eran prácticamente irreconciliables debido a que los nicaragüenses reclamaban, además de la provincia Guanacaste, toda la cuenca del San Juan hasta Matina. Inclusive, si se llegaba a un acuerdo, Costa Rica debía pagar fuertes impuestos por conceptos de exportación. De cara a esta problemática el camino a Sarapiquí continuaría siendo solamente un proyecto y su materialización estaba aún muy lejos de conseguirse.

Compañía de Sarapiquí y abandono del camino: 1851-1853

Había pasado más de treinta años y a pesar de la experiencia acumulada, se carecía de una política clara con respecto al tema del camino. En un nuevo intento, el gobierno emitió un decreto el 27 de octubre de 1851, mediante el que se constituyó la Compañía de Sarapiquí. Dicha compañía se comprometió a:

“construir un camino sólido de ruedas, dentro del término de cinco años, entre San José y el muelle del río Sarapiquí, con un desmonte y escampado de cuarenta varas de ancho, en donde el terreno lo permita, y construyéndose puentes, calzadas y todas las demás obras para su conservación. La compañía principiará por abrir a la brevedad posible un camino bueno para mulas, el cual deberá estar concluido dentro del término de diez y ocho meses, contados desde el 1 de enero de 1852” (Decreto 7 del 27 de octubre de 1851).

Como contraparte, el gobierno incentivaba a la compañía con:

- Mil varas de terreno a cada lado y en todo lo largo de la parte de la vía que pasara por terrenos baldíos, pudiendo disponer de ellas desde el momento en que empezara los trabajos;
- Una legua cuadrada, en donde se forme la población del puerto;
- El peaje por la mercadería conducida durante veinticinco años;
- La mitad de los derechos de alcabala marítima por espacio de tres años y,
- La opción por un término de cinco años para que establezca o contrate con otra compañía la navegación a vapor del río, además de otras regalías menores.

El 6 de diciembre de 1851 empezaron las tareas de reconocimiento del terreno y el jueves 10 sería el día de la inauguración oficial de la obra. Pero, como ya era recurrente, los problemas prácticamente eran los mismos: los

recursos humanos se limitaron a un ingeniero civil, algunos capataces y el resto eran peones de cuadrilla. Además el trabajo técnico fue deficiente:

“Los ingenieros empleados parece que han omitido hacer los correspondientes mapas, por consiguiente faltan los datos sobre que se pueda formar una opinión sobre si el eje actual ocupa o no la línea más favorable en cuanto a lo largo y al declive” (Archivo Nacional. Serie Fomento 1708).

A pesar de lo anterior, los trabajos se realizaron con mucha rapidez y ya para abril de 1852 se había construido una tercera parte del camino carretero y se calculaba que en un año más se concluiría. Pero, no fue así: la obra fue abandonada en agosto de 1853 dejando tras de sí un camino de muy mala calidad. William Marr la atravesó en julio de 1853, se refirió al tramo entre El Desengaño y Varablanca (que no era la peor parte ya que más adelante el camino estaba en peores condiciones) de la siguiente manera:

“Nuestras cabalgaduras caminaban en el barro tan velozmente como caracoles que pretendiesen dar alcances a un caballo; pero, no podían ir más de prisa. Pero también el barro, el blando y profundo barro en que nuestras bestias se hundían positivamente hasta el vientre a cada ocho o nueve pasos” (Marr, 2004).

El retorno a la vía

Los servicios prestados por la nueva vía eran irrelevantes y solamente fue de gran utilidad para el transporte de correos y para actividades de contrabando. Después de muchos avatares, el camino al Sarapiquí fue abandonado por largos años. La construcción del Canal de Panamá permitió a los costarricenses dejar de exportar vía el Cabo de Hornos y consecuentemente también, se perdió todo el interés del camino a Sarapiquí. Fue hasta principios del siglo XX que la administración del presidente León Cortés puso manos a la obra para construir un camino moderno hacia la zona. De vereda de mulas y caballos hacia mediados del siglo XIX, el camino entre Varablanca y San Miguel pasó hacia la década de 1940, a constituir un camino lastreado, condición que mantuvo hasta avanzado el decenio de 1980.

La toponimia: reflejo de una dinámica poco conocida

Desde mediados del siglo XIX, célebres y notables naturalistas ingresaron a Costa Rica por el camino de Sarapiquí-Varablanca-Alajuela, entre ellos, Josef von Warscewicz, Karl Hoffmann, Alexander von Frantzius, Julián Carmiol y Hermann Wendland.

Varios de ellos dejaron su herencia tanto por escrito (Moritz Wagner, Francisco Rohrmoser, Thomas F. Meagher, Wilhelm Marr, Anthony Trollope, John Hale y Félix Belly, Frederick Boyle) como en la toponimia. El Desengaño alude al largo trecho que quedaba por recorrer. Más específicamente W. Marr expresaba:

“Lo llaman El Desengaño, porque cuando se exploró el terreno inmediatamente situado al otro lado de la cadena de volcanes del nordeste que limita la altiplanicie, se creía llegar al río San Juan; pero en vez de éste vieron los exploradores que tenían al frente una selva virgen que requería un viaje de varios días para atravesarla ...” (Marr, 2004).

Ranchos, villas y haciendas de Varablanca y Cariblanco recuerdan la existencia de los pecaríes (*Tayassu pecari*) o chanchos de monte. Asimismo, las huellas de los exploradores y viajeros quedaron marcadas en los nombres de San Miguel, La Virgen, Rancho Quemado, los cerros de Congo, Cariblanco o Toro Amarillo. De igual forma, en la denominación de ríos como La Paz, la catarata del río “de Los Ángeles” (hoy solamente Ángel) y el Sarapiquí.

Lo anterior es comprensible de tomar en cuenta que hacia la década de 1860, recorrer el trayecto entre Alajuela y San Miguel representaba un día y sobrellevar situaciones diversas difíciles. Esto lo confirma John Hale en uno de sus folletos:

“En pocas horas, desde el puerto de San Juan e introduciendo la navegación a vapor, se puede llegar a la confluencia de los ríos San José y Hermoso, que caen en el Sarapiquí; este se junta con el San Juan que desemboca en el océano. Allí se desembarca y, cabalgando día y medio, se llega a San José, la capital de la provincia” (Fernández, 2002).

Poblados como Cinchona son el legado del interés que cobró retornar a la construcción de una vía ágil hacia el Sarapiquí. Nace durante la Segunda Guerra Mundial como resultado del orden geopolítico mundial. El bloqueo que los japoneses establecieron al comercio en el Pacífico y con ello, el acceso al sureste de Asia y sus productos (entre ellos las plantaciones de quina de Indonesia, el mayor productor del mundo durante esa época), condujo al cultivo de cinchona o quinina roja (familia Rubiaceae, género *Cinchona*). Esta planta es originaria de la zona Andina, su importancia perdura hasta en los símbolos nacionales de Ecuador y Perú.

Este árbol se sembró en el flanco oriental del volcán Poás hacia 1943; su corteza contiene alcaloides como la quinina, de importancia para el tratamiento de la malaria o paludismo. La quina se consideró la planta medicinal más importante de ultramar en el siglo XVII. Fue así como los estadounidenses fundaron el poblado que con los años llegaría a ser conocido como Cinchona, perteneciente al distrito Sarapiquí de Alajuela (Hilje, 2009).

La Montaña del Inglés, lugar situado cerca de la vereda hacia San Miguel de Sarapiquí, debió su nombre a Jhon Hale. Este inglés llegó a Costa Rica en 1825 y ofreció fundar una colonia compuesta de cien familias. Su proyecto fue solamente un sueño y lo único que perduró con el tiempo fue su pintoresco nombre. Más recientemente se le conoce como El Pico Inglés (Fernández, 2002).

Otros lugares muy comunes para quienes transitan por la ruta son los de Bajos del Toro o Toro Amarillo (1400 m s. n. m.). En su mapa de 1861, von Frantzius cita al río Toro Amarillo y a un cerro homónimo. También menciona al río Agrio aunque no menciona aldea alguna. La comprobación de que existía un río con sabor agrio –ácido-, induce a pensar que efectivamente la gente conocía de la existencia de un valle irrigado por un río que en la actualidad se le denomina Toro (antes Toro Amarillo). Este último topónimo se fue perdiendo con el tiempo y tan solo quedó en la tradición oral. En los mapas oficiales es inexistente algún río o cerro con dicho nombre, y la población que se le suele llamar Toro Amarillo, aparece en los mapas como Bajos del Toro. El poblado localizado aguas abajo del Toro se llama Colonia Toro (740 m s.n.m.). Hacia 1911 se describe a “Toro Amarillo” como poblado por unas 100 personas distribuidas en 25 casas.

En cambio, actualmente existe un pequeño poblado y un río que desciende del volcán Irazú denominado en la toponimia oficial como Toro Amarillo. Von Frantzius le llamó, en 1863, río Novillo.

Por lo visto, persisten incertidumbres respecto al origen de los nombres de algunos lugares o a su exacta localización, lo que provoca confusión. Quizás la dinámica económica, cultural y política tenga su contribución ya que, sin duda alguna la región mantuvo en vilo a muchos. Y en los meses más recientes, vuelve cobrar un nuevo interés y este se debe a causa de su actividad sísmica.

1.2 GEOLOGÍA DE LA ZONA

El epicentro del terremoto se encuentra en las faldas orientales del volcán Poás. El área de mayor afectación se encuentra, sin embargo, donde se interdigitan los macizos volcánicos del Poás y Barva.

Ambos macizos de la Cordillera Central se han formado por el subsecuente apilamiento de volcanitas durante al menos tres etapas principales a lo largo de casi un millón de años: Protocordillera, Paleocordillera y Neocordillera (Soto, 1994; Gans et al., 2002; 2003).

El río Sarapiquí forma un profundo valle cercano a la divisoria de cuneta donde convergen ambos macizos, mostrando la geología aflorante más antigua, mientras que sus tributarios principales al oriente exponen la geología del macizo del Barva y al occidente, la del Poás. La geología se muestra en la Fig. 1.1 y la secuencia estratigráfica se detalla en la Fig. 1.2.

Basamento local

La secuencia aflorante más antigua fue nominada por Soto (1999) como Unidad Río Sarapiquí (SAR en Figs. 1.1 y 1.2). Consiste mayoritariamente de brechas y tobos de flujo, así como epiclastos, lavas subordinadas y está coronada por la ignimbrita de la Formación Tiribí, que aflora en la intersección entre los ríos María Aguilar y Sarapiquí (Soto et al., 2008). Las lavas predominantes son andesitas basálticas con piroxenos y olivino subordinado. Puesto que la edad de las ignimbritas es de 322 ka (Pérez *et al.*, 2006), la secuencia es más antigua que esta, especulativamente hasta ~500 ka, y corresponde con la Paleocordillera.

PaleoPoás y PaleoBarva

Sobreyacen discordantemente a la Unidad Río Sarapiquí, lo que Soto (1999) ha llamado unidades PaleoPoás (al oeste del río Sarapiquí) y PaleoBarva (al este del Sarapiquí).

PaleoPoás (PPO) se compone mayoritariamente de lavas, aunque incluye gran parte de brechas, tobos y epiclastos interdigitados. La composición petrográfica de las lavas es desde andesitas basálticas con uno o dos piroxenos hasta basaltos (piroxeno + olivino).

PaleoBarva (PBA) está caracterizada por una secuencia de lavas principalmente, así como brechas y tobos subordinadas. Las lavas mejor observadas y ampliamente distribuidas son andesitas (ácidas con alto potasio) con un 50% de cristales sobresalientes de plagioclasas tabulares.

Hacia el norte de la Hoja Poás, en la Hoja Río Cuarto, afloran lavas andesíticas que fueron mapeadas por Soto (1999) como PaleoBarva, y que han sido datadas por Carr et al. (2007) entre 200-260 ka, y que fueron correlacionadas temporalmente con el Miembro Bermúdez del NeoBarva, al sur del macizo del Barva (Arredondo & Soto, 2006; Soto & Arredondo, 2007). Los criterios para mapear las unidades Paleo- han sido morfológicos y estratigráficos, pero aún se carece de edades radiométricas en detalle. Con base en lo expuesto, se sugiere que estas dos unidades PaleoBarva y PaleoPoás tengan edades comprendidas entre 200-320 ka.

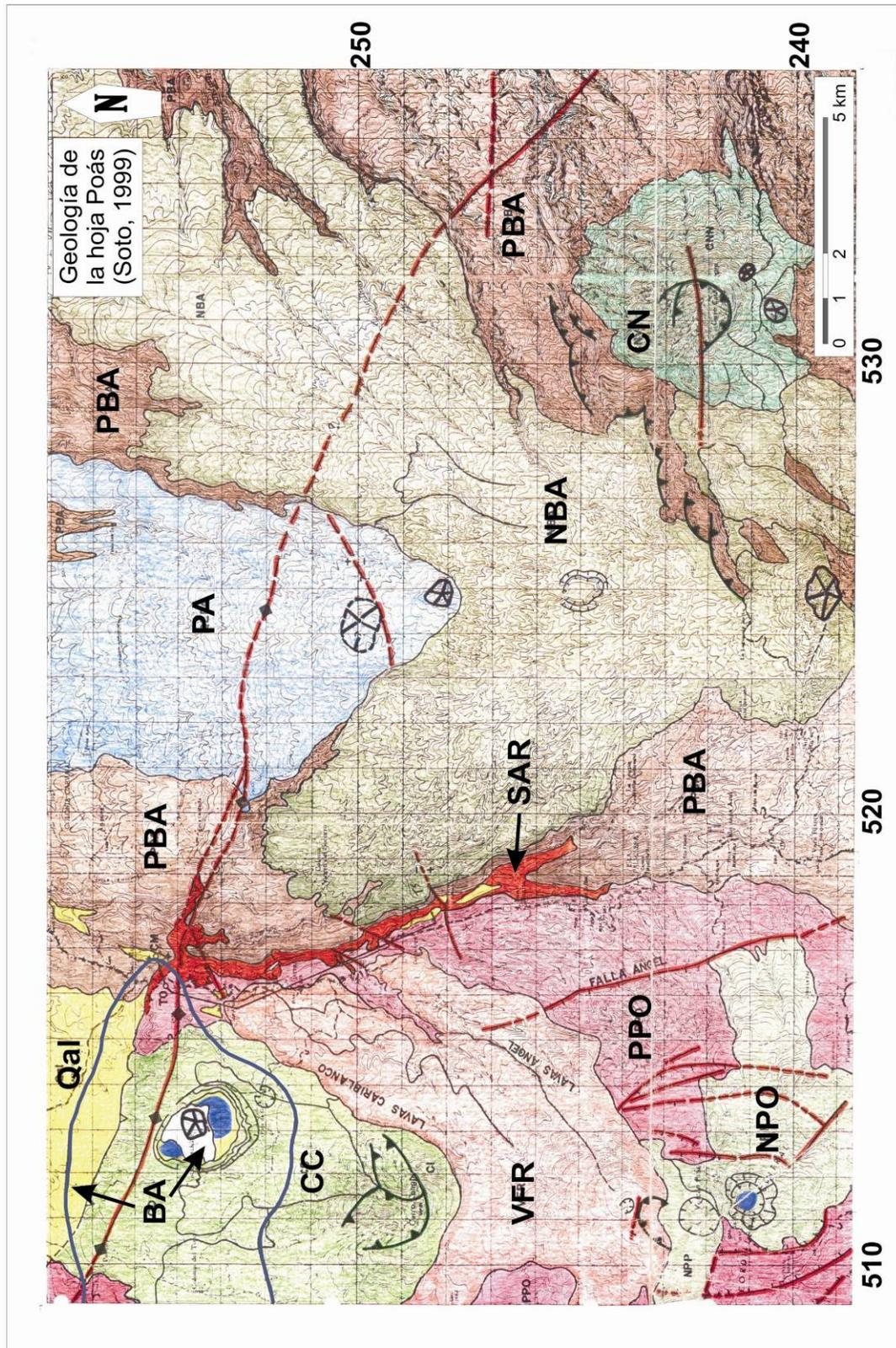


Fig. 1.1: Mapa geológico de la hoja Poás, área epicentral y periférica del terremoto.

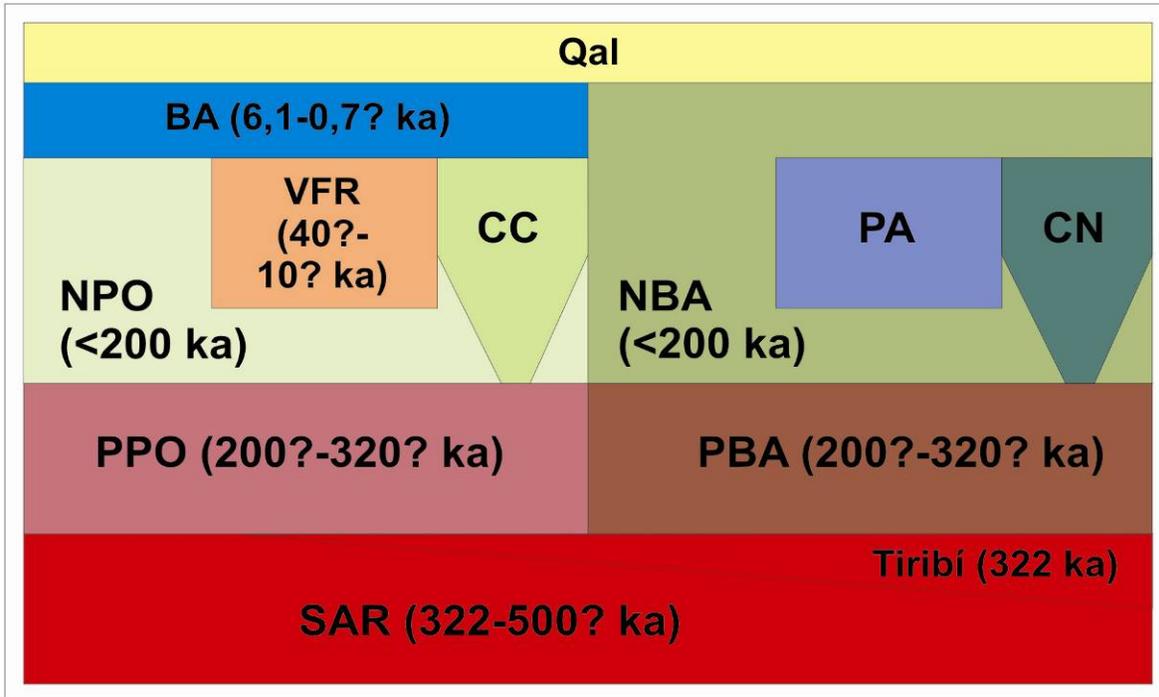


Fig. 1.2: Esquema estratigráfico del área epicentral y periférica del terremoto. Las siglas tal cual la figura 1 y el texto. Edades posibles en miles de años (ka).

El macizo del Barva

En el macizo del Barva, sobreyacen a PaleoBarva (y por lo tanto con edades posibles <200 ka) las unidades nominadas por Soto (1999) como Neo-Barva, Pozo Azul y las del volcán Cacho Negro.

Neo-Barva (NBA) es una compleja secuencia, cuyos detalles estratigráficos son poco claros, debido a que cubren una vasta área cubierta por selva. Parece que las lavas son mayoritarias e intercaladas entre ellas hay una serie de tobas de flujo y epiclastos, donde predominan andesitas basálticas con alto potasio y con dos piroxenos y microfenocristales de olivino. La morfología suave del sector septentrional del volcán obedece a que las coladas de lava están sobreyacidas por piroclastos de un enorme flujo de pómez proveniente del Barva, que suaviza la morfología, tapizándola. Junto con otros paquetes de tefras, afloran desde Cinchona hacia el sur hasta gran parte de la Hoja Barva en el flanco sur del Poás. Probablemente la *"lapilli tuff"* que Prosser & Carr (1987) atribuyen al Poás, pues lo cubre profusamente, sea este paquete de pómez o al menos uno, y la muestra datada por ellos con radiocarbón, documento más bien un gran evento pliniano (quizás caldérico) del Barva, hace unos 40 ka. Esta secuencia piroclástica ha sido estudiada con más detalle por Alvarado & Salani (2004).

La Unidad Pozo Azul (PA) es más joven y superpuesta a las lavas de la Unidad Neo-Barva, formando un pequeño escudo de lavas, en donde se identifican los conos Pozo Azul y Río Peje como las fuentes de sus rocas. Las lavas inferiores son andesitas basálticas con alto potasio (plagioclasa tabular de varios mm + piroxeno) y las superiores son afaníticas, muy vesiculares, con estructuras de flujo y profusamente lajeadas.

El volcán Cacho Negro (CN) parece estar formado mayoritariamente por lavas, de las cuales un par de análisis químicos indican que son andesitas basálticas (Malavassi, 1991; p. 432). El cráter abierto hacia el WNW está cortado por una falla (vertical, sin nombre) que secciona al volcán de este a oeste, y que parece haber favorecido su erosión. Hay dos conitos piroclásticos, llamados Cachito 1 y 2 por Soto (1999) en su parte sur.

El macizo del Poás

En el macizo del Poás, sobreyacen a PaleoPoás (y por lo tanto con edades posibles <200 ka) las unidades nominadas por Soto (1999) como Von Frantzius, Neo-Poás, Congo y Bosque Alegre.

En la Unidad Von Frantzius (VFR) predominan los flujos de lava procedentes del cono Von Frantzius, interdigitados con brechas y epiclastos, y sobreyacidos por delgados depósitos epiclásticos y piroclásticos. Se pueden reconocer por lo menos cinco campos de coladas de lava superpuestos: el más antiguo parece ser el del lado noroccidental del volcán, luego las lavas Cariblanco (tres campos aflorantes al noreste) y por último las lavas Ángel, aflorantes al sur del caserío de Cariblanco. Las lavas Cariblanco son andesitas basálticas con dos piroxenos y olivino subordinado, y se distinguen de las Ángel porque éstas tienen una textura más porfirítica (alrededor de 70% de cristales contra 40% de las otras) y con olivino, en conjuntos glomeroporfiríticos (plagioclasa + ortopiroxeno + olivino, con clinopiroxeno subordinado). Químicamente, las Ángel son más básicas (menos sílice, más magnesio) a pesar de que ambas son andesitas basálticas. La edad de este volcán ha sido estimada por Prosser & Carr (1987), en unos 40 ka. Se estima que las últimas coladas del Von Frantzius podrían tener una edad máxima de 10 ka, y por lo tanto el Von Frantzius se habría desarrollado entre hace 40 y 10 ka.

La Unidad Neo-Poás (NPO) comprende los productos emitidos de los cráteres Botos y Principal del Poás. Las lavas del Botos rellenan principalmente el piso de la cúspide del Poás, limitadas por escarpes de fallas, y son basaltos y andesitas basálticas principalmente (Prosser & Carr, 1987; Cigolini *et al.*, 1991; Malavassi, 1991). Los depósitos del cráter Principal son mayoritariamente piroclásticos distribuidos alrededor del cráter. Prosser & Carr (1987) documentan tres eventos de colapso interno del cráter, e identifican tres flujos de lava que habrían sido eruptados del cráter hacia el norte y noroeste, antes de su primer y principal colapso, y dos lavas posteriores a él.

El volcán Cerro Congo (CC) es un estratocono poco conocido, debido al inacceso relativo a sus partes proximales y a la carencia de cortes de caminos suficientemente profundos, para destacar niveles guías de correlación. En su parte proximal, las rocas son basaltos porfiríticos (plagioclasa+olivino±piroxeno). En la parte nororiental del Congo y que se extienden hasta el maar de Hule, sitio en donde fueron voladas en parte durante la génesis del mar, son básicamente andesitas basálticas, algunas porfiríticas, algunas que otras son afíricas. En la parte distal se incluye la cobertura de epiclastos y piroclastos de flujo. Especialmente en los ríos María Aguilar y Sardinal, aflora un espeso depósito de lodo que contiene numerosas bombas de una lava afírica vítrea (basalto), de tamaño centimétrico a métrico. Se interpreta como un enorme lahar originado durante la evacuación explosiva de las bombas contenidas, el cual es en parte sobreyacido por lavas de composición similar.

La Unidad Bosque Alegre (BA) comprende los productos emitidos desde el maar de Hule y el cráter de explosión Pata de Gallo. Sobreyacen localmente a los productos del volcán Cerro Congo. Son básicamente piroclastitas de oleadas, flujo, caída, una lava intramaárica y un conito de piroclastos también intramaárico. La lava y los depósitos del cono intramaáricos, son basaltos con olivino, con un contenido de sílice entre 50-51% (Tournon, 1984; Prosser & Carr, 1987; Malavassi, 1991). Varios detalles stratigráficos y sobre la génesis del maar han evolucionado en los trabajos de Soto (1990, 1999) y Alvarado & Salani (2004, 2009), en donde se concluye que este maar se formó hace 6,1 ka.

Sedimentos fluviales y epiclásticos inconsolidados (Qal)

Son profusos en el extremo noroccidental de la Hoja Poás, y representan las facies muy distales del Congo y los depósitos de piedemonte del escarpe de San Miguel. Se incluyen también en esta unidad los sedimentos depositados en el río María Aguilar, particularmente aguas arriba del puente de la carretera principal. Esta cuenca pequeña, de más características fluviales que lacustres, se originó por el basculamiento y combamiento originado por la falla-pliegue del escarpe de San Miguel, que represó ligeramente el río y actuó como cuenca de depositación de sedimentos finos volcaniclásticos poco retrabajados.

Por otra parte, existen una serie de terrazas colgadas adosadas a las paredes del río Sarapiquí. Hay dos niveles de terrazas: uno cerca de 120 m sobre el cauce actual y otro entre los 10 y 50 m sobre el cauce actual. Litológicamente, muestran una compleja anatomía de lóbulos fluviales intercalados con otros lóbulos de lahares y hasta coluvios, cuyo espesor conjunto alcanza las decenas de metros. Parecen documentar al menos dos períodos de levantamiento intenso y quizás rápido.

1.3 TECTÓNICA DE LA ZONA

La principal fuente sísmica de la Cordillera Volcánica Central es el fallamiento cortical. Las fallas y lineamientos que se pueden observar en las fotografías aéreas son en general de mediana longitud (menos de 20 km), con excepción de las fallas San Miguel, Volcán Viejo-Aguas Zarcas, Zarcero y Alajuela, aunque algunas podrían estar total o parcialmente cubiertas por productos volcánicos recientes. Estas fallas cortan rocas volcánicas con edades inferiores a 600 ka y en su mayoría tienen edades inferiores a 300-100 ka, por lo que se consideran como potencialmente activas (Fig. 1.3). Una descripción de las principales fallas se realiza a continuación.

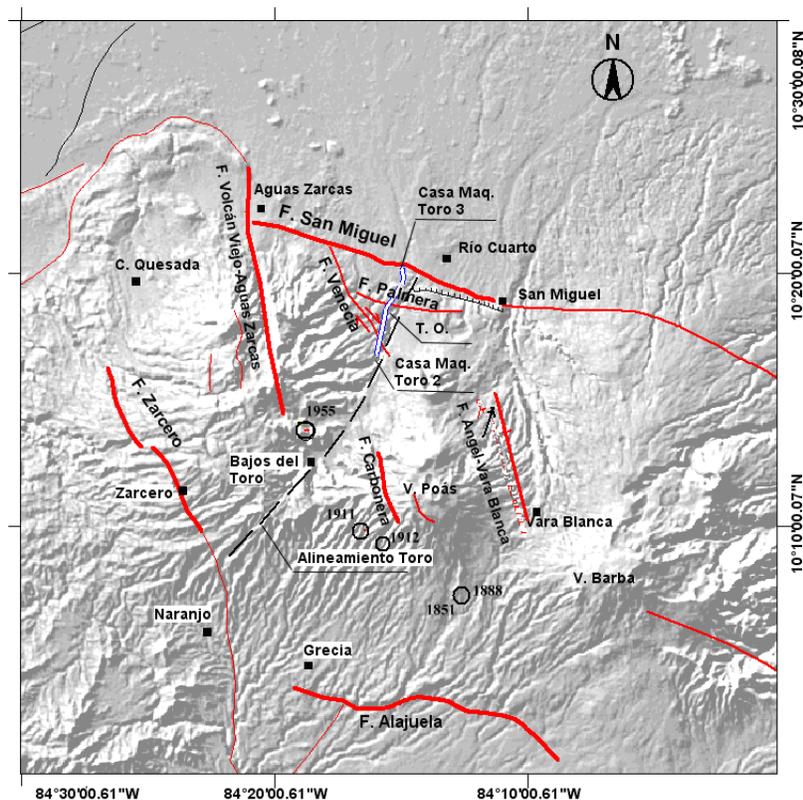


Fig. 1.3: Estructuras tectónicas principales (en rojo) y terremotos históricos en el sector oeste de la Cordillera Volcánica Central (círculos abiertos con fechas de los terremotos). Fallas con base en Alvarado et al. (1988); Soto (1999); Alvarado & Arroyo (2003) y Denyer et al. (2003).

Fallas San Miguel y Alajuela

La falla San Miguel (Fig. 1.4) de rumbo oeste-noroeste se localiza sobre el flanco norte del macizo del volcán Poás y muestra un prominente escarpe facetado al norte (Alvarado *et al.*, 1988). Esta falla ha sido interpretada por algunos autores (p.ej. Bergoeing *et al.*, 1983) como de tipo normal. Borgia *et al.* (1990) proponen que el escarpe es la expresión morfológica de un pliegue asociado con una falla de propagación inversa, al igual que la falla de Alajuela, ubicada al sur del macizo del Poás.

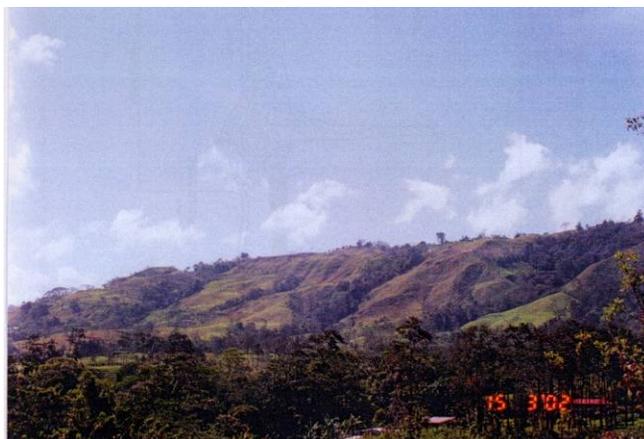


Fig. 1.4: Escarpe de la falla San Miguel visto desde el norte.

Montero *et al.* (1998) extienden la traza de la falla San Miguel desde Venecia hasta unos 5 km al este de San Miguel de Sarapiquí, para una longitud de 18,1 km, y con un rumbo $N72^{\circ}W \pm 15^{\circ}$. Le atribuyen un movimiento de tipo inverso, con una inclinación aún desconocida.

Soto (1999) adopta la propuesta de Borgia *et al.* (1990) considerando que la falla continúa hacia el sureste como una flexura monoclinal orientada al $N70^{\circ}W$ y, finalmente, como una falla de dirección $N45^{\circ}W$, con movimiento relativo desconocido, aunque podría ser de desplazamiento de rumbo.

En coincidencia con Arroyo & Alvarado (2002) se considera que la falla San Miguel, de rumbo $N75^{\circ}W$, es una falla activa, de tipo inverso con una componente dextral.

El escarpe de Alajuela es una geoforma conocida desde mediados del siglo XX. En el mapa geológico de Costa Rica (DGMP, 1963) aparece la Falla de Alajuela, sin clasificación, con rumbo WNW. Tradicionalmente había sido interpretada como una falla normal (p.e. Bohnenberger & Madrigal, 1968; Dóndoli & Chaves, 1968; Dóndoli *et al.*, 1968). La falla de Alajuela se extiende por unos 20 km, desde cerca de la población de Grecia al oeste hasta cerca de la localidad de Santa Bárbara de Heredia al este (Fig. 3). Muestra un escarpe facetado al sur, de rumbo sinuoso entre WNW a ENE, que es la expresión del flanco delantero de un pliegue anticlinal asociado con una falla de propagación inversa.

Borgia *et al.* (1990) consideran que las fallas San Miguel y Alajuela se relacionan con el colapso gravitacional del macizo volcánico del Poás. Montero (1994) considera que son los esfuerzos regionales los que determinan la orientación de las fallas de San Miguel y Alajuela.

Falla Ángel-Varablanca

La falla Ángel-Varablanca, se expresa en superficie como una serie de segmentos con rumbo norte a noroeste, que se localizan sobre el flanco este y sureste del macizo del Poás. Tiene una extensión de al menos 15 km. Su nombre ha cambiado entre diversos autores, denominándosele como falla Ángel (Alvarado *et al.*, 1988; Barquero & Soto, 1992; Laporte *et al.*, 1995; Soto, 1999; Denyer *et al.*, 2003) y como falla Varablanca (Climent *et al.*, 2002). Alvarado *et al.* (1988) destacan que la falla Ángel es una falla de rumbo $N30^{\circ}W$ cuya prolongación hacia el noroeste parece estar cubierta por materiales volcánicos del Holoceno. Soto (1999) muestra la traza de esta falla a escala 1:50 000, siguiendo el mismo rumbo de la mostrada por Alvarado *et al.* (1988), pero mejor ubicada. Para evitar confusiones en el futuro, renombramos esta falla como Ángel-Varablanca, retomando la traza sugerida por Soto (1999).

La falla muestra escarpes facetados tanto al este como al oeste. Localmente presenta valles lineales y ríos adaptados o desplazados y sillas de falla. La falla sugiere una componente dextral y normal.

Fallas de la margen izquierda del río Sarapiquí

A lo largo de diversos cortes en carreteras, en taludes artificiales y naturales y en el túnel del proyecto hidroeléctrico Cariblanco, todos ubicados sobre la margen izquierda del río Sarapiquí, se han encontrado fallas cortando diversas unidades volcánicas. A continuación describimos algunos ejemplos que reflejan la tectónica del Pleistoceno Superior al Holoceno, que ha afectado el sector norte entre los volcanes Poás y Barva. En un corte sobre la carretera entre Varablanca y Montaña Azul, se observó una falla con una separación de inclinación normal de 110 cm afectando tefras (sitio 1 en Fig. 1.5; Fig. 1.6A). En un afloramiento en un corte artificial cerca de Montaña Azul se encontró una serie de fallas con componentes lateral izquierda y normal y estrías subhorizontales, con rumbo entre N15°-30°E e inclinaciones subverticales, cortando depósitos piroclásticos (sitio 2 en Fig. 1.5; Fig. 1.6B).

Un poco más al norte de Montaña Azul, en un corte en la carretera se observó una falla cortando tefras con una aparente separación normal y donde levanta el lado norte (sitio 3 en Fig. 1.5). En la catarata La Paz, se observó una falla de componente oblicua sinistral-normal, de rumbo N15°E, inclinación 70°W y un deslizamiento de 34° al S20°E (sitio 4 en Fig. 1.5).

En el sector del túnel del proyecto hidroeléctrico Cariblanco (trcho entre las flechas con el número 5 en la figura 5), se midieron trece fallas de alto ángulo a verticales cortando lavas y lahares. Nueve fallas (69%) tienen rumbos entre 345°-015°. Las restantes cuatro (31%) tienen direcciones muy diversas.

Una interpretación de las fotos aéreas sugiere un par de lineamientos en esta zona, los cuales tienen una prominencia débil a moderada (Fig. 1.5). Uno tiene un rumbo N20°-30°W y el otro un rumbo N10°-15°E. Este último parece terminar contra el primero. El lineamiento N20°-30°W tiene una extensión de unos 5 km y se iniciaría cerca de Montaña Azul, pasaría del lado oeste de Cinchona y terminaría al cruzar el río Brazo del Ángel. Este lineamiento muestra valles lineales, estribaciones truncadas y ríos adaptados. El lineamiento de rumbo N10°-15°E tiene una extensión de 4 km y sigue valles lineales a lo largo de un trcho del río La Paz y de un afluente de este y cortaría transversalmente el río Sarapiquí hasta llegar cerca del río San Fernando.

Con base en la tectónica regional y local y la sismotectónica (ver capítulo siguiente), se considera que las fallas con rumbos al NNE se relacionan con fallas sinestrales y las de rumbo NW con fallas dextrales. Una interpretación similar se sugiere para los lineamientos, si estos se relacionan con fallas recientes.

Falla Volcán Viejo-Aguas Zarcas

Falla con rumbo NNW-SSE, ubicada cerca del volcán Viejo, con una longitud aproximada de 25 km y un movimiento propuesto en tijera (Fig. 3; Alvarado *et al.*, 1988). Sigue un trazo de valle lineal.

Falla Carbonera

Falla con rumbo nor-noroeste, de unos 10 km de longitud, ubicada sobre el flanco oeste del volcán Poás (Fig. 3; Alvarado *et al.*, 1988). Presenta prominentes escarpes y divisorias de aguas ligeramente desplazadas en sentido dextral en su extremo sur, a partir de la cual su continuidad no es evidente por estar cubierta por depósitos volcánicos recientes del Cuaternario Superior.

Falla Zarcero

Corta formaciones volcánicas cuaternarias en el flanco oeste de los volcanes Platanar y Porvenir (Fig. 3). La falla sigue un rumbo nor-noroeste por cerca de 10 km y pasa al oeste de las poblaciones de Zarcero y Laguna (Alvarado *et al.*, 1998). Denyer *et al.* (2003) la extienden hacia el sur con una longitud mayor a 40 km. Muestra un escarpe facetado al este y tiene una componente normal (bloque este descendido), aunque no se descarta una componente de rumbo dextral.

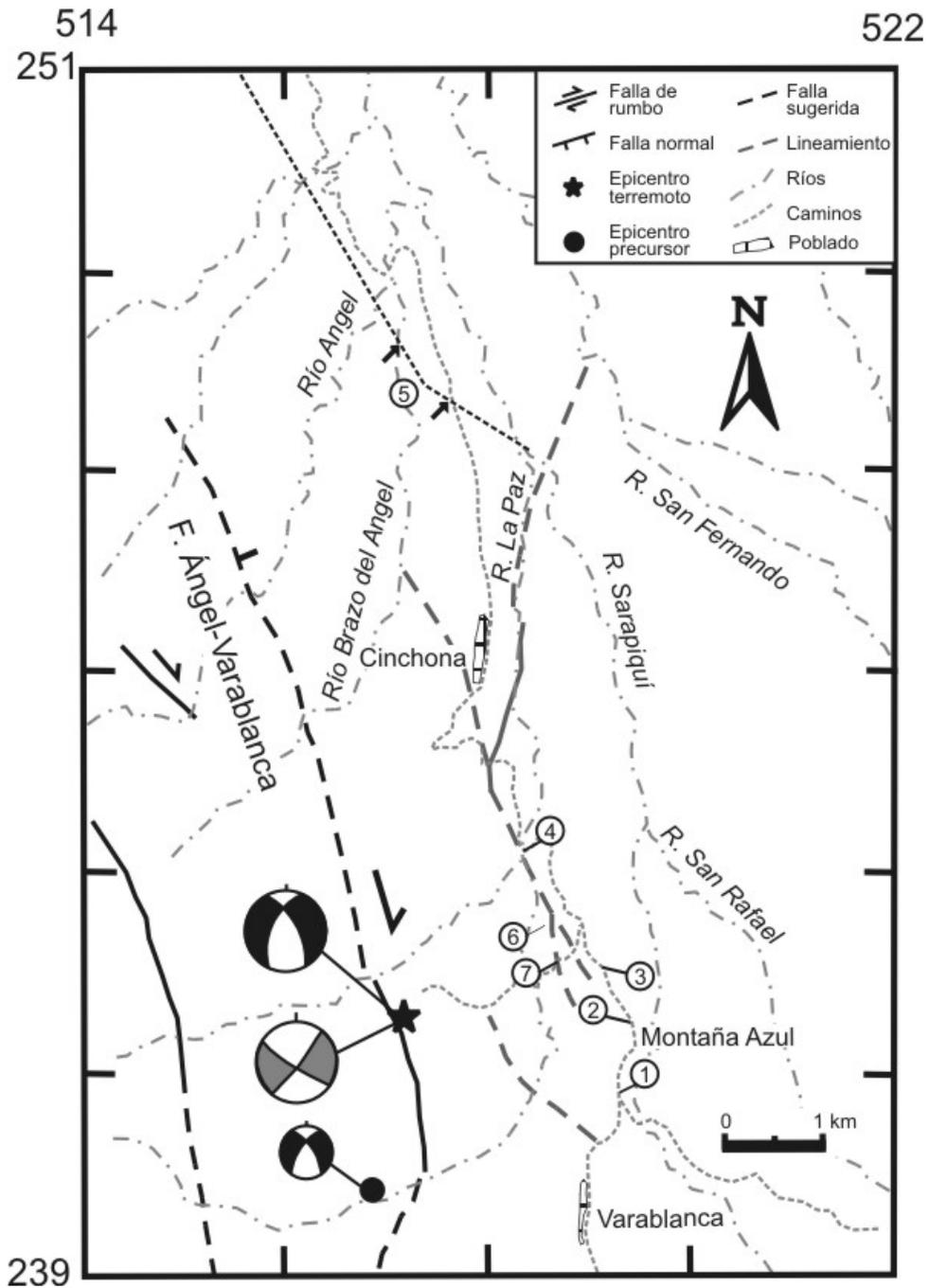


Fig. 1.5: Sistema de fallas y lineamientos sugestivos de ser fallas recientes en Cinchona y alrededores. Las flechas definen la zona del túnel del proyecto hidroeléctrico Cariblanco (línea a trazos cortos negra) donde se determinaron fallas (ver texto). Mecanismos focales en color negro son los obtenidos por la RSN (ICE-UCR) y el de color gris es el obtenido por Harvard.

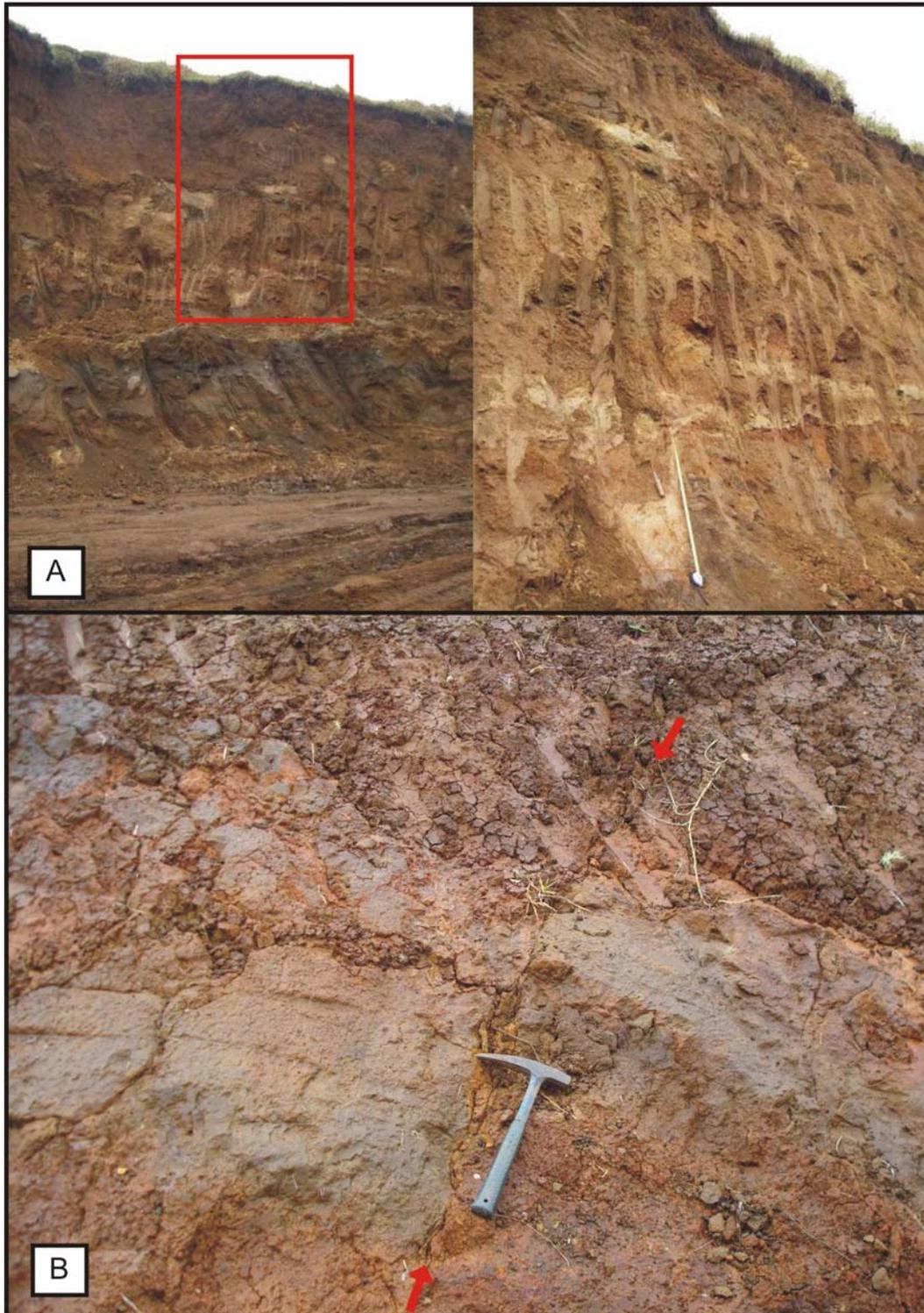


Figura 1.6. A. Falla afectando tefras al norte de Varablanca, con 110 cm de desplazamiento posible (ver cinta métrica en foto lado derecho). No hay rupturas visibles recientes. Ubicación 519,421 E – 240,805 N (sitio 1 en Fig. 5). B. Vista al sur en talud inclinado de las fallas afectando piroclastos en el sitio 2 en la figura 5.

1.4 SISMICIDAD HISTÓRICA

La zona de ha sido afectada por terremotos originados por fallamiento cortical en varias oportunidades, durante los últimos 150 años. Históricamente, se registra la ocurrencia de los terremotos indicados en el cuadro 1.1 y Fig. 1.3. Además, se han detectado algunos enjambres sísmicos de corta duración.

Cuadro 1.1: Sismicidad histórica

Fecha	Ms	Latitud N	Longitud W	Prof. km	Fuente
28-03-1851	5,5	10.133	84.2	15,5	Alvarado et al, 1988
30-12-1888	5,7	10.133	84.2	15	Alvarado et al, 1988
28-08-1911	5,8	10.167	84.283	18	Alvarado et al, 1988
06-06-1912	5,1	10.167	84.283	18	Alvarado et al, 1988
01-09-1955	5,5	10.233	84.317	18	Alvarado et al, 1988

A raíz de los terremotos que ocurridos en la zona, se han estimado intensidades máximas de VIII (Mercalli Modificada). Los daños principales ocasionados por estos terremotos han sido los deslizamientos y el represamiento de ríos, lo que ha originado avalanchas por los cauces de los ríos y quebradas.

El terremoto de 1851

Este sismo fue reportado por González (1910) el día 28 de marzo de 1851. Sin embargo, en La Gaceta N° 126 del 26 de abril de 1851, lo reportan como ocurrido el día 18 de marzo de 1851. Morales (1985) lo reporta el día 28 mientras que Alvarado *et al.* (1988) y Montero (1989) los reportan el día 18 (Cuadro 1.2). Pero, independientemente de la fecha, lo importante son los daños que ocasionó y tratar de determinar una fuente sísmica para este evento.

Cuadro 1.2: Datos macrosísmicos del sismo de 1851.

Fecha	Hora	Lat. N	Long. W	Prof. (km)	M _i	Ms	Fuente
1851-03-28	13:15	10º 08'	84º11,7'		5,5		Morales, 1985
1851-03-18		10º 08'	84º12'	15,5	5,5	6,0	Alvarado <i>et al.</i> 1988

La Gaceta N° 126 (1851) reseña un informe de una comisión examinadora que contabilizó 145 casas dañadas en San José, de las cuales fue necesario demoler 18, por haber quedado inhabitables. También se mandó a demoler *“la torre de la Iglesia Catedral, que quedó enteramente desplomada”* como consecuencia de la sacudida sísmica.

También La Gaceta informa que, con respecto a San José, *“el temblor fue menos fuerte en Cartago y más en Heredia y Alajuela; parece que en esta ciudad fue donde causó mayores estragos, ya por haber sido más violento el movimiento ó porque sus edificios no presentaban bastante firmeza.”*

En San José, se apreció que *“el movimiento fue ondulatorio y que vino de norte a Sur, porque así apareció a la vista, y porque las paredes colocadas de Este a Oeste fueron las que sufrieron más”*.

Con respecto a las réplicas, La Gaceta consigna que *“los temblores siguieron sintiéndose muy pequeños algunos días después, pero hoy (26 de abril) han cesado enteramente”*.

El terremoto del 30 de diciembre de 1888

Este fue un terremoto bastante destructivo, que afectó especialmente la falda sur del volcán Poás y a las ciudades de Alajuela, Heredia y San José, entre otras poblaciones del Valle Central (Peraldo & Montero, 1999).

Terremoto de Toro Amarillo, 29-08-1911

El sismo principal ocurrió el 28 de agosto de 1911 a las 10:06 hora local, causó la caída de algunas casas y la formación de múltiples grietas y grandes deslizamientos en la población de Bajos del Toro y alrededores. Oficialmente, no se informó de muertos en esta pequeña población que en 1911 tenía alrededor de 100 habitantes distribuidos en 25 casas. Esto se debió principalmente a que la mayoría de los deslizamientos (más de 60) se desarrollaron en zonas deshabitadas y selváticas y al hecho de que las viviendas eran de madera (Alfaro *et al.*, 1911).

Alvarado *et al.* (1988) ubicaron el área mesosísmica aproximadamente en la población de Bajos de Toro, donde se estimó que la intensidad máxima MM (Io) fue de grado VII. Menciona, adicionalmente, que varias casas resultaron dañadas en Sarapiquí, Naranjo, Grecia y San Ramón.

Precursores: Aparentemente, hubo alguna actividad sísmica precursora desde las 5:00 (T.L.) del 28 de agosto de 1911, es decir, unas 5 horas antes del sismo principal (Alvarado *et al.*, 1988), sin embargo, no hay detalles de la cantidad de sismos y su intensidad.

Terremoto de Sarchí, 06-06-1912

El evento principal fue el 6 de junio de 1912 a las 00:40 (T.L.) (Tristán *et al.*, 1912). La máxima intensidad MM (Io) estimada para este evento fue de grado VII (Alvarado *et al.*, 1988). Se originaron grandes deslizamientos en un área de aproximadamente 325 hectáreas conocida como "Potrerillos" o "Laguna Vieja". El cerro situado entre los ríos Sarchí y Trojas, conocido como "Isla Matamoros", mostraba similares características de destrucción con largas grietas de un metro de ancho. Los sectores poblados más dañados fueron los de Grecia, Sarchí, Naranjo y pueblos vecinos. Hubo daños a partir de San Isidro de Alajuela, San Pedro de Poás y en las comarcas anteriormente mencionadas (Fig. 2). El evento sísmico principal generó deslizamientos, algunos de los cuales represaron temporalmente los cauces de los ríos, originando crecidas cuando los diques o barreras de escombros cedían a la presión de las aguas. Una "cabeza de agua" en el río Sarchí arrasó, una hora después del terremoto, el puente situado en el camino de Grecia a Sarchí, continuando la crecida hacia el río Colorado hasta llegar al río Grande. El río San Juan (afluente del Sarchí) fue afectado devolviendo el sentido de sus aguas unos 700 m. Otros desbordamientos similares bajaron simultáneamente por los ríos Anonos, Desagüe y Gorrión, con intervalos de aproximadamente 5 minutos, matando mucho ganado y arrasando algunas casas, pereciendo ahogados sus moradores, en un número total de 17 (Tristán *et al.*, 1912; Sapper, 1925).

Precursores: Algunas horas antes del terremoto se sintieron en la región varios temblores pequeños, casi todos precedidos por un retumbo sísmico.

Réplicas: El 9 de junio a las 09:16 (LT), el sismoscopio Ewing en San José registró dos temblores, separados uno del otro por un espacio de tiempo de 35 segundos. El segundo fue más intenso y con una duración estimada de 36 segundos; fue sentido en el curso superior del río Sarchí con una intensidad Rossi-Forel de aproximadamente VII (Intensidad MM VI), seguido de 35 temblores más, con intensidades MM Io > entre III y II. A partir de esta fecha prácticamente no se sintieron o registraron más temblores (Tristán *et al.* 1912).

Terremoto de Toro Amarillo, 01-09-1955

El terremoto causó la destrucción de casas en Río Segundo y la formación de grietas de 500 m de longitud por 1,5 m de ancho y 2 personas muertas; algunos ríos se desbordaron. Daños muy serios se informaron también en Grecia y en San

Juanillo. El área mesosísmica con base en los daños reportados, se ubica cerca de Bajos del Toro, teniendo una intensidad MM máxima (Io) de grado VII, aunque pudo alcanzar grado VIII (Alvarado *et al.*, 1988). El tiempo origen del terremoto de setiembre 01 de 1955 es 11:33:02, 7 LT (Molnar & Sykes, 1969).

Intensidades máximas históricas

Con base en los datos de terremotos históricos, se han determinado que en la zona de la Cordillera Volcánica Central, las intensidades máximas (Mercalli Modificada) que se podían esperar en la zona como se puede observar en la Fig. 1.7, el área puede ser sometida a intensidades de VII a VIII, en la parte sur y suroeste del volcán Poás. Estas intensidades indican sacudidas muy fuertes con daños en casas de mala calidad de construcción y deslizamientos en laderas inestables principalmente. Sin embargo, con el presente terremoto, queda demostrado, que, en la zona, bajo terrenos muy meteorizados, de poca consistencia, inestable y de alta pendiente, la intensidad es incrementada hasta el grado IX.

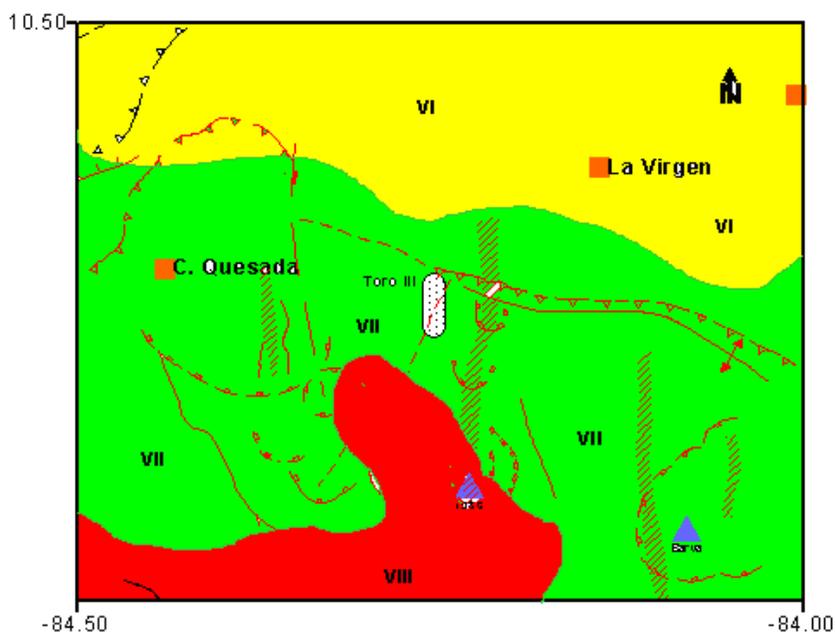


Fig. 1.7: Mapa Intensidades máximas esperadas en la zona de la Cordillera Volcánica Central.

¿Qué podemos esperar desde el punto de vista sismológico?

Claramente los terremotos no se pueden predecir con fecha (hora, día, mes y año) ni ubicación precisa, tan solo el dar un pronóstico de la probabilidad de que tiemble en una región en particular en un lapso de décadas.

Los registros históricos de Costa Rica nos indican que en los siglos XIX y XX que es cuando poseemos un registro histórico e instrumental más confiable, se registraron unos 48 terremotos dañinos, es decir un terremoto cada 4,1 años como promedio.

De ellos, unos 21 fueron producto de fallamiento local (1 por cada 9,5 años), siendo el último previo al reciente del 2009, en 1993 en la región de Turrialba.

Aproximadamente 27 terremotos fueron ocasionados por la interacción de placas tectónicas o subducción (1 por cada 7,4 años), siendo el último el de Damas del 2004.

La posibilidad de que otro sismo fuerte se en Cinchona es muy baja dado que la falla ya liberó gran parte de la energía sísmica. Sin embargo, el registro histórico evidencia que se han registrado terremotos por fallamiento superficial muy cercanos en el tiempo y espacio:

- 1841 (primera destrucción de Cartago) y 1842: 6,5 meses de separación.
- 1910 (terremotos de Cartago) con 21 días de diferencia.
- 1911 y 1912 (terremotos de Toro Amarillo) con 10 meses de lapso.
- 1990 (terremotos de Alajuela y Puriscal) con 7 meses de intervalo.

Alvarado *et al.* (1988) recalcularon el periodo de recurrencia para Toro-Fraijanes en $34,5 \pm 10,3$ años, es decir que debió de haber dado antes del año 2000. Sin embargo, ellos no contaban con la crisis sísmica de 1990-1991 por fallamiento superficial para afinar sus cálculos. Si tomamos en consideración dicha crisis y basándonos en los estudios previos de Montero (1986), se puede recalcular en $30,6 \pm 10,6$ años, es decir que se debía de esperar un evento sísmico adverso entre el 2010 y el 2031. Dicho evento correspondería al presente del 2009.

Tomando ahora en consideración los eventos corticales de 1990 y el presente del 2009, se podría especular en un nuevo ciclo sísmico, que podría estar representado por el único evento que ya se dio en el 2009, o por 2 a 4 eventos separados entre unos meses (para uno gemelo) hasta 10 años.

En conclusión, la actividad sísmica en nuestro país y en la zona norte continuará en el futuro, siendo esto parte del proceso de acomodo normal de la corteza terrestre dentro del entorno tectónico en el que está situada Costa Rica.

1.5 Sísmicidad instrumental

Durante el período de 1992-2006, las estaciones de la Red Sismológica Nacional (RSN) han registrado, dentro de un radio de 25 km con centro en el P.H. Toro 3, un total de 1866 sismos los que se muestran en la Fig. 1.8, de los cuales 776 corresponden a sismos originados por el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe y 1090 a sismos superficiales (profundidades menores a 20 km) y son originados en sistemas de fallamiento local como se detallará más adelante.

Magnitudes: Las magnitudes (cuadro 1.3), calculadas con fórmula de la RSN que se basa en la duración (D) del sismo $MD = -1,21 + 2,38 \log D + 0,0012$ (Boletín RSN) de los eventos registrados son en su mayoría bajas (menores a 4,0). Solamente se ha registrado un evento de magnitud 4,5 en la zona, que se produjo el día 14 de setiembre de 1992 y se ubicó 5 km al NE de Fraijanes.

Cuadro 1.3: Distribución de los sismos por magnitudes.

Rango Mag	No. Sismos
0-1,9	13
2-2,9	849
3-3,9	986
4-4,5	18

Profundidades: Las profundidades de estos eventos localizados por la RSN, son principalmente entre 1 y 20 km y esto indica que se asocian a fallamiento local en la zona. La sismicidad más profunda se asocia al proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe y en esta zona esos sismos alcanzan hasta más o menos 160 km de profundidad y hay mayor concentración de sismos entre los 60 y 100 km, bajo la Cordillera Volcánica Central (Cuadro 1.4, Fig. 1.9).

Cuadro 1.4: Distribución de los sismos por profundidad.

Rango prof. (km)	No. Sismos
1-20	1090
21-50	101
51-160	675

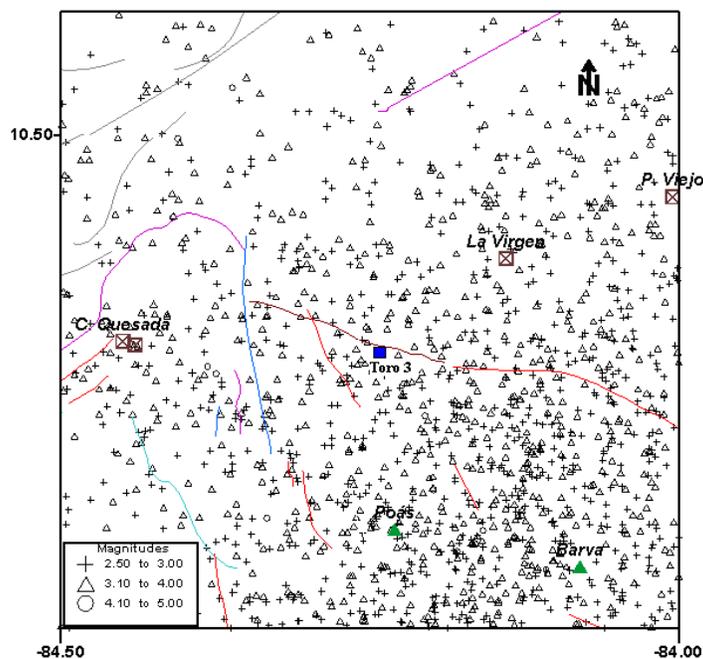


Fig. 1.8: Sismos registrados por la RSN durante el periodo 1992-2006.

Distribución temporal de la sismicidad por años

Como se puede observar en el cuadro 1.5 y Fig. 1.9, los sismos de profundidad somera asociados a fallamiento local, son en general, más numerosos que los profundos que se asocian al proceso de subducción. Sin embargo, en los años 2004, 2005 y 2006 se nota que fueron años anómalos en los cuales se produjeron mayor cantidad de eventos profundos. Quizás esto tenga explicación por el efecto del sismo de Damas de Quepos del 20 de noviembre del 2004 (Mw 6,2) que pudo tener influencia indirecta en el proceso de subducción. El promedio anual de sismos someros es de 72 eventos y el de sismos profundos es de 52. El promedio mensual es de 6 eventos someros y 4 profundos.

**Cuadro 1.5: Distribución temporal de la sismicidad en la región
(Sismos superficiales y profundos)**

AÑO	SUP. (0-20)	PROF. (21-200)	TOTAL
1992	70	36	106
1993	73	16	89
1994	46	11	57
1995	60	13	73
1996	59	16	75
1997	94	19	113
1998	90	10	100
1999	89	23	112
2000	89	96	185
2001	130	37	167
2002	117	50	167
2003	77	90	167
2004	45	129	174
2005	35	93	128
2006	16	138	154

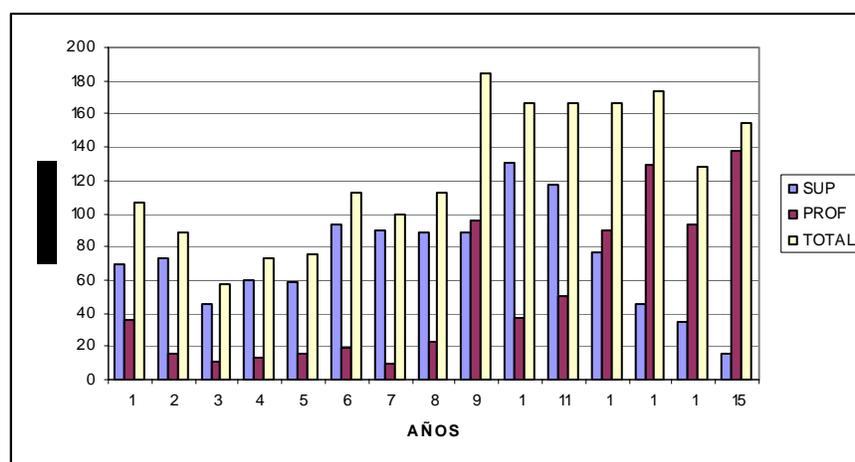


Fig. 1.9: Número anual de sismos periodo 1992-2006 para el área de la figura 1.8 (RSN).

Distribución: La distribución de los sismos es más o menos homogénea en toda la zona, pero en cuanto a lo que a sismos superficiales se refiere (se graficaron los de mejor calidad), estos muestran un agrupamiento hacia el cuadrante SSE de la zona, en los flancos del volcán Poás en donde existen varias fallas activas (Cuadro 1.6, Fig. 1.10, 1.11).

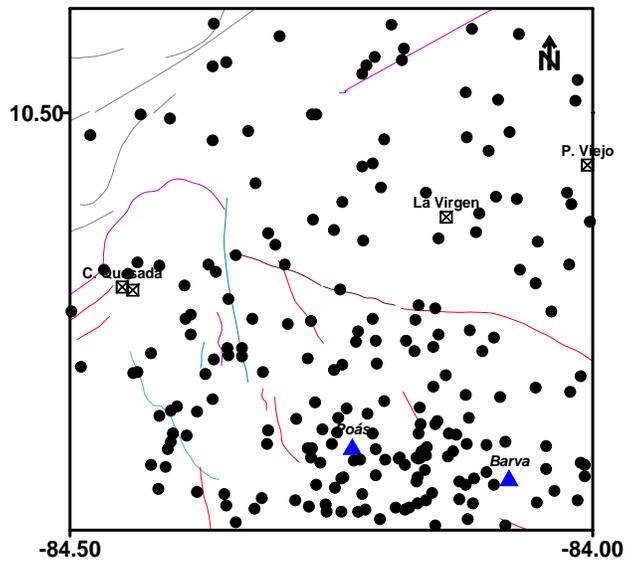


Fig. 1.10: Sismos someros (prof. menor 21 km) de magnitudes mayores a 3,0 e inferior a 4,5 entre 1992 y 2006 (RSN).

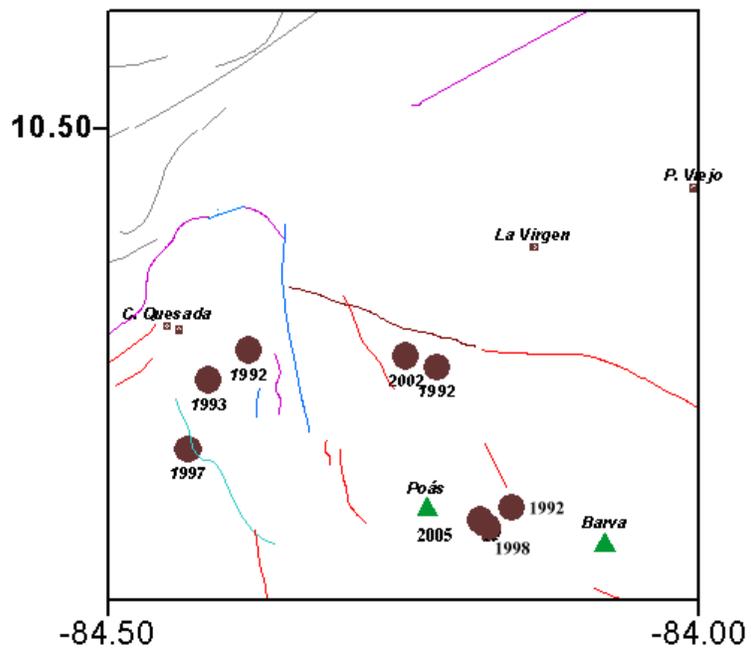


Fig. 1.11: Sismos someros con magnitud mayor a 4,0 e inferior a 4,5. Período 1992-2006 (RSN).

Cuadro 1.6: Sismos mayores a 4,0 en la región de estudio.

Año	Mes	Día	Hr.	Min	Seg.	LAT	LONG	PROF.	MAG
1992	9	2	16	09	45,6	10,298º	-84,222º	4,1	4,1
1992	9	3		31	9,8	10,433º	-84,409º	3,0	4,1
1992	9	14		831	42,5	10,179º	-84,158º	8,5	4,5
1993	4	26		635	18,2	10,287º	-84,415º	0,9	4
1997	7	19		1425	30,3	10,228º	-84,432º	0,1	4,2
1998	4	8		405	26	10,162º	-84,179º	5	4,2
2002	6	7		232	7,3	10,307º	-84,248º	2,9	4,1
2005	6	17		530	34,2	10,168º	-84,185º	1,8	4

Red sismológica Toro-Cariblanco

Con el objetivo de monitorear la zona de los P.H. Toro 3 y P.H. Cariblanco, en donde se conoce de la existencia de varias fallas importantes activas y potencialmente activas y se han registrado al menos tres terremotos en tiempos históricos recientes (1911, 1912, 1955), así como un volcán activo (volcán Poás), el ICE instaló una red sismológica local en la zona que estuvo operando entre el 2004-2006 (Cuadro 1.7, Fig. 1.12).

Cuadro 1.7: RED DE ESTACIONES TORO-CARIBLANCO

No.	Código	Sitio	Latitud	Longitud	Elevac m
01	BTRO	Bajos Toro	10°12,451°	84°18,449°	1638
02	PRT2	Presa Toro I	10°16,014°	84°15,530°	1095
03	LGRC	Laguna Río Cuarto	10°21,703°	84°13,275°	0363
04	FPRA	Finca Pradera	10°18,271°	84°23,349°	1271
05	VIRG	La Virgen	10°24,989°	84°07,384°	0182
06	BARV	Volcán Barva	10°07,813°	84°07,530°	2635
07	VSOC	Virgen Socorro	10°16,118°	84°09,695°	0978
08	POA1	Volcán Poás 1	10°10,992°	84°14,306°	2557
09	PTAL	Pital	10°20,333°	84°23,266°	2411
10	LAMA	La Marina	10°11,790°	84°13,540°	2467

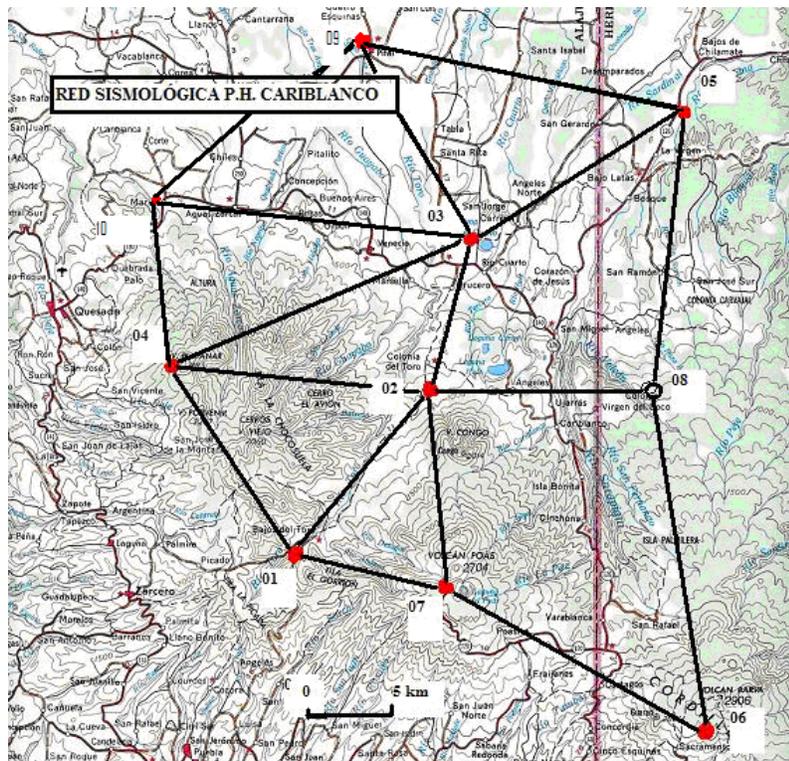


Fig. 1.12: Red de estaciones Toro-Cariblanco.

Sismos procesados

Durante los 27 meses en que estuvo en operación, la red sismológica de Toro-Cariblanco registró los sismos que se presentan en el cuadro 1.8 y Fig. 1.13.

Cuadro 1.8: Sismicidad mensual en Bajos del Toro.

Mes	2004	2005	2006
E		7	7
F		1	1
M		12	8
A		0	12
M		8	13
J		20	6
J		22	3
A	2	0	0
S	38	5	2
O	0	2	3
N	1	12	
D	0	6	

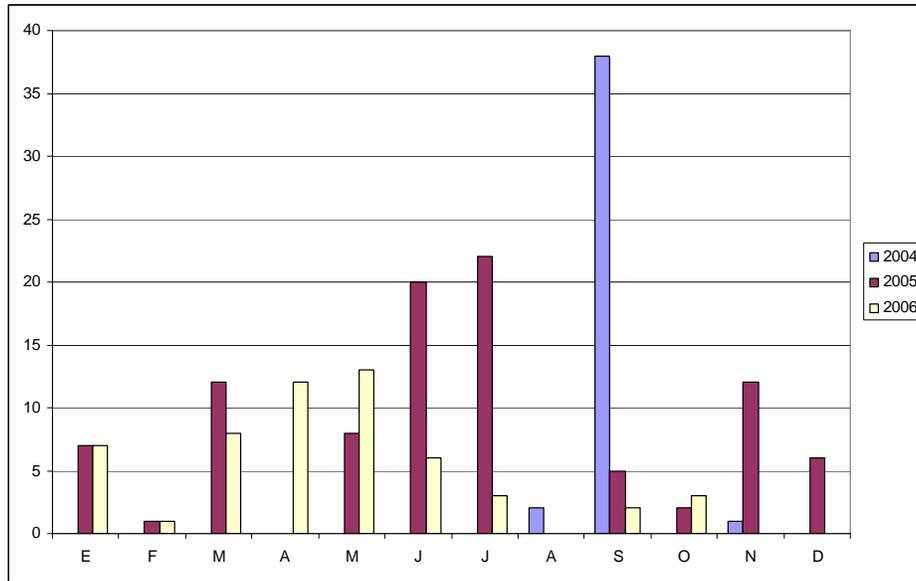


Fig. 1.13: Gráfico de la sismicidad mensual en Bajos del Toro.

La actividad sísmica en la zona de cobertura de la red fue moderada durante el periodo, con un promedio de 10 eventos por mes. Se presentaron dos enjambres sísmicos, uno en el mes de setiembre 2004 entre Bajos del Toro y La Virgen y otro entre junio y julio 2005 en la zona de Vara Blanca.

Magnitudes y profundidades

Las magnitudes de los sismos registrados y localizados durante el periodo 2004-2006 fueron moderadas (Fig. 1.14), con un promedio de 2,0. Se registraron dentro del área, algunos eventos de magnitudes entre 3 y 4. Para el cálculo de las magnitudes se utilizó la misma fórmula de la RSN que da una idea para comparar los sismos entre sí, ya que los equipos son diferentes.

Las profundidades de los eventos fueron mayoritariamente someras (menores a 10 km) que son los sismos asociados a fallamiento local; otros de profundidades hasta de 90 km corresponden a sismos asociados al proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe (Fig. 1.15). Para las localizaciones de los sismos se utilizó el modelo de corteza de Matumoto *et al.* (1977) que es el mismo que utiliza la RSN.

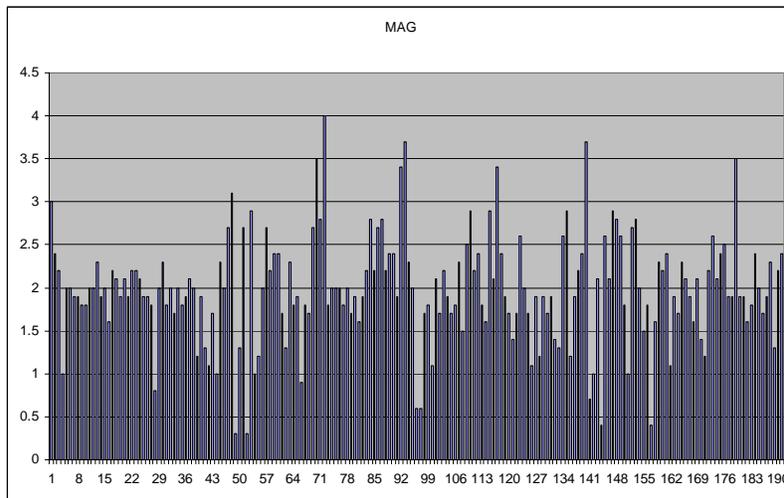


Fig. 1.14: Sismicidad en Bajos del Toro por magnitud (2004-2006).

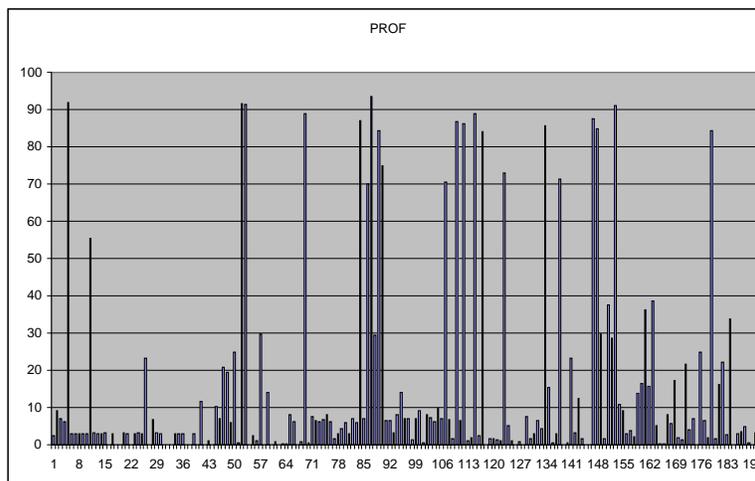


Fig. 1.15: Sismicidad en Bajos del Toro por profundidad (2004-2006).

Distribución de la sismicidad periodo 2004-2006 (Red de P.H. Cariblanco)

La mayor parte de los sismos se localizan en las estribaciones norte de la cordillera Volcánica Central, con concentraciones de eventos principalmente en las cercanías del volcán Poás y en la falla Vara Blanca. En las llanuras del norte se observa cierta sismicidad que se extiende en sentido más o menos NE-SW y que podría corresponder con algunas fallas cubiertas por depósitos recientes, no descritas todavía pues no afloran en superficie (Fig. 1.16).

En la figura 1.15, se muestran los sismos registrados por la red de estaciones digitales portátiles instalada en la región entre los años 2004 y 2006, en donde se puede notar una importante concentración de epicentros en el extremo sur de la falla Ángel-Vara Blanca, donde se produjeron sismos de magnitud moderada, 4 de ellos fueron sentidos en junio y julio del 2005, cuyas magnitudes fueron entre 3,4 y 4,0. Esto hace posible postular esta falla como la posible causante de los sismos de 1851 y 1888. El mecanismo focal realizado para el evento principal, ocurrido el 17 de junio de 2005 (Mag. 4,0) presenta una solución de falla normal con componente de rumbo sinistral, con similar rumbo

pero diferente desplazamiento al propuesto por Alvarado *et al.* (1988) para esta falla. El resultado obtenido este caso es más confiable dado que se tenía una mejor cobertura.

En las inmediaciones del volcán Poás, se observan pocos epicentros de sismos, a pesar de que se han identificado estructuras volcano-tectónicas y tectónicas importantes como la falla Carbonera. Sin embargo; esto puede significar que durante el periodo de estudio estas fallas estaban dentro de una fase de quietud sísmica y no puede interpretarse esto como que las fallas no son activas. Es de destacar, sin embargo, la constante actividad del volcán Poás que ha experimentado importantes cambios geoquímicos así como una sismicidad abundante en la forma de sismos volcánicos de poca energía, relacionados con la constante emanación de gases.

Al norte de Bajos del Toro, en una especie de triángulo delimitado en sus vértices por las poblaciones Aguas Zarcas, Río Cuarto y Bajos del Toro, se observa una cantidad importante de epicentros cuyo origen es difícil de precisar, ya que en esa área se han identificado diferentes estructuras tectónicas que podrían ser sus generadoras, tales como el sistema de fallas Volcán Viejo-Aguas Zarcas, la falla San Miguel y el alineamiento Toro, aunque este último no ha sido posible clasificarlo como falla, pues no se observa en el campo unidades litológicas desplazadas. Cerca de las fallas Zarco y Alajuela han sido localizados muy pocos epicentros en estos dos años de registro.

Al norte de la zona de estudio, propiamente en la llanura, han sido localizados varios epicentros, indicando la existencia de estructuras tectónicas capaces de generarlos, pero cuya expresión morfotectónica no ha sido observada en ningún estudio previo de esta zona o en este informe y, por lo tanto, no se han asignado a alguna o algunas estructuras específicas.

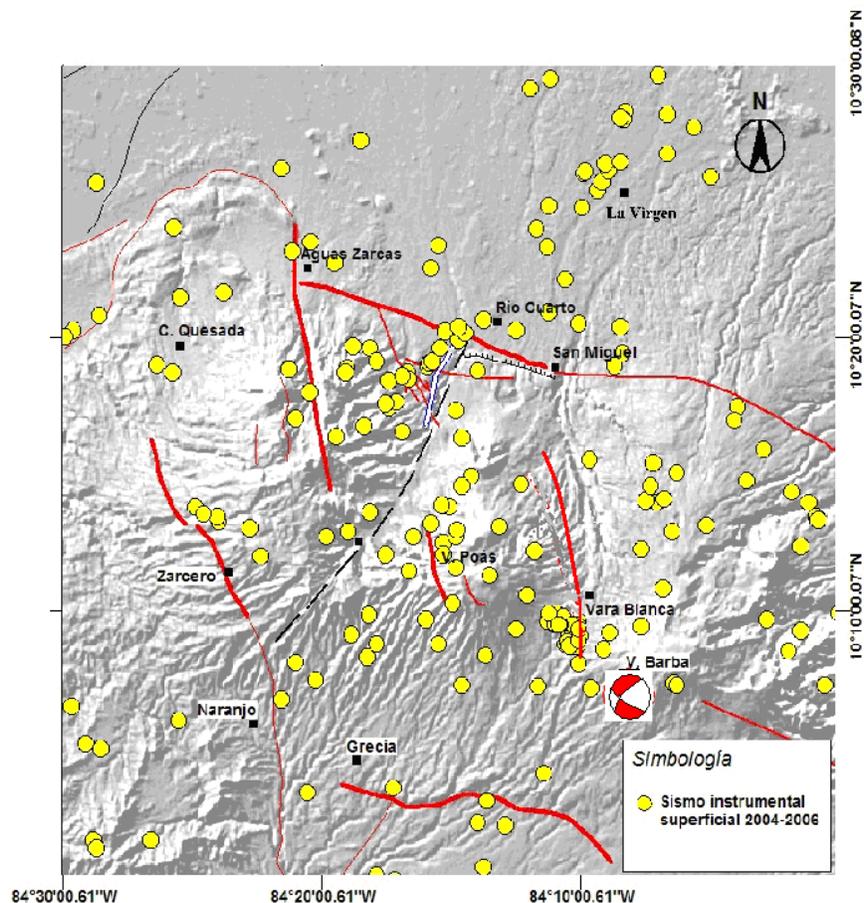


Fig. 1.16: Sismicidad registrada por la red local de Toro-Cariblanco 2004-2006.

Enjambres sísmicos

Además de los terremotos que se han registrado en la zona de Poás y Bajos del Toro en tiempos históricos, también se han presentado varios enjambres sísmicos recientes (Barquero & Alvarado, 1992). Todos estos enjambres, aunque en su mayoría son de corta duración y magnitudes moderadas, demuestran la presencia de fallas activas en la zona. Los principales enjambres tectónicos registrados por la RSN en los últimos 30 años del siglo XX son los siguientes:

Enjambre de Platanar de 1980: Se registró un enjambre sísmico en el volcán Platanar en 1980, este fue de corta duración y baja energía. Los sismos registrados mostraron un alineamiento N-S al costado oeste del Platanar. Las profundidades variaron entre 1 y 10 km. Los sismos se sintieron principalmente en San Vicente y finca Pradera con intensidades entre II y III (MM). El mecanismo focal muestra una solución de rumbo N 08° W sinistral (Alvarado *et al.*, 1988).

Enjambre de Vara Blanca de 1982: Del 5 al 11 de febrero de 1982 se registró una serie de sismos que fueron sentidos principalmente en Vara Blanca. Las magnitudes variaron entre 1,1 y 3,3 y las profundidades eran de alrededor de 5 km. La solución del mecanismo focal para este enjambre sísmico fue de fallamiento normal de rumbo N 20° W (Alvarado *et al.*, 1988).

Enjambre de Venecia de San Carlos de 1986: En el mes de setiembre de 1986 se registró un pequeño enjambre cerca de Venecia. Los sismos de baja magnitud se registraron durante unas dos semanas. En una zona muy restringida de unos 3 km de radio, ubicada 3 km al norte de Venecia.

Enjambres de Poás en 1990: En marzo de 1990 se detectó un incremento importante en el número de sismos tectónicos en el Poás. Este incremento se presentó especialmente a partir del día 26 de marzo, posterior al terremoto del 25 de marzo de 1990 en Cóbano de Puntarenas. El enjambre terminó el 15 de abril, pero se volvió a reactivar en el mes de julio por un par de semanas. De la distribución de los sismos en estos enjambres se puede determinar que corresponden con las fallas Carbonera y Vara Blanca (Barquero & Alvarado, 1992).

Enjambre de Poás de 1997: En enero de 1997 la RSN registró un enjambre sísmico de corta duración (dos días) en la zona del Poás, los sismos ubicados se distribuyen en las cercanías de la falla Carbonera.

Enjambre de 1998 en la zona de Volcán Viejo: Entre abril y mayo de 1998 la RSN registró una serie de sismos de magnitud moderada en la zona de volcán Viejo, al norte de Zarcero. Estos sismos, por su ubicación parecen tener relación con la falla Volcán Viejo- Aguas Zarcas.

Setiembre de 2004: Se registró un enjambre el cual muestra un alineamiento de epicentros de unos 10 km de extensión en sentido NE-SW (Fig. 1.17). Estos sismos fueron de magnitudes pequeñas (menores a 2,3) y profundidades entre 1 y 9 km y en su mayoría de 3 km.

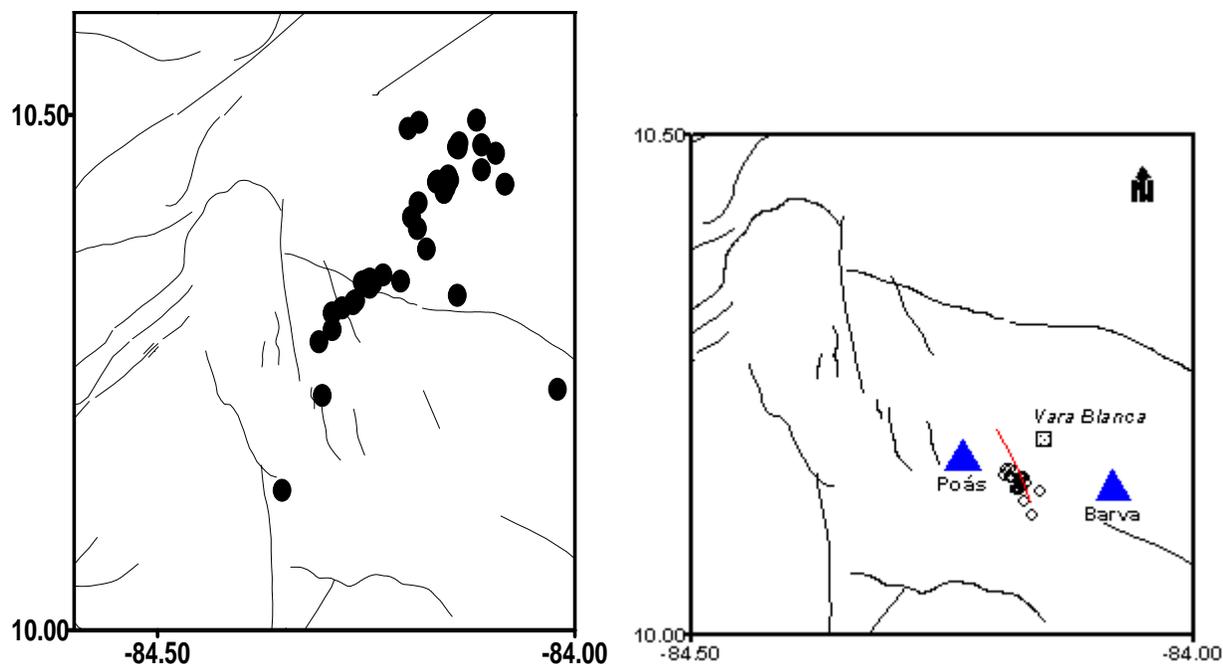


Fig. 1.17: Enjambres sísmicos del mes de setiembre de 2004 (derecha) y junio-julio 2005 (izquierda).

Como se puede observar en el perfil de la figura anterior, algunos de los sismos tienden a profundizarse hacia el SW por lo que podrían estar asociados a la falla San Miguel. Desafortunadamente, al momento de este enjambre no se tenían instaladas suficientes estaciones en la zona para lograr una cobertura adecuada que permitiera obtener datos suficientes para realizar mecanismos focales confiables debido a que se ubicaron en el borde norte de cobertura de la red. Otros eventos que se observan alrededor de la población de La Virgen podrían estar asociados a una falla NE-SW oculta debajo de los sedimentos recientes pero sin evidencias superficiales, algo parecido a lo sucedido con el enjambre sísmico en Venecia de San Carlos de 1986.

Junio-Julio 2005: Se registró un enjambre sísmico en la zona de Vara Blanca los días 17 y 18 de junio y 5 y 6 de julio (Cuadro 7, Fig. 1.17). La mayoría de los eventos fueron de magnitudes bajas; sin embargo, tres de los eventos fueron reportados como sentidos (Cuadro 1.9) lo que indica que tuvieron intensidades del orden de IV en la población de Vara Blanca. Estos sismos muestran un alineamiento NW-SE coincidente con la parte sureste de falla Vara Blanca. El mecanismo focal de uno de los temblores principales es de tipo normal con componente de rumbo.

Cuadro 1.9: Sismos sentidos en Vara Blanca 2005

Fecha	Hora local	Lat.	Lon.	Prof. (km)	Mag.	Epicentro
2005-06-16	23:30	10.154	-84.120	5	4,0	5 km SW Vara Blanca
2005-07-04	17:44	10.166	-84.177	7	3,4	6 km SW Vara Blanca
2005-07-04	17:44	10.168	-84.200	8,6	3,7	6 km SW Vara Blanca

CAPÍTULO II

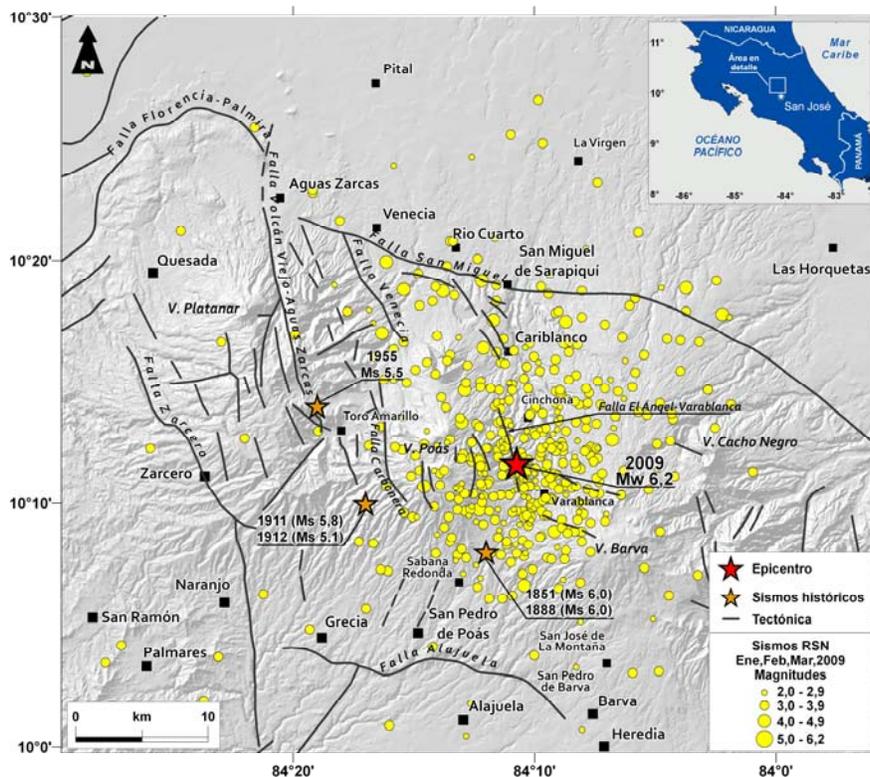
EL TERREMOTO DE CINCHONA

Walter Montero Wilfredo Rojas, Ileana Boschini, Rafael Barquero, Gerardo J. Soto, Guillermo E. Alvarado, Alberto Vargas, Waldo Taylor, Allan López, Álvaro Climent, Aaron Moya, Giovanni Peraldo, Carlos Redondo, Magda Taylor

Montero, W., Rojas, W., Boschini, I., Barquero, R., Soto, G.J., W., Alvarado, G.E., Vargas, A., Taylor, W., López, A., Climent, A., Moya, A., Peraldo, G., Redondo, C., Taylor, M., 2009: El terremoto de Cinchona. En: Barquero, R. (Ed.): El terremoto de Cinchona, 8 enero de 2009. Inf. RSN. 34-59.

2.1 Sismo principal, réplicas y sismicidad asociada

El Terremoto de Cinchona ocurrió el 8 de enero del 2009 a las 13:21 horas y tuvo una magnitud Mw de 6,2. Este evento causó destrozos tanto por la sacudida sísmica como por los deslizamientos que fueron disparados por la vibración sísmica en una zona de fuertes pendientes constituida por suelos de origen volcánico saturados e inestables. Cuando ocurre un evento sísmico grande como el de Cinchona, se debe a la ocurrencia de una ruptura en la corteza de dimensiones importantes a lo largo de una falla. Esa ruptura súbita causa una zona de inestabilidad que sigue originando sismos hasta que encuentra su punto de equilibrio. Esos sismos que ocurren luego de un sismo principal se denominan réplicas. En algunas ocasiones, pero no siempre, el sismo principal es antecedido por temblores que se denominan precursores o premonitores. En el caso específico del Terremoto de Cinchona, se dieron tanto sismos precursores como réplicas. Estas réplicas se mantuvieron hasta el mes de marzo (Fig. 2.1).



En este informe incluimos un conteo de estos eventos para los primeros días, para ello sólo se consideran los sismos de magnitud mayor o igual a 2,5, ya que son los que en su mayoría son percibidos por la población (Cuadro 2.1)

Fecha	Sismo relevante	Número sismos	Total
7 de enero	10:00 M= 4,6	26	Total precursores 40
8 de enero	13:21 M= 6,2	13	
		62	Total réplicas Falla Ángel-Vara Blanca 272
9 de enero	Siete sismos de magnitud 4,0 a 4,4	123	
10 de enero		57	
11 de enero		30	
12 de enero	Tres sismos de 4,0 a 4,5 en dos horas	18	
13 de enero	Un sismo de 4,1	21	39

Cuadro 2.1: Sismos precursores, sismo principal y réplicas

El evento precursor más importante ocurrió el 7 de enero del 2009 a las 10 a.m., tuvo una magnitud de 4,6. Entre esta hora y las 13:21 del día 8 ocurrieron 39 sismos. Es decir, se tienen registrados un total de 40 sismos precursores de magnitud entre 2,5 y 4,6.

El día 8 de enero ocurrió el sismo principal de magnitud 6,2 a las 13:21. El resto del día 8 hasta la medianoche fueron registradas 62 réplicas con magnitudes entre 2,5 y 4,4 en 11 horas.

El 9 de enero se registraron 123 réplicas, el 10 de enero 57 y el 11 de enero 24, todas ellas de magnitud por encima de 2,5 y por debajo de 4,0. Es evidente de la observación de estas cifras que la cantidad de réplicas fue disminuyendo con el tiempo. Se observó que del 9 al 24 de enero hubo una dispersión de sismos hacia el suroeste y oeste de la zona (Poasito y Bajos del Toro).

El 12 y el 13 de enero se da una situación particular aunque normal, la gran inestabilidad tectónica que causó el terremoto del 8 de enero provoca que se dispare la ocurrencia de sismos en otras fallas vecinas, tanto hacia el norte del volcán Poás como hacia el sur en la zona de Carrizal. Por lo tanto, los sismos 18 registrados el 12 de enero y los 21 hasta las 9 horas del 13 de enero, son una mezcla entre réplicas originadas en la falla Ángel-Varablanca y sismos disparados en otras fallas vecinas, lo cual era de esperar y ya había sido mencionada por personal de la Red Sismológica Nacional en diferentes declaraciones a los medios de comunicación.

El día 8 de enero, en cuestión de 7 horas, fueron registrados 7 sismos con magnitudes entre 4,0 y 4,4 (Cuadro2.2); todos ellos originados en la falla Ángel-Varablanca, causando mayor zozobra en la población.

Los siguientes sismos de magnitud igual o mayor que 4,0 ocurrieron en la noche del 12 de enero en el área al noreste de Bajos del Toro, se trata de tres eventos que ocurrieron entre las 19:25 y las 21:37 con magnitudes entre 4,0 y 4,5.

El día 13 de enero a las 01:09 un sismo de magnitud 4,1 ocurrió en la región de Carrizal, causando alarma en la ciudad de Alajuela y cantones vecinos.

Estos últimos cuatro eventos mencionados, se originaron en las áreas circundantes a la Falla Ángel-Varablanca, pero no se originaron en ella, lo que significa que la gran conmoción causada por la ruptura de esa falla está disparando la ocurrencia de temblores en fallas vecinas que han acumulado suficiente esfuerzo para originar sismos.

Día	Mes	HHMM	Mag.
7	enero	10:00	4,6
8	enero	13:21	6.2
8	enero	14:04	4.1
8	enero	14:31	4.4
8	enero	14:55	4.1
8	enero	15:15	4.2
8	enero	19:07	4.0
8	enero	19:41	4.3
8	enero	20:50	4.0
12	enero	19:25	4.0
12	enero	20:23	4.2
12	enero	21:37	4.5
13	enero	01:09	4.1

Cuadro 2.2: Sismos de mag. mayor o igual a 4,0

2.2 Intensidades

La intensidad máxima estimada para este terremoto, con base en la información de campo y los daños observados fue de IX (MM). Esta intensidad fue a nivel muy local de la población de Cinchona en donde se estimaron aceleraciones del suelo mayores a 1 g. Las intensidades en las demás poblaciones en donde ocurrieron daños, como Varablanca, Poasito, Cartagos, Cariblanco, etc., fueron entre VII y VIII. En Alajuela y Heredia y en San José fue de VI. Es importante denotar que las intensidades se atenuaron rápidamente dado que el sismo fue superficial, por lo que en provincias como Puntarenas, Limón y Guanacaste fue de III y II (Fig. 2.2, cuadro 2.3).

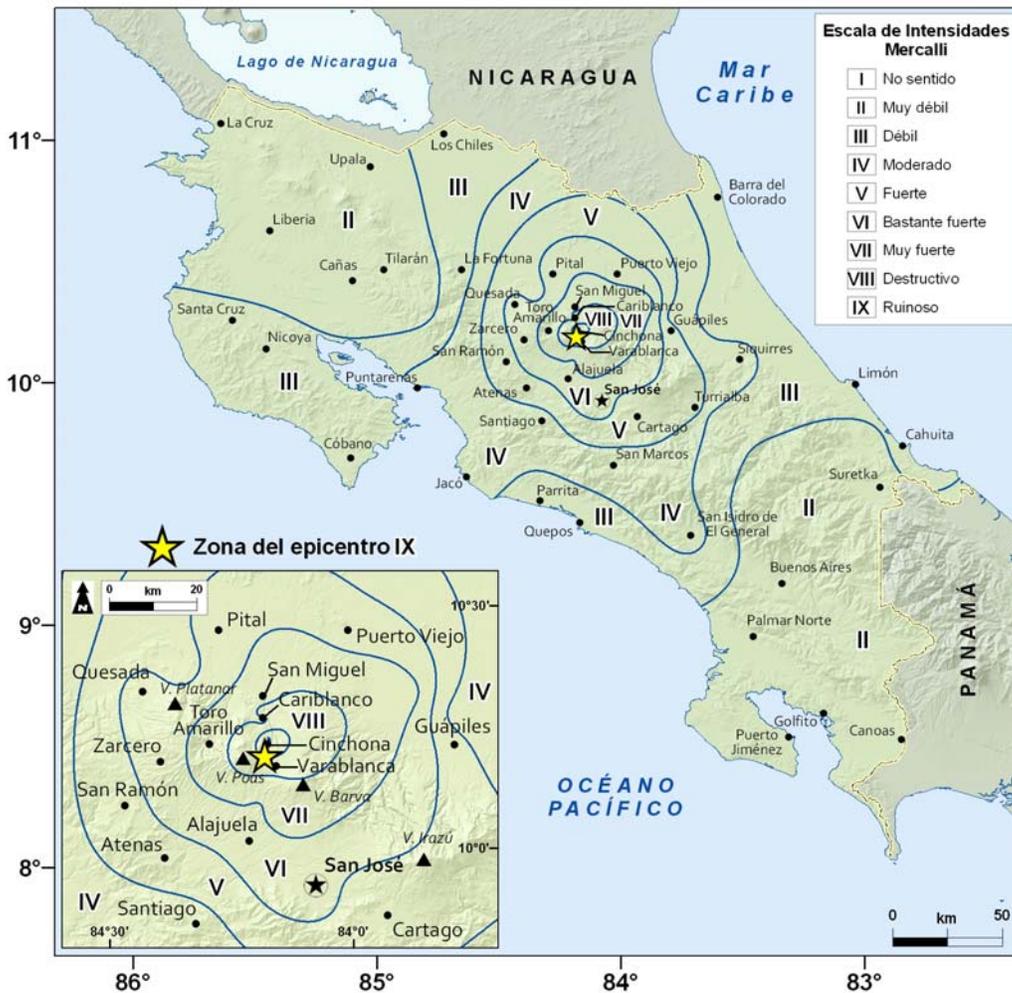


Fig. 2.2: Intensidades (Mercalli Mod.) a nivel de todo el país.

Cuadro 2.3: Datos de los efectos principales del terremoto de Cinchona.

Lugar	Efectos	IM M.
Cinchona e Isla Bonita	Gran cantidad de deslizamientos, casi 90% de destrucción de infraestructura incluyendo las casas, escuela, iglesia, negocios e industria. Cambios importantes en la topografía y el relieve, 13 muertos, 15 heridos y varios desaparecidos. Muy pocas estructuras quedaron en pie.	IX
Vara Blanca, San Rafael de Vara Blanca, Cariblanco, Ujarraz, Poasito, Volcán-Poás, Colonia Virgen del Socorro	70 % de infraestructura destruida, 7 muertos y 10 heridos, varias personas desaparecidas, muchos deslizamientos, gran cantidad de fracturas del terreno, tuberías rotas, caída de postes eléctricos, más de 50 reses muertas y animales heridos. Imposibilitó la conducción de vehículos.	VIII
Los Cartagos, Fraijanes, San Miguel, La Virgen, Bajos del Toro, Colonia Toro, Sacramento, Carrizal, Sabana Redonda	Deslizamientos de laderas, agrietamiento moderado del suelo, casas de mala construcción colapsadas y averiadas, casas de calidad A y B con fracturas leves, cinco muertos. Sentido en vehículos en circulación. Corrimiento de muebles y caída de algunos. Pánico general.	VII
Alajuela, Heredia, San José, Puerto Viejo, Ciudad Quesada, Zarcero, San Pedro de Poás, Veracruz	Sentido por todas las personas en movimiento, caída de repellos y algunos cielorrasos, fracturamiento moderado en las paredes de edificaciones de baja calidad, fracturamiento de algunas vidrieras, dos muertes por infarto, muchas personas asustadas.	VI
Guápiles, San José, Atenas, Turrialba, Cartago, Muelle de San Carlos, San Ramón	Sentido por casi todas las personas en movimiento, balanceo fuerte en el agua de las piscinas, caída de objetos.	V
Puntarenas, Los Santos, Siquirres, San Isidro de Pérez Zeledón, Jacó	Sentido por muchas personas, vibración de ventanas y personas levemente asustadas.	IV
Nicoya, Dominical, Limón, Los Chiles		III

2.3 Distribución de la velocidad pico máxima de la onda sísmica

La Fig. 2.3 muestra la distribución de la velocidad pico máxima de la onda sísmica generada durante el terremoto. Se utilizaron 50 mediciones tomadas de las estaciones sismológicas o acelerográficas de tres componentes (vertical, norte y E) del Instituto Costarricense de Electricidad, el Laboratorio de Ingeniería Sísmica y la Refinadora Costarricense de Petróleo. En la mayoría de los casos, la componente norte fue la que registro la amplitud máxima y es un indicador a ser tomado en consideración cuando se defina el tipo falla (fuente sísmica) que provocó el sismo.

Si se asume que la curva de velocidad de 15 cm/s corresponde a una intensidad de VII, se puede afirmar que unos 2500 km² sufrieron los efectos directos del terremoto y que el área de mayor afectación, la cual está

directamente asociada al área de ruptura de la falla, tiene una extensión de aproximadamente 150 km² (velocidades superiores a los 40 cm/s).

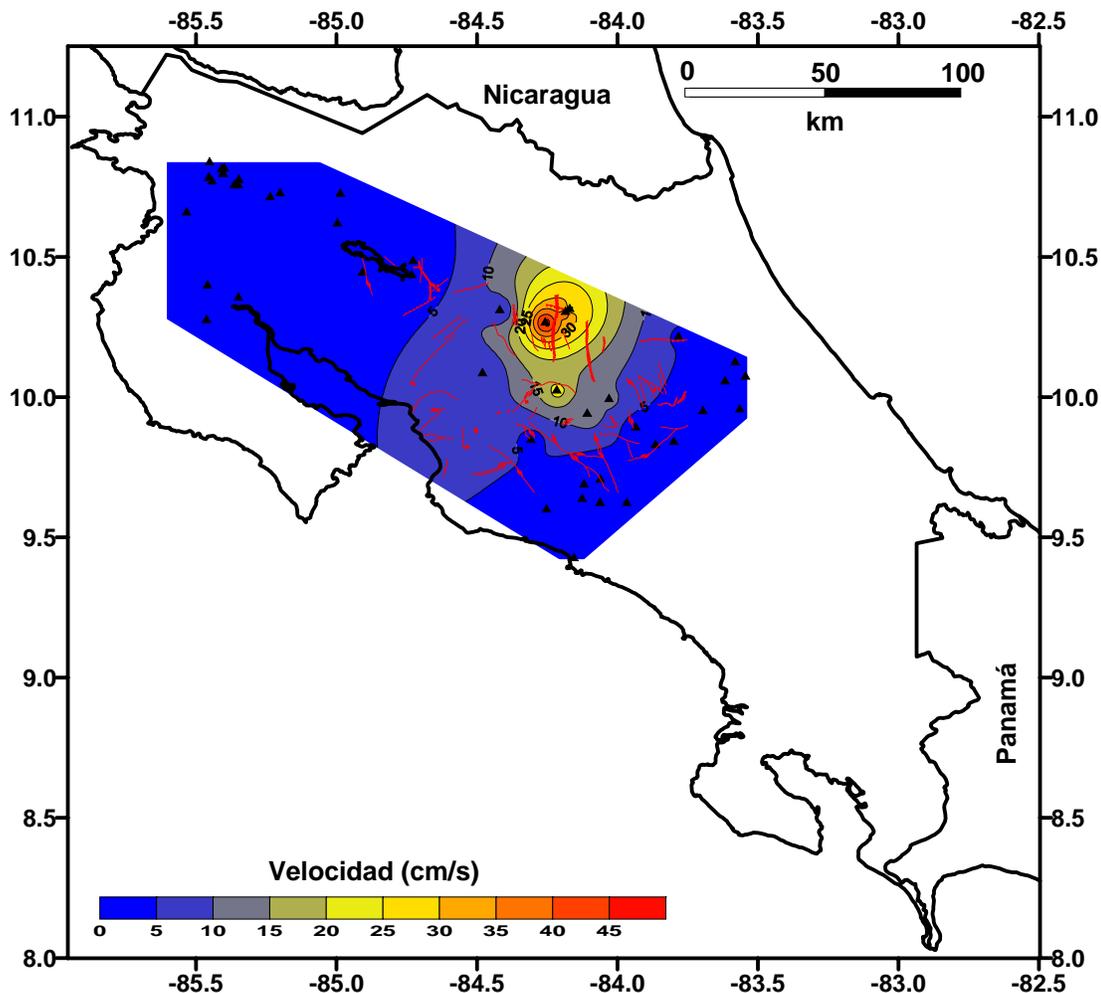


Fig. 2.3: Distribución de la velocidad de la onda sísmica para el terremoto de Cinchona (8-1-2009). Las líneas rojas son algunas de las fallas sísmicas activas más importantes en la parte central del país.

2.4 REGISTRO DE ACELERACIONES

Durante este evento sísmico, tanto las estaciones acelerográficas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) como las del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (LIS) de la Universidad de Costa Rica registraron las señales producidas por la sacudida sísmica del terreno y en algunos casos por alguna obra civil en particular. La combinación de los registros de ambas redes, permitieron obtener información a diferentes distancias (incluyendo campo cercano), orientación con respecto al epicentro y diferentes condiciones de sitio (suelo, roca, suelo firme).

Los acelerógrafos son instrumentos que registran en el tiempo la historia de aceleración (sacudida sísmica) que experimenta el sitio donde ha sido instalado el equipo (campo libre, edificio, etc.), y permiten cuantificar en un parámetro de uso ingenieril (aceleración de la gravedad g) la severidad de la sacudida sísmica en esos sitios, debido a la ocurrencia de un evento sísmico particular, como el del pasado 8 de enero. Estos instrumentos registran el movimiento sísmico en tres componentes, dos horizontales y una vertical.

En este apartado se presenta un resumen de los informes técnicos preliminares presentados por cada institución separadamente (Climent *et al.*, 2009, Moya *et al.*, 2009). Para mayor información sobre cada uno de los informes y datos en particular se recomienda contactar a los encargados de cada una de las redes (<http://iniiserver.inii.ucr.ac.cr/lis/>, acliment@ice.go.cr)

Registros obtenidos por el ICE

Como parte del *Programa de Seguridad Sísmica de Presas y Sitios de Proyecto ICE*, el Área de Amenazas y Auscultación Sísmológica y Volcánica del C.S. Exploración Subterránea de la UEN PySA en conjunto con los Centros de Producción y Proyectos, tiene instalados instrumentos sísmológicos de medición de los movimientos sísmicos fuertes (acelerógrafos) en la mayoría de las presas ya construidas y sitios de presa de proyecto en desarrollo.

A raíz del Terremoto la instrumentación acelerográfica instalada en las presas de Toro II (APTO), San Miguel (APSM), Peñas Blancas (APPB) y Sangregado (APSG) registraron la señal sísmica del terremoto, al igual que en el sitio de presa del P.H. Reventazón (APRE) y tanque de oscilación y casa de máquinas del P.H. Cariblanco (APCB). En este reporte se presentan los resultados del procesamiento preliminar de dichas señales sísmicas, y se incluye el dato del instrumento ubicado en la Estación Terrena Guatuso.

En la Fig. 2.4 se presenta un mapa con la ubicación de los diferentes sitios ICE, donde se obtuvo registro acelerográfico del Terremoto. En este mapa es clara la cercanía de los proyectos Toro y Cariblanco a la zona epicentral del evento sísmico, sitios en los cuales la sacudida sísmica fue de muy alta intensidad.

En la Fig. 2.5 se presenta en detalle la zona epicentral del terremoto y alrededores, en la cual también se muestra las principales fallas y la ubicación de los proyectos Toro y Cariblanco. La ubicación del acelerógrafo instalado en el dique del P.H. Toro II aparece indicado como APTO (triángulo negro), y APCBcm y APBCTo los instalados en la casa de máquinas y tanque de oscilación del P.H. Cariblanco.

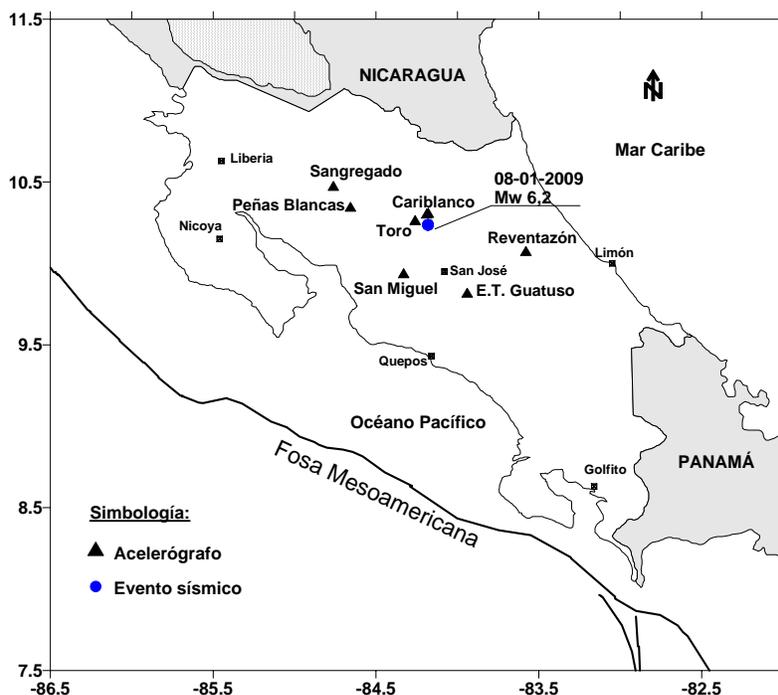


Fig. 2.4. Ubicación del epicentro del Terremoto de Cinchona del 8 de enero del 2009 y sitios de presa y proyectos ICE donde se obtuvieron acelerogramas del sismo (triángulos).

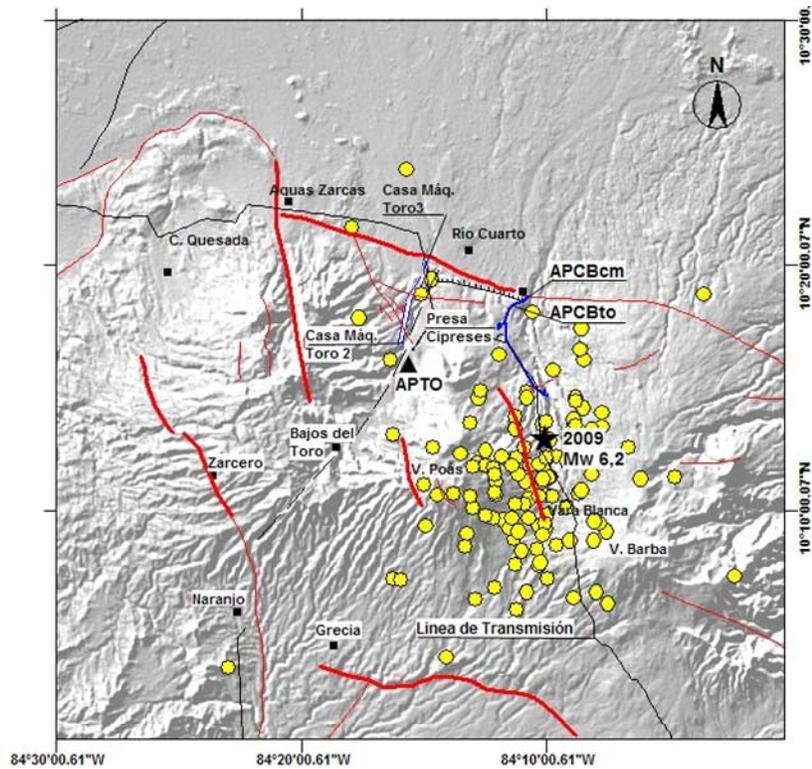


Fig. 2.5: Localización del epicentro del Terremoto (estrella negra) sus réplicas y otros eventos sísmicos sentidos en la región hasta el día 16 de enero (círculos amarillos). Principales fallas en la región (en rojo) y ubicación de obras de los proyectos Cariblanco y Toro.

En el cuadro 2.4 se presenta un resumen de los valores pico máximos de aceleración horizontal registrados en cada uno de los sitios ICE y en la Fig. 7.3 las trazas de aceleración horizontal correspondientes a las estaciones que se encuentran localizadas más cerca del área epicentral (APCBcm, APCBto y APTOcr). La sacudida sísmica de este terremoto fue registrada en forma débil en la presa Sangregado, Peñas Blancas y San Miguel, así como en la galería del sitio de presa del P.H. Reventazón y E.T. Guatuso, por lo que no debió de presentarse ningún tipo de daño en las obras ICE de estos proyectos.

Cuadro 2.4: Valores de aceleración horizontal pico por estación.

Estación	Ubicación	Sitio	Distancia hipocentral (km)	Aceleración máxima (cm/s ²)	Componente
APCBcm	P.H. Cariblanco	Suelo	11,9	605,7	E-W
APCBto	P.H. Cariblanco	Suelo	12,3	438,0	E-W
APTOcr	P.H. Toro II	Presa	13,0	632,7	N20E
APSMes	P.H. Ventanas Garita	Roca	37,5	15,7	N64E
AETG	E.T. Guatuso	Suelo	53,3	29,4	N-S
APPBba	P.H. Peñas Blancas	Roca	54,3	4,2	N41E
APRE	P.H. Reventazón	Roca	69,3	4,4	N4.8E
APSGba	P.H. Arenal	Suelo	70,3	10,3	N38W

Analizando las trazas de la Fig. 2.6, se puede asegurar que las obras de dichos proyectos o cualquier edificación en la zona epicentral estuvieron expuestas a una sacudida sísmica bastante intensa, caracterizada en cada sitio por la condición de la geología local superficial, su ubicación con respecto a la fuente sísmica y las condiciones de ruptura de la falla.

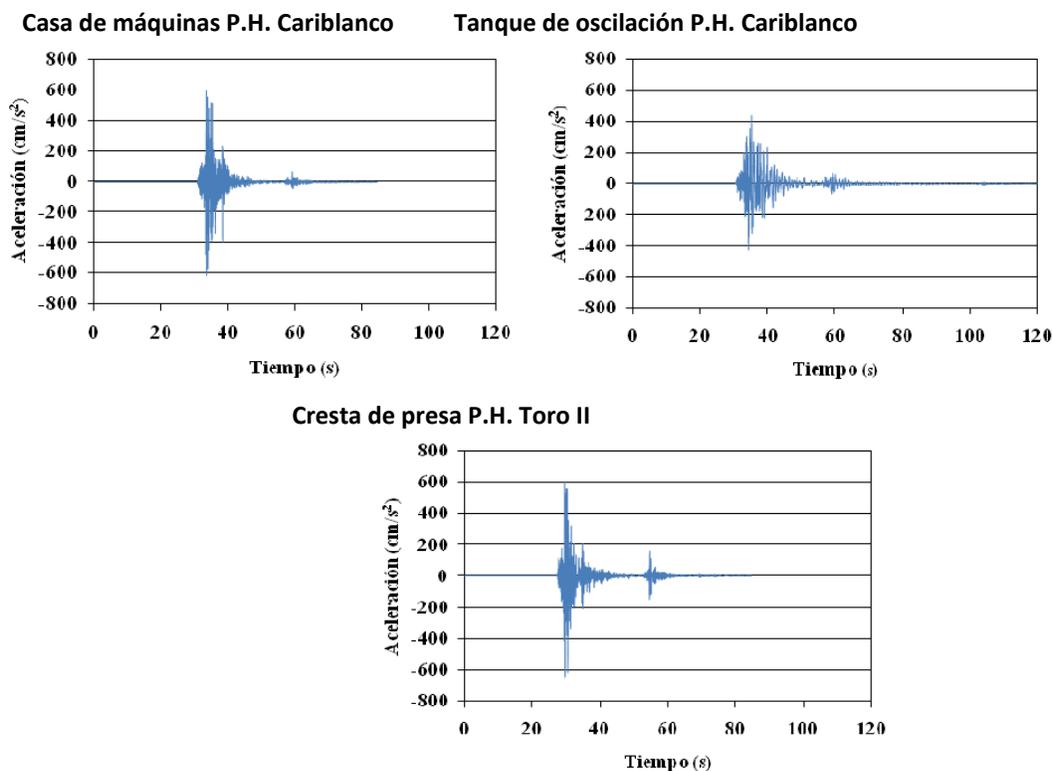


Fig. 2.6: Registros acelerográficos de la componente horizontal de aceleración, obtenidos en los proyectos Toro y Cariblanco (escala en cm/s^2 , $1\text{ g} = 981\text{ cm/s}^2$).

En el caso del acelerograma de **Casa de Máquinas del P.H. Cariblanco** la señal muestra una fuerte sacudida sísmica, que alcanza un valor pico de $605,7\text{ cm/s}^2$ y valores superiores a 400 cm/s^2 por espacio de 2,3 segundos, para luego decaer a valores menores a 200 cm/s^2 y mostrar un amortiguamiento uniforme que se ve interrumpido por un pico de 200 cm/s^2 a los 9,2 segundos después del primer arribo de la onda *P*. El instrumento en este sitio está instalado en un suelo blando.

El acelerograma obtenido en las cercanías del **Tanque de Oscilación del P.H. Cariblanco** presenta también una fuerte sacudida sísmica en ese sitio, pero con un comportamiento un poco diferente al de casa de máquinas, con un pico de aceleración horizontal de 438 cm/s^2 , y aceleraciones sostenidas de 200 cm/s^2 por espacio de siete segundos y de 100 cm/s^2 por 11 segundos. El valor pico menor registrado en este sitio con respecto al de casa de máquinas, preliminarmente se puede asociar a efectos de sitio (diferencias en las condiciones mecánicas y espesores de los suelos en ambos sitios).

El acelerograma registrado en la cresta del **dique del P.H. Toro II** muestra un comportamiento de la sacudida sísmica caracterizada por valores de aceleración pico que alcanzan hasta los 600 cm/s^2 y que se mantienen por espacio de 0,8 segundos y que presentan un valor pico de $632,7\text{ cm/s}^2$. Valores sostenidos de aceleración alrededor de 200 cm/s^2 se presentan por espacio de 2,3 segundos, luego la señal disminuye su amplitud a valores menores a 100 cm/s^2 y atenuándose rápidamente con el tiempo. Un pico de 200 cm/s^2 se presenta 8,9 segundos después de primer arribo de la onda *P*.

En todos los registros aparece una réplica del evento principal que ocurrió aproximadamente 25 segundos después del evento principal, y que registro un valor de 145 cm/s^2 en la cresta de la presa Toro II, en los otros dos sitios el registro es mucho menor.

Registros obtenidos por el LIS-IINI-UCR

Varias de las estaciones del Laboratorio de Ingeniería sísmica (LIS-IINI) de la Universidad de Costa Rica se encontraban funcionando al momento de la ocurrencia del terremoto. Los instrumentos registran el movimiento del suelo en las tres componentes (Fig. 2.7) que son NS, EW y Vertical. En este informe, esas componentes fueron rotadas de manera que la dirección NS coincidiera con la del epicentro (RADIAL) y la EW estuviera perpendicular a este (TRANSVERSAL). Los valores máximos así calculados se muestran en el cuadro 2.5 y también en la Fig. 2.8.

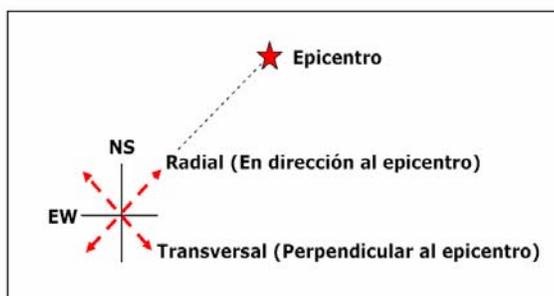


Fig. 2.7: Rotación de componentes NS y EW en Radial y Transversal al epicentro.

Cuadro 2.5: Valores máximos de aceleración en estaciones LIS.

Estación	Ubicación	Tipo de instrumento	Aceleración máxima (cm/s^2)			Distancia Hipocentral (Km)
			Radial	Transversal	Vertical	
AALX	Alajuela centro	REFTEK 130-SMA	169.7	223.7	97.3	22.8
HCPD	San Miguel	KINEMATRICS ETNA	118.5	69.3	36.9	28.8
ASCS	Ciudad Quesada	KINEMATRICS QDR	26.5	29.4	20.8	30.5
SSAB	La Sabana	KINEMATRICS QDR	130.3	176.0	49.2	31.2
ASRM	San Ramón	KINEMATRICS QDR	54.9	53.5	43.4	37.9
LGPL	Guápiles, Limón	KINEMATRICS QDR	27.8	19.9	10.4	42.0
SPCL	Santiago, Puriscal	KINEMATRICS QDR	32.6	36.6	28.8	43.7
RALT*	Alto Ochomogo	REFTEK 130-SM	16.6	22.8	13.4	45.4
CPAR	Paraíso	KINEMATRICS QDR	21.6	15.1	8.6	53.7
CCCH	Represa Cachí	KINEMATRICS ETNA	3.6	4.5	3.8	57.4
PQSP	Quepos	KINEMATRICS ETNA	14.6	16.8	10.1	87.2

*Propiedad de RECOPE

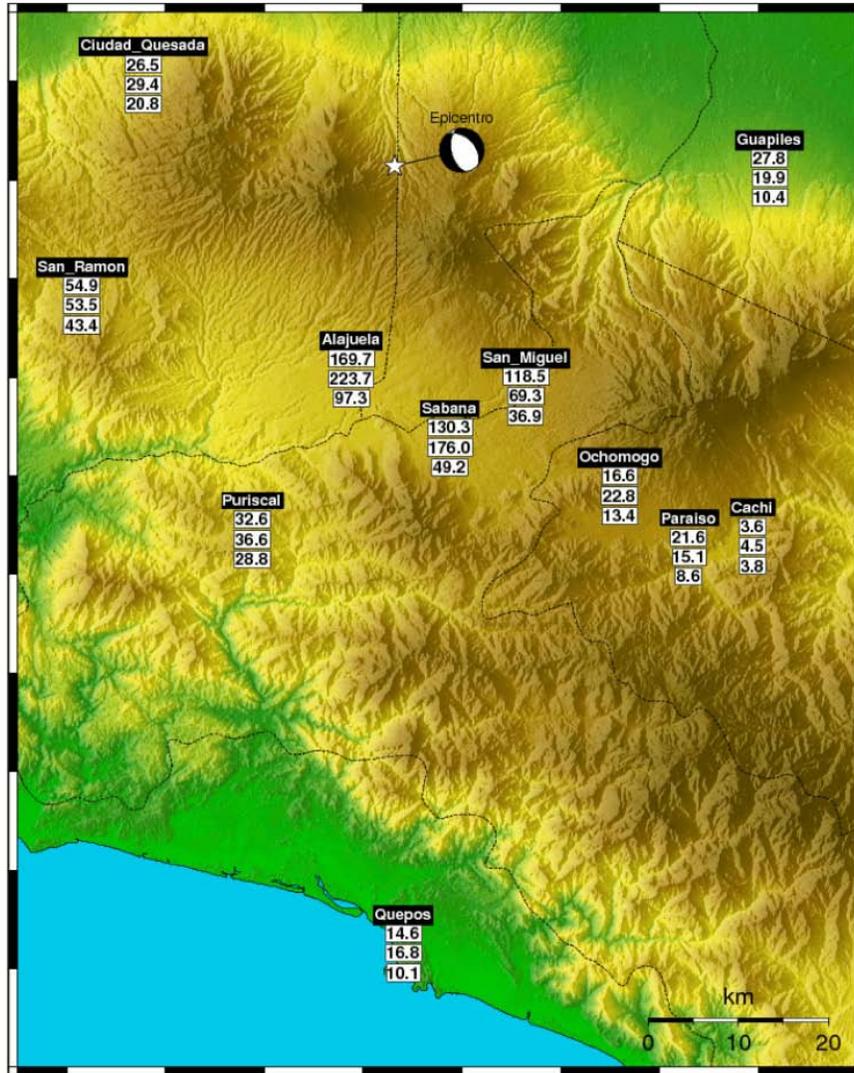


Fig. 2.8: Valores máximos de aceleración registrados por el LIS. Primer valor corresponde a componente Radial, el segundo a la Transversal y el tercero a la Vertical.

El registro de los valores de aceleración del terreno es importante porque la aceleración es un parámetro ligado a la intensidad o fuerza con que se registra un sismo en un sitio en particular. El valor promedio de la aceleración de la gravedad es de 980 cm/s^2 . Esto significa que cuando un objeto se deja caer, este incrementa su velocidad en 980 cm/s cada segundo hasta llegar a la superficie de la tierra.

El valor de aceleración mayor, registrado por las estaciones del LIS, fue obtenido en la estación AALX ubicada en la ciudad de Alajuela (ver cuadro 2.6 y Fig. 2.9) y cuyo máximo alcanzó los $223,7 \text{ cm/s}^2$ en la componente transversal. Este valor es inferior al registrado en la misma ciudad en otro sitio cercano durante el Terremoto de Piedras Negras en 1990. El valor en ese entonces fue de $342,2 \text{ cm/s}^2$ pero en la componente radial. Esta comparación resulta interesante ya que el sismo de 1990 y el del 2009 poseen una magnitud similar y están a una distancia comparativamente igual de la ciudad de Alajuela.

El acelerógrafo en AALX posee la particularidad que envía los datos a través de Internet en tiempo real. Es decir, en el instante en que el sismo sacudía el campus de la Universidad de Costa Rica donde se ubica el LIS, ya se tenía información del valor de aceleración que estaba experimentando la ciudad de Alajuela.

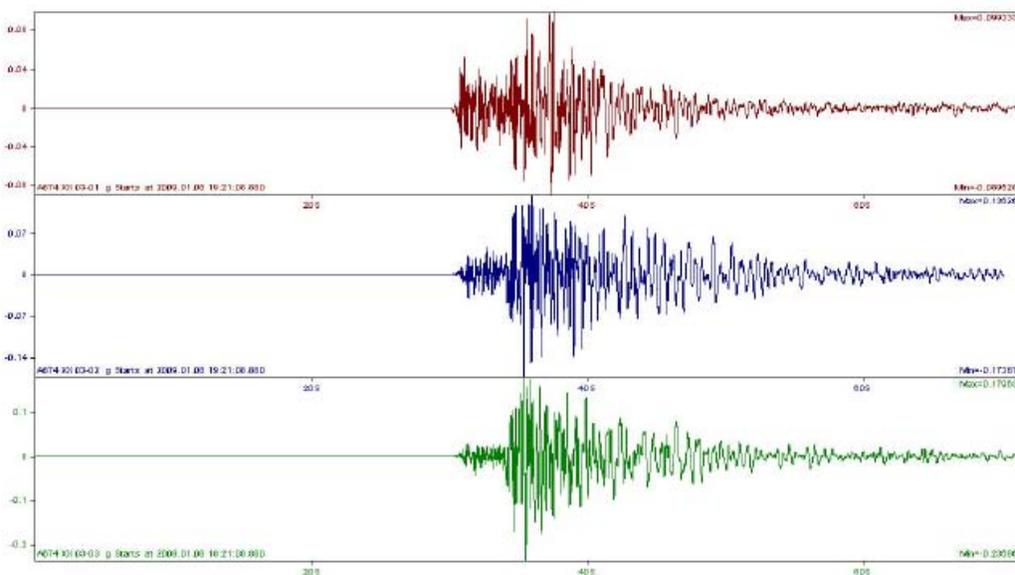


Fig. 2.9: Acelerogramas obtenidos en la estación AALX.

Con la información obtenida por el LIS hasta este momento se puede observar lo siguiente:

- a. La distancia de la Sabana (costado norte de las oficinas centrales del ICE) y de San Miguel de Heredia (carretera a Guápiles) es muy similar al epicentro, pero los valores de aceleración en la Sábana son mayores a los de San Miguel.
- b. Ciudad Quesada (cuerpo de Bomberos), registro un valor muy bajo, comparable solo con el de Guápiles (cuerpo de bomberos) que esta a mayor distancia.
- c. Las estaciones en Paraíso de Cartago (recinto universitario) y Cachí (sitio de la represa) están entre las de menor aceleración. El acelerógrafo instalado en la Sede del Atlántico, en Turrialba, no registro el sismo del todo.
- d. La zona de Cartago no experimento el sismo con la misma intensidad con la que lo hicieron las ciudades ubicadas al oeste.
- e. Valores importantes de aceleración se observan también distribuidos al sur y oeste del San José. Nótese que el valor de aceleración en Quepos fue superior al de Cachí, aún cuando la estación de Quepos se encuentra a 87 km de distancia

Conforme las ondas sísmicas se alejan del foco o hipocentro, están van perdiendo energía a lo largo del trayecto debido a las irregularidades del medio. Es decir, bajo circunstancias normales, conforme aumenta la distancia, la amplitud de las ondas disminuye. Sin embargo, la geología superficial a veces está formada por sedimentos muy blandos que lo que hacen es amplificar la señal. Cuando esto sucede, se habla de efectos de sitio que en muchos casos pueden generar daños mucho más importantes que los observados en la zona epicentral. Otros factores como la directividad de la ruptura de la falla, la geometría, la profundidad de la misma y la localización de las zonas que irradiaron la mayor cantidad de energía (conocidas como asperezas) pueden haber influenciado en la distribución de los valores observados hasta el momento. Todo lo anterior formará parte de las nuevas investigaciones que confirmarán o desecharán esas hipótesis.

En la Fig. 2.10 se muestra el espectro de respuesta (pseudo aceleración espectral, PSA) en AALX, correspondiente a la componente EW, que es la de máxima aceleración pico. La máxima PSA es de aproximadamente

2000 cm/s^2 para el 0 % de amortiguamiento y de 200 cm/s^2 para el 20 % de amortiguamiento. En ambos casos, la máxima PSA se da para un periodo cercano a 0,15 s, lo que hace esperar que las estructuras rígidas, de uno y dos pisos, se vieran posiblemente más afectadas por este evento sísmico en ese sitio.

Comentarios

De acuerdo a los registros acelerográficos obtenidos, tanto por el ICE como por el LIS, se puede indicar que a distancias alrededor a los 11 km con respecto al epicentro del terremoto y para condición local de suelo, se obtuvieron valores de aceleración horizontal máximos entre los 450 y 600 cm/s^2 en estaciones ubicadas al norte y noroeste del epicentro, y de 223 cm/s^2 a unos 23 km al sur del mismo, siendo estos los valores máximos registrados para este evento sísmico. De estos valores instrumentales se puede indicar que las obras civiles localizadas cerca del epicentro, y sobre todo en el área mesosísmica, estuvieron expuestas a sacudidas sísmicas severas, con un alto potencial de generar daños en aquellas estructuras con un bajo nivel de ingeniería en el diseño y construcción, y capaz de agravar sus efectos finales si se combinan con efectos secundarios como deslizamientos o avalanchas, como sucedió en este terremoto en particular.

Tanto el mapa de isosistas como los valores de máximos de aceleración parecen indicar, una focalización de la energía liberada en la dirección norte-sur y un rápido decaimiento de las ondas sísmicas en la dirección este-oeste.

Como parte de la enseñanza de este evento destructivo, se puede decir que la mejor medida para reducir la vulnerabilidad física de cualquier obra civil, ante la ocurrencia de sismos severos, es el adecuado diseño y construcción de las mismas, siguiendo la normativa indicada en el Código Sísmico de Costa Rica, y en aquellos casos más complejos, complementados y amparados a estudios ingenieriles, geológicos, sismológicos y de amenaza sísmica de detalle.

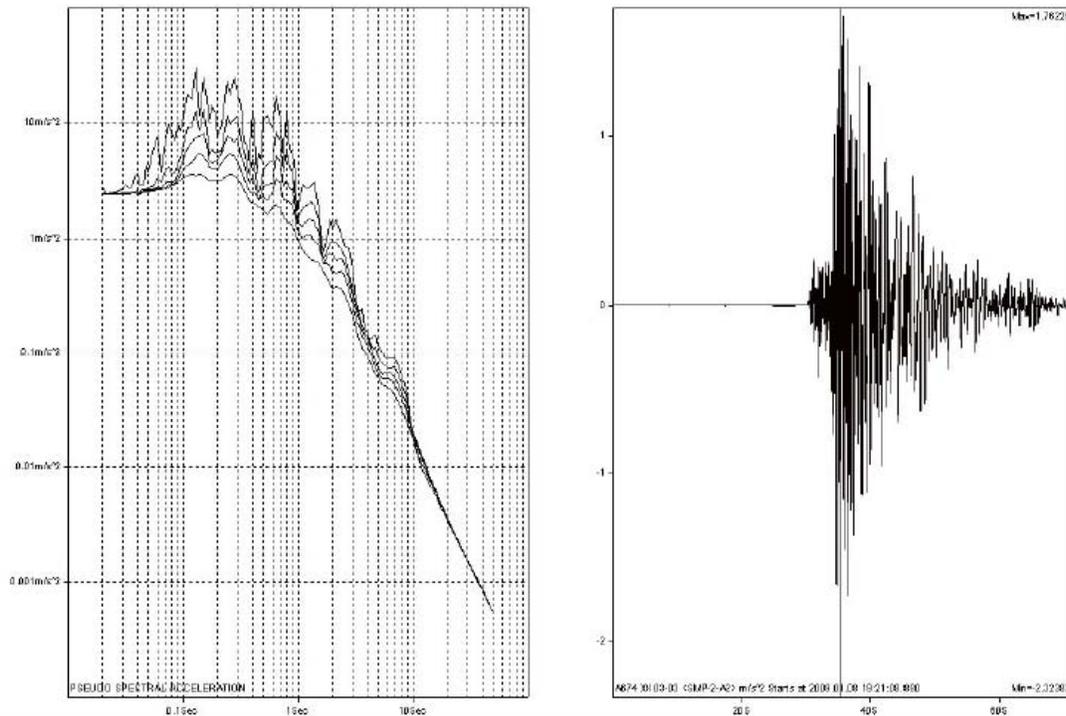


Fig. 2.10: Espectro de respuesta (PSA) en la Estación AALX.

Tanto el ICE como el LIS están implementando la conectividad de sus estaciones acelerográficas vía Internet en tiempo real, lo que permitirá en un futuro cercano, determinar en forma inmediata aquellas zonas que pudieron ser sometidas a las mayores cargas sísmicas debido a la ocurrencia de un evento sísmico severo.

La cantidad de registros acelerográficos obtenidos de este terremoto, y su posterior análisis, lo convierten en un evento importante para investigar el impacto de fenómenos sísmicos similares en zonas densamente pobladas. Uno de estos casos podría ser la ocurrencia de un evento sísmico ocurriendo más cerca al Área Metropolitana de San José.

2.5 ANÁLISIS DE LA FUENTE SÍSMICA QUE ORIGINÓ EL TERREMOTO

Existen dos posibles fuentes que originaron el terremoto de Cinchona. Estas son: 1. La falla Ángel-Varablanca; 2. Una falla no identificada, ciega o con una débil expresión geomórfica, que puede corresponder con alguno de los lineamientos sugeridos en la Fig. 2.11. Veamos hacia dónde apunta la información disponible.

Información de intensidades

La zona mesosísmica de intensidad IX incorpora la zona donde se ubican las fallas Ángel-Varablanca y algunas fallas observadas en diversos afloramientos y lineamientos sugestivos de ser fallas recientes (Fig. 2.1 y 2.2). Asimismo, tiene un eje largo en la dirección aproximada norte-sur, que es bastante similar al rumbo de las fallas observadas en la zona. La información de deslizamientos y de daños en construcciones apunta a que la zona de Cinchona y el cañón del río Sarapiquí fueron entre otras las más afectados por el terremoto. Esta zona se ubica más cerca de los lineamientos sugestivos de ser fallas recientes, aunque esta zona es también la que presenta mayor susceptibilidad a los deslizamientos y una relativamente mayor concentración de población, especialmente a lo largo de la carretera que tiene un trayecto aproximado norte-sur entre Varablanca y San Miguel, sobre la margen occidental del cañón del río Sarapiquí. Asimismo, el mapa geológico elaborado por Soto (1999) muestra que esta es la zona donde afloran tefras espesas y volcanitas fuertemente meteorizadas de las Unidades PaleoBarva y PaleoPoás, que son mecánicamente poco competentes (Fig. 2.11). Es por tanto, la zona que presenta la geología “más débil” y por tanto la más susceptible a generar deslizamientos y agrietamientos del terreno, entre otras posibles deformaciones del terreno.

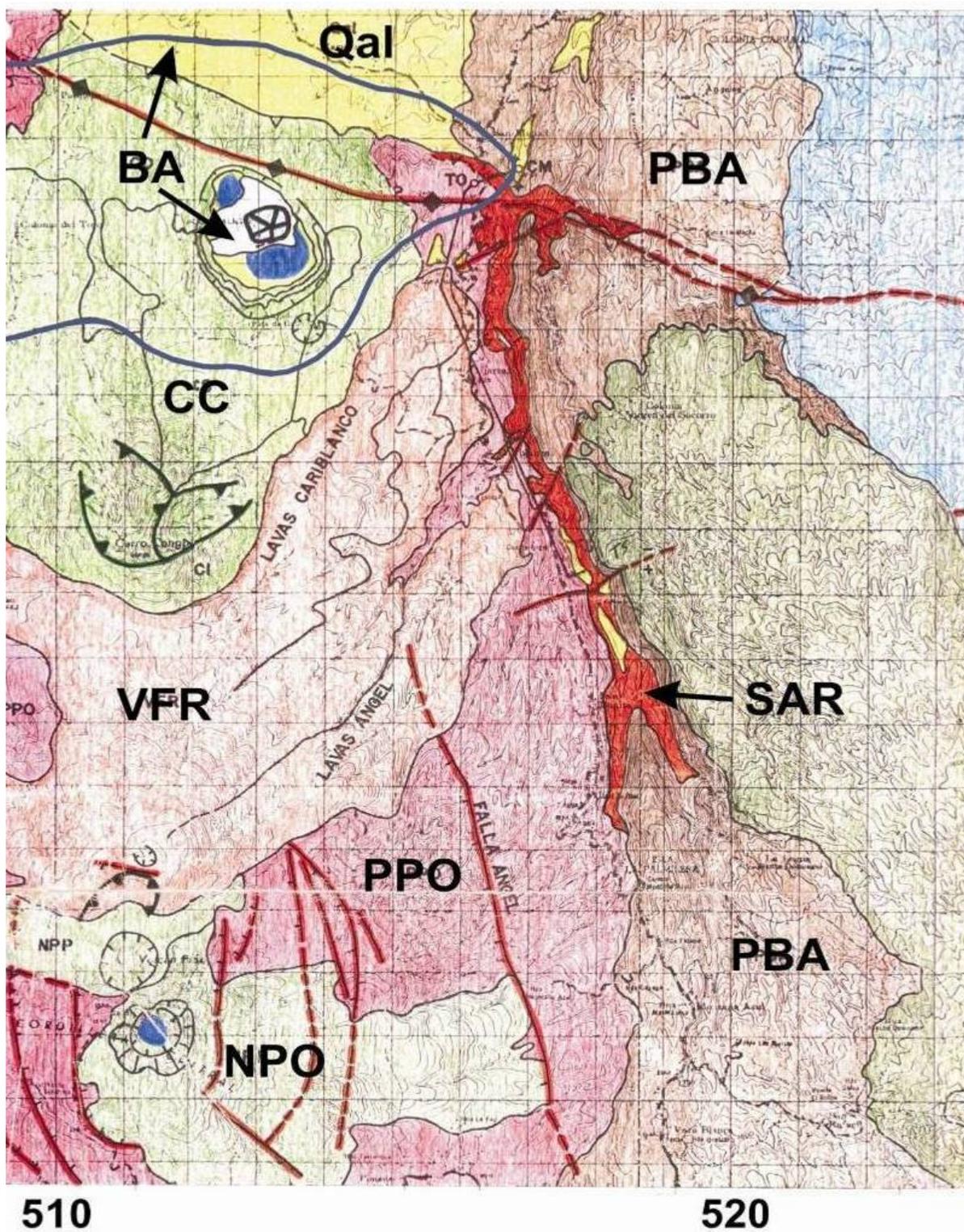


Fig. 2.11: Mapa geológico de un sector de la hoja Poás del Instituto Geográfico Nacional (IGN) elaborado por Soto (1999).

Localizaciones del evento precursor, principal y de las réplicas

El evento precursor ocurrido el 7 de enero a las 10 de la mañana (hora local), de magnitud 4,5, se localizó unos 2 km al noroeste de Varablanca, muy cerca de la traza de la falla Ángel-Varablanca. La distribución epicentral de las réplicas localizadas en las primeras horas posteriores a la ocurrencia del evento principal se distribuyen en dos lineamientos sísmicos muy cercanos uno del otro (Fig. 2.12). Ambos tienen un rumbo NNW y el del lado oeste se alinea con la falla Ángel-Varablanca. El segundo se ubica un poco al este del primero.

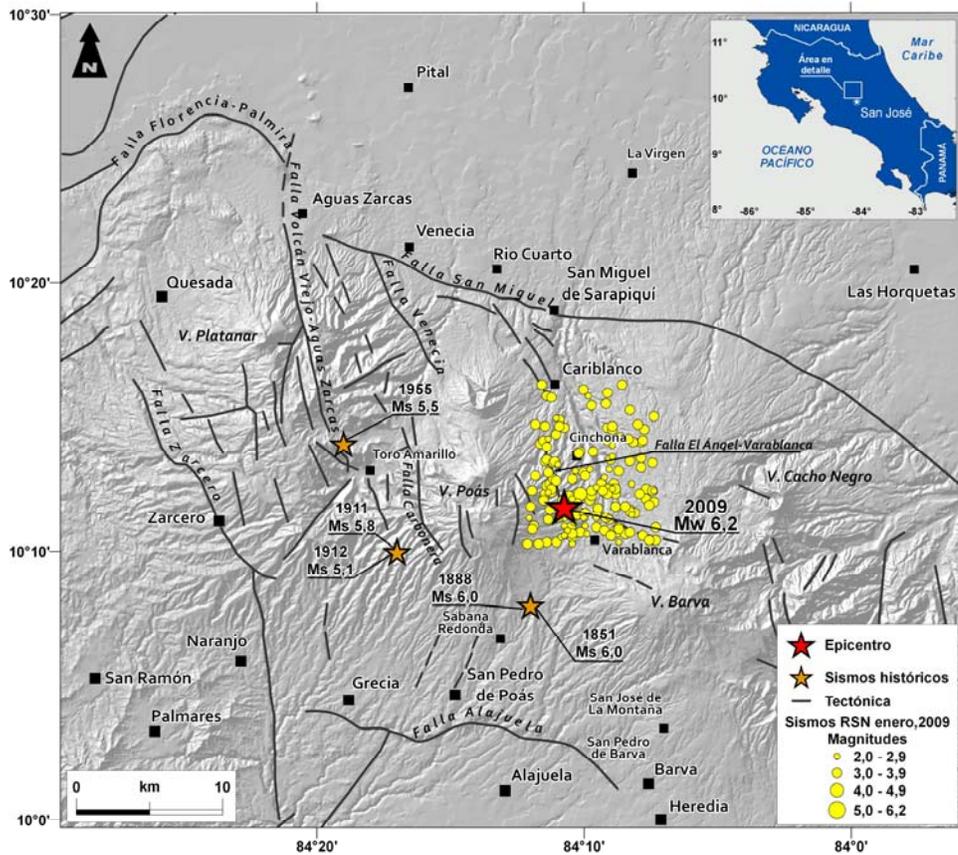


Fig. 2.12: Evento principal y réplicas

La distribución epicentral e hipocentral de las réplicas sugieren que estas se localizan predominantemente entre 0 y 8 km a lo largo de un plano de falla subvertical como se muestra en el perfil sísmico (Fig. 2.13). Considerando la distribución de las primeras réplicas en planta y en profundidad se obtiene entonces una falla con un área de ruptura de 12 x 6 km. Además, considerando la caída de esfuerzos de $1,5 \times 10^{18}$ Nm reportada por Harvard y un módulo o constante de rigidez para Costa Rica de 6×10^{11} Din/cm² la falla tiene un desplazamiento promedio calculada en 30 cm con un desplazamiento total oblicuo hacia el SSE.

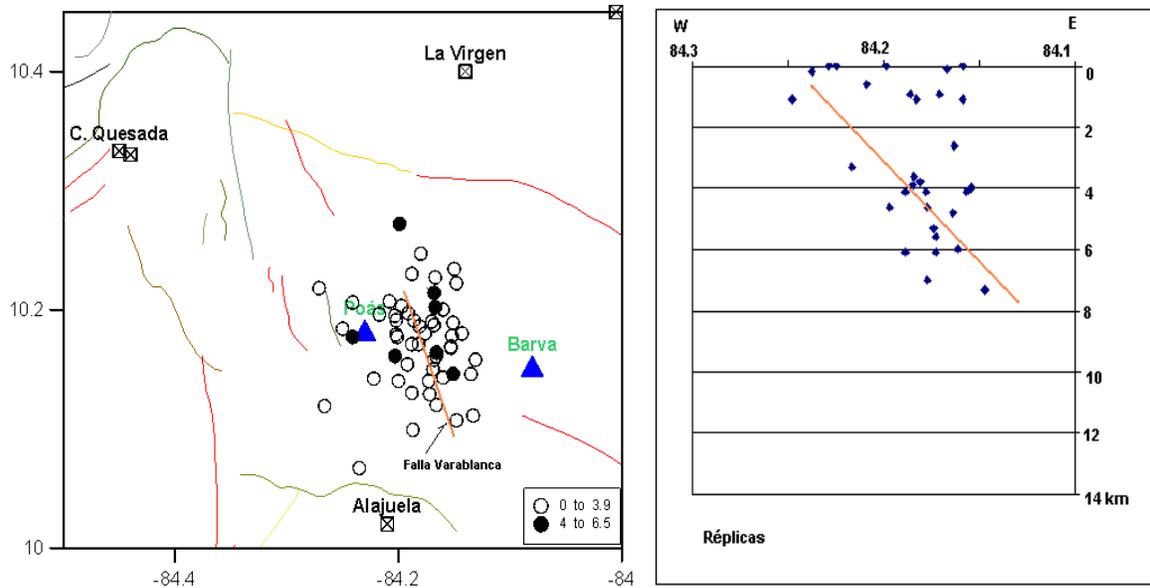


Fig. 2.13: Distribución en planta y en profundidad de las primeras réplicas del terremoto de Cinchona

Mecanismo focal

Se han reportado tres mecanismos focales para el evento principal. Estos son el del Servicio Geológico de los Estados Unidos, el obtenido por Harvard y el de la Red Sismológica Nacional. Los dos primeros son muy similares y en adelante solo referiremos el de Harvard. El mecanismo focal de Harvard es de desplazamiento de rumbo bastante puro con una pequeña componente normal, donde el plano nodal con componente dextral tiene un rumbo $N 54^{\circ} W$, un buzamiento de 80° al SW y un vector deslizamiento de -177 (Cuadro 2.6). El plano nodal de componente sinistral tiene un rumbo de $N 35^{\circ} E$, un buzamiento de 87° al SE y un vector deslizamiento de -10 . Por otro lado, la solución de la RSN es oblicua, donde la componente de desplazamiento de rumbo es mayor que la componente normal. El plano nodal con componente dextral tiene un rumbo de $N 30^{\circ} W$, un buzamiento de 56° al NE y un vector deslizamiento de -127 , y el plano nodal con componente sinistral tiene un rumbo de $N 24^{\circ} E$, un buzamiento de 48° al NE y un vector deslizamiento de -48 . Comparando con los datos de las fallas determinadas con base en las fotos aéreas y control parcial de campo, el mecanismo focal de Harvard muestra planos nodales que no coinciden con las fallas cartografiadas y sugiere la posibilidad de una falla no identificada por una débil expresión morfotectónica o una falla ciega. Por otro lado, la solución de la RSN coincide bastante bien con la falla Ángel-Varablanca en el plano nodal dextral con componente normal.

Cuadro 2.6: Mecanismos focales del terremoto de Cinchona (8-01-2009)

Fuente	Strike	Dip	Slip	Mecanismo focal
RSN	205.4	47.3	-36.86	
USGS	306	86	-150	
HARVARD (CMT)	126	80	177	

Observaciones de campo

En la investigación de campo realizada en los días siguientes al terremoto no se logró determinar con certeza una ruptura de falla asociada con este evento. Sin embargo, se encontraron algunas fracturas o pequeñas fallas en el terreno que pueden considerarse sospechosas de una posible ruptura de falla. A continuación las describimos. En el mismo talud del sitio 2 de la Fig. 1.5, se observó desplazamiento en varias fallitas dentro de una zona de un ancho de unos 2 m (Fig. 2.14A), con rumbos entre N 5º-10º E e inclinaciones de alto ángulo buzando al E. La que mostró mayor deslizamiento tenía una componente normal de 6 cm. Sin embargo, estas fallas pueden asociarse con una descompresión del talud al E y menos probable con una ruptura de falla. En la finca Cayuga se encontró una grieta de rumbo N 10º E, con un movimiento sinistral de 1,5 cm y una componente normal de 3 cm, donde el lado oeste bajó (sitio 6 en Fig. 1.5; Fig. 2.14B). En el sitio 7 (Fig. 1.5) se observó una grieta posiblemente tensional con un acimut 287 cortando un camino transversalmente.

Aunque se trató de visitar la zona de Cinchona y alrededores, donde se localizan los lineamientos sugestivos de ser fallas recientes, por diferentes razones no se logró cumplir apropiadamente con este objetivo. Una limitante para este trabajo fue la dificultad de acceso debido a que los caminos quedaron destruidos después del terremoto. La otra es el que estas trazas se localizan a lo largo de tramos donde los ríos La Paz y Sarapiquí fluyen encañonados, los cuales quedaron desestabilizados por gran cantidad de deslizamientos disparados por el terremoto. Por otro lado, la falla Ángel-Varablanca es de muy difícil acceso por ubicarse en una zona montañosa y densa vegetación. Observaciones realizadas en un vuelo en helicóptero tampoco permitieron determinar una ruptura de falla en las fallas identificadas en la zona. Se considera que la evidencia sismológica y sismotectónica concuerdan en definir que la falla que originó el terremoto de Cinchona ($M_s 6,2$) fue la falla Ángel-Varablanca.



Fig. 2.14: A. Fallas con desplazamiento normal observadas en el sitio 2 en Figura 5. B. Vista de suelo firme sugiriendo ruptura de falla en dirección N 10 ° E, al norte de Hacienda Cayuga (sitio 6 en coordenadas 242,400 y 518,500; Figura 5). La componente normal es 3 cm inclinada 58° al W y la siniestral es 1,5 cm. C. En el camino a Hacienda Cayuga, una grieta cruza el camino transversalmente con azimuth 287 y 3-4 cm de apertura. No visible movimiento lateral. Ubicación 518,682E-242,013N (sitio 7 en Fig. 1.5).

2.6 ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS DE COULOMB

La secuencia sísmica de Cinchona de enero del 2009, modificó el estado de esfuerzos tectónicos que prevalecía en el macizo del volcán Poás y alrededores, de tal forma que en algunos volúmenes corticales este aumentó y en otros disminuyó, lo cual adelantó y atrasó respectivamente, la reactivación de fallas locales y regionales, con implicaciones directas para el riesgo sísmico.

El estado de esfuerzos en el SW de la placa de Cocos muestra una dirección promedio del Esfuerzo compresivo máximo horizontal (E_{CHMax}) hacia el N 22° E, similar al de la convergencia y subducción de la misma bajo la Caribe. Esta interacción constituye el principal factor que controla la deformación neotectónica, salvo en las cercanías de la placa de Nazca, donde esta modifica dicho patrón. Se identifican varios dominios en los cuales se presentan importantes deflexiones del E_{CHMax} hacia el N franco y al NNW, sobre todo en las vecindades de las grandes estructuras regionales, cordilleras y bloques tectónicos. Estos cambios, a veces graduales, se aprecian en la Fig. 2.15. En dichas localidades la transpresión y la transtensión se superimponen a la distensión con predominancia local de las direcciones citadas (López *et al.*, 2008).

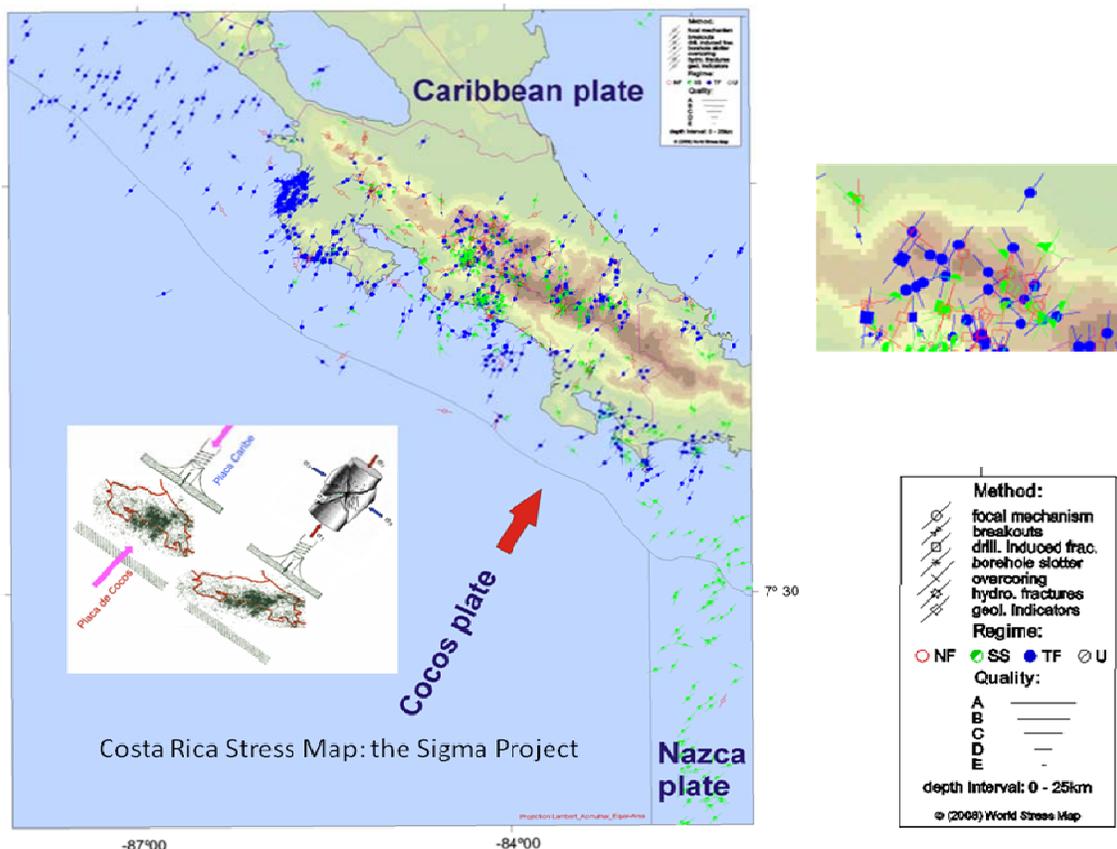


Fig. 2.15: Mapa de Esfuerzos Tectónicos de Costa Rica (López et al, 2008) con el detalle de la situación en el entorno de la región epicentral del terremoto de Cinchona. Note la dirección N 22° E preponderante del E_{CHMax} , subparalela a la convergencia Cocos-Caribe y las fluctuaciones locales cerca de los accidentes tectónicos y cordilleras.

Los mecanismos focales calculados para esta secuencia sísmica y sus réplicas permiten modelar los cambios en el estado de esfuerzos tectónicos que afectan a este macizo volcánico. En particular la migración de los mismos como consecuencia directa de los eventos asociados, hacia otras estructuras geológicas importantes por sus dimensiones y geometrías, que si se reactivan, pueden generar destrucción en la infraestructura civil local y regional. Conocemos el estado anterior y actual, pudiéndose determinar los cambios generados, al aplicar métodos apropiados como la

inversión de fallas mesoscópicas y planos nodales y el cálculo de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos debidos al movimiento en una falla rectangular (Okada, 1992).

La solución focal con geometría normal e importante componente de rumbo calculada por W. Rojas e I. Boschini, tiene mucha similitud cinemática y proximidad espacial con el evento premonitor del 7-01-09 (MI 3.4) y está depurada de errores por localización y cobertura. En la figura 2 se aprecia el mismo y otros de la secuencia, al cual se le asignó un Mw de 6.2 y una profundidad de 4.6 km. El plano nodal seleccionado es el 330,56,-127, calculado con 59 datos de polaridad, con epicentro ubicado en las coordenadas -84.177 con 10.194. Se incluyen las soluciones del USGS (Mw 6.1 a 10 km de profundidad y CMT-Harvard Mw 6.1 a 12 km). La réplica del 21 de enero (MI 3.8) tuvo una profundidad de 3.4 km en el flanco noroeste del volcán Barva y presenta un tipo diferente a los otros, pero con alta coincidencia direccional de uno de sus planos con el identificado como responsable del evento. Se reporta con magnitud MI 3.8 (Fig. 2.16).

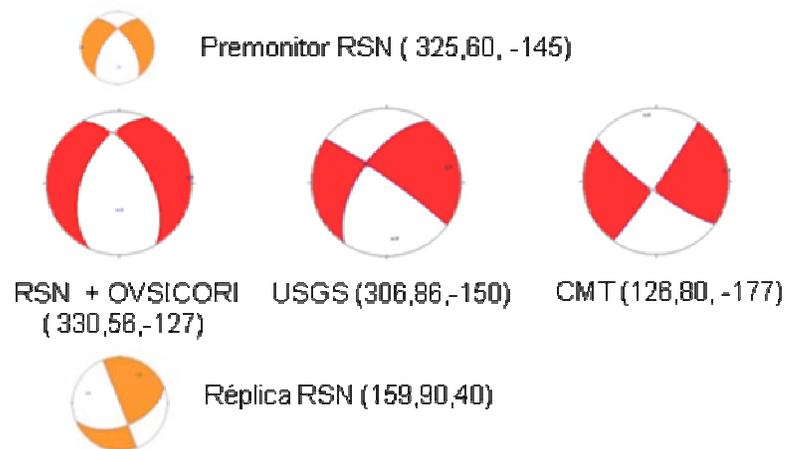


Fig. 2.16. Soluciones focales del evento premonitor del 7 de enero, las tres interpretaciones del evento principal y la réplica del 21 de enero.

Interpretación sismotectónica

La correlación del ECH_{Max} con el plano nodal seleccionado del mecanismo principal y con la geometría de las estructuras geológicas regionales se asocia con mucha lógica tectónica a un contexto en donde prevalece el desgarre lateral derecho como forma activa en que se acomoda la deformación regional. En la cupla de Riedel que se muestra abajo (Fig. 2.17), la dirección general compresiva NNE ampliamente identificada como la mayoritaria para esta parte de la placa Caribe (López et al, 2008), presenta una leve rotación hacia el Norte, propiedad antes descrita e igualmente detectada en varias localidades cercanas a las grandes estructuras y cordilleras y explica la relativa complejidad deformacional del medio en donde coexisten y se traslapan espacio-temporalmente la distensión y la transpresión-transtensión, como en otros edificios volcánicos del país (López *et al.*, 2008).

En este contexto la falla normal NW con importante componente de rumbo del plano nodal seleccionado del evento principal se ajusta muy bien con una lateral derecha sintética pronosticada por la cupla de deformación, y esta y la antitética son bisectadas por el vector compresivo. Las fallas inversas son perpendiculares a este y a las normales generadas por el vector extensivo, tal como se aprecia en la Fig. 2.17.

La antitética dextral NW, que generó el terremoto, se puede asociar a las fallas tipo Ángel-Varablanca y Volcán Viejo-Aguas Zarcas y la sintética y/o la fractura “P” a estructuras tipo Toro y a la falla Paz. El corrimiento, con rumbo hacia el SEE e inclinado al SW, correspondería con el frente de San Miguel y su homólogo en la parte sur de la cupla con la falla Alajuela, con rumbo similar y buzamiento opuesto, hacia el NE. Las fallas que controlan la cupla a su vez corresponden al patrón en “X” generadas por la megasolicitación triaxial a que está sometida la esquina SW de la placa Caribe en Costa Rica, con desgarres sinestrales NE y dextrales al NW (López, A; 1999).

La solución focal del USGS al ser utilizada en la lógica tectónica anterior, se ajustan a la orientación de los corrimientos y las fallas sintéticas y antitéticas de la cupla si se utiliza el plano nodal al NW. Para la CMT el plano NE sería el activo, lo cual no concuerda con la distribución de réplicas, aunque si podría indicar que el mismo puede haber estado deslizando durante el Holoceno, pues una población de 134 diaclasas neotectónicas estudiadas en el túnel del Proyecto Hidroeléctrico Toro 1 del I.C.E. por Joaquín Barrantes, muestra una de las direcciones preferenciales subparela a la de la falla Paz y a ese plano nodal NE. Otra población de 83 discontinuidades (datos de Oldemar Ramírez y Sergio Mora) medidas en las coordenadas 243530-518440 en el río Paz, se ajustan mucho mejor, probablemente debido a la cercanía con una eventual fuente sísmica, lo cual podría indicar que la misma ha estado activa durante la evolución reciente del macizo, con la fractura "P" muy bien representada. Las evidencias de ciertos desplazamientos superficiales que W. Montero, W. Rojas, G. Peraldo y E. Estrada (en este artículo) asocian a una posible ruptura superficial, anterior en este contexto, también guardan concordancia con dicha direccionalidad planteada.

En este contexto la secuencia de Cinchona se puede interpretar como iniciada por un evento normal direccional en la proximidad de la falla Vara Blanca, que el día siguiente se propaga en el plano nodal 330, 56, -127 de un tipo de falla similar a esta, con una difusión de esfuerzo que hace romper numerosas fuentes secundarias y terciarias, entre estas la correspondiente a la réplica del 21 de enero, la cual se explica mejor al asociar su vertical plano NW con una estructura similar a la falla Volcán Viejo-Aguas Zarcas o Ángel-Varablanca, pero en el flanco noroeste del volcán Barba, con un ajuste en direcciones muy alto (Fig.2.17).

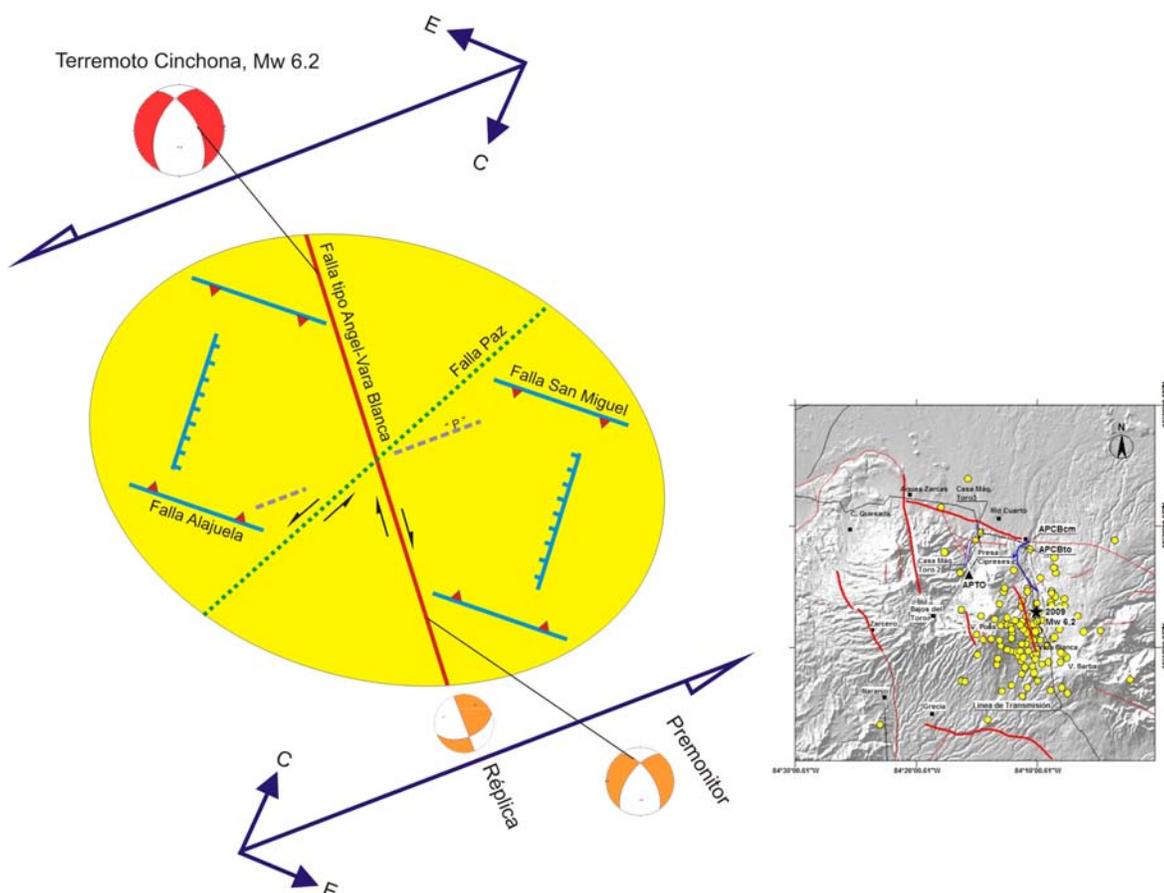


Fig. 2.17: Cupla de Riedel que explica y justifica la geometría de las fallas regionales y los mecanismos focales de la secuencia de Cinchona. Note la alta correlación entre las direcciones teóricas y las trazas de las estructuras regionales conocidas, como las fallas Alajuela, San Miguel y Vara Blanca entre otras, que aparecen en el modelo de elevación digital.

Cambios en los esfuerzos estáticos de Coulomb

El bien conocido hecho de que la sismicidad generada por eventos importantes reactiva otras estructuras cercanas y a veces lejanas está bien documentado, pero es hasta recientemente que es posible modelarlo numéricamente y gráficamente a diversas profundidades, para evaluar el potencial de reactivación y su influencia en la amenaza y riesgo sísmico.

Los datos de entrada para modelar los cambios en los esfuerzos de Coulomb, además del plano nodal seleccionado son: fricción = 0.4, Poisson = 0.25, Young = 8×10^5 bares y un tensor de esfuerzo tectónico moderno y regional, calculado mediante inversión de planos nodales y fallas mesoscópicas en diferentes localidades cercanas y representativas y escogido entre varios por su calidad según la escala respectiva del Mapa Mundial de Esfuerzos. El tensor Toro (datos de Albán Rodríguez y Allan López) es el usado y se aprecia en la Fig. 2.18, con una variedad de orientaciones y cantidad de planos que se ajustan a y justifican un régimen rumbo-deslizante con fuerte tendencia a permutarse en uno transpresivo propio de este ambiente volcanotectónico. El comportamiento fractal de estas fallas mesoscópicas debe representar a sendas fallas regionales con desgarre sinistral y dextral, como las ya señaladas y por los planos nodales de esta secuencia.

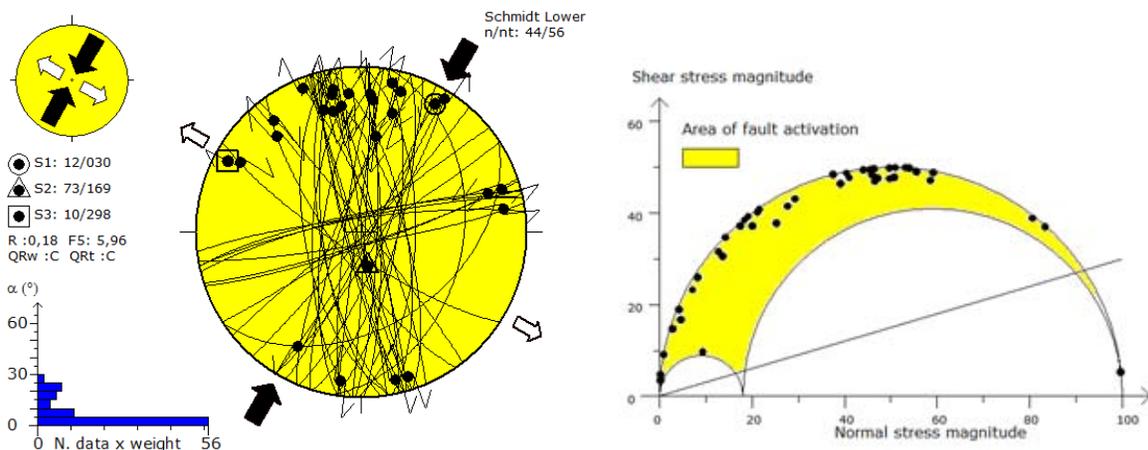


Fig. 2.18: Tensor Toro generado por la inversión de 44 fallas y fracturas de cizalla de un total original de 56 analizadas en la margen izquierda del río Toro dentro del macizo rocoso.

Este tensor es utilizado para calcular la nueva distribución de esfuerzos de Coulomb-CFS-, cuando estos son maximizados a diversas profundidades como consecuencia del deslizamiento en el plano nodal, denominándose como fallas óptimamente orientadas, o sea, son planos orientados de tal forma que los cambios en los esfuerzos de Coulomb en ellos resueltos son los más positivos (rojos en la escala de bares). La figura 5 muestra los CFS impartidos a las fallas conocidas en el entorno epicentral del evento principal del 8 de enero, para las fallas óptimas normales, de rumbo e inversas a 4.6 km de profundidad, la del terremoto, y que es una de las capas litosféricas probadas y los respectivos perfiles trazados en cada mapa.

En esta y en la figura 6 la escala de colores indica los valores en bares (1 bar = 0.1 Mpa) en donde los CFS han aumentado (rojo y amarillo) y donde han disminuido (azul y celeste). Los triángulos son los volcanes cercanos excepto el Cacho Negro, la línea verde es la traza aflorante teórica del plano nodal usado, la negra la intersección de este con la profundidad que se está estudiando y los rectángulos internos representan una subdivisión del plano (tapering) para evitar concentraciones ficticias de esfuerzo en los extremos de la estructura.

Donde hay superávit de esfuerzo, añadido al ya existente antes del evento, las posibilidades de reactivación son mayores aunque se trate de unos pocos bares o Mpa, como se ha demostrado en California, Anatolia y Kobe (Toda et al, 2005 y Lin et al., 2004)). Por lo tanto, las fallas que ahora quedan cargadas pueden “adelantar” el momento de su reactivación y las que quedan con déficit atrasarlo. Desde luego hay otras variables presentes que controlan el

comportamiento sísmico local y regional como la relajación viscosa y el deslizamiento profundo en la falla que no son discutidas aquí.

El Mapa y perfil de las fallas óptimas normales indica que importantes sectores de las fallas inversas Alajuela y San Miguel han quedado cargados con hasta 1 bar de esfuerzo de Coulomb en la capa a 4.6 km pero que tanto en superficie como desde los 6 hasta los 18 km de profundidad existe un alto potencial para que se formen o reactiven fallas distensivas y que desde la superficie hasta los 30 km por encima y debajo del plano de falla, se ha inhibido su deslizamiento con valores de -1 bar (Fig. 2.19). Para las fallas de rumbo la situación se parece un poco a la anterior al comparar los respectivos mapas y perfiles, aunque a profundidad los lóbulos cargados son más extensos y apoyarían el desarrollo de este tipo de fallamiento casi en forma continua lo largo de una sección SW-NE, dirección igual a la del plano nodal no seleccionado, aspecto que favorecería la alternancia de activación entre planos de mecanismos similares a los aquí estudiados. La distribución en planta de los sobreesfuerzos es continua en la capa estudiada pero el perfil indica que en el sector SW, hacia la falla de Alajuela, los CFS se han acumulado desde los 0 km hasta los 20 km, aumentando la peligrosidad de dicha estructura geológica. A esta cota la situación se repite en sectores NW y SE de las fallas San Miguel y Alajuela. La relativa similitud citada parece reflejar el carácter bivalente del mecanismo focal que combina ciertamente ambas geometrías estructurales. Por su parte los lóbulos de las inversas óptimas se acercan menos a la falla Alajuela pudiendo generar fallas de este tipo en la parte trasera de la misma, en donde no sería sorpresa que ya existieran contracciones de este tipo asociadas genéticamente a la misma, menos desarrolladas pero óptimamente orientadas para reactivarse ante esta sollicitación hasta los 10 km de profundidad. En el perfil mostrado la concentración positiva está muy concentrada en la vertical con el plano nodal desde la superficie hasta los 25 km. En otras palabras, el plano nodal seleccionado podría reactivarse en el futuro como una falla inversa.

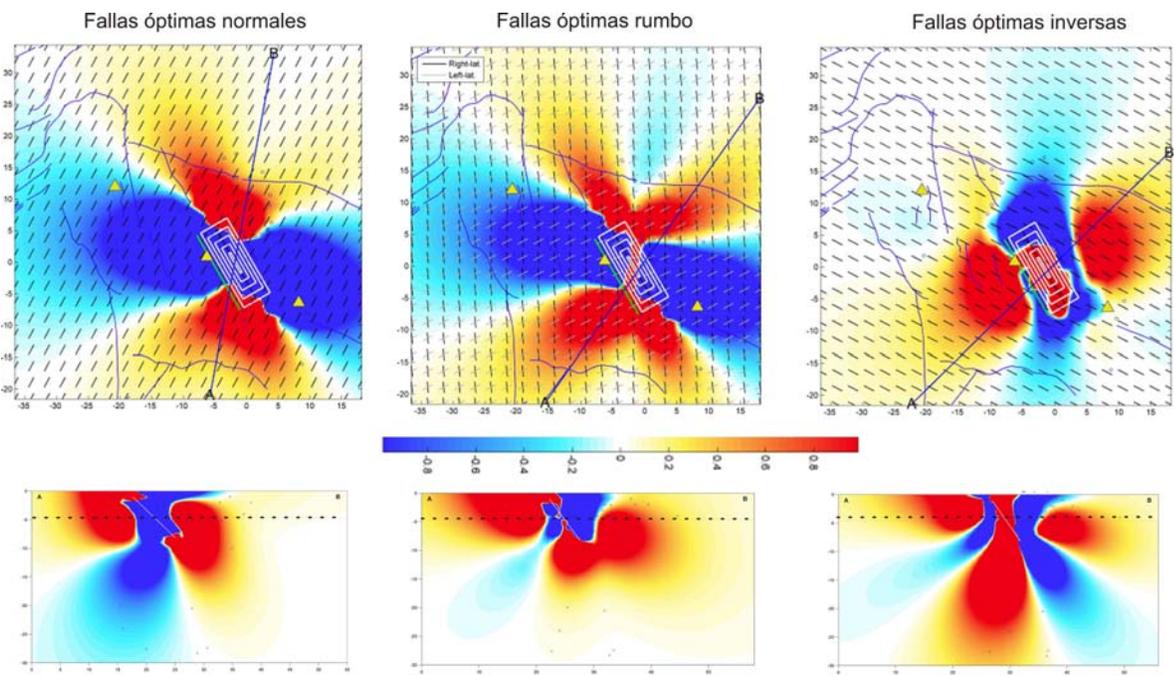


Fig. 2.19: Redistribución de esfuerzos estáticos de Coulomb a 4.6 km de profundidad y en perfiles hasta los 30 km para fallas óptimas normales, de rumbo e inversas. El rectángulo y línea blanca en el perfil es la falla generadora del terremoto y las líneas discontinuas señalan la dirección óptima de cada tipo de falla de acuerdo al campo de esfuerzos regionales. El máximo de CFS es de 1 bares (0.1 Mpa).

Al analizar los CFS que han recibido directamente las fallas regionales tipo Alajuela, Toro y Ángel-Varablanca (Fig. 2.20) a la misma profundidad se detecta que al asignarle a la primera una geometría de 105,30,80; por ser interpretada como inversa con su plano inclinado hacia el norte (ver perfil respectivo en esta figura), queda en una situación relativamente propicia para deslizarse como tal hasta los 5 km de profundidad, aspecto muy llamativo para la seguridad sísmica, lo cual también aplica a la San Miguel, pero hacia el este de dicho corte. La falla Toro (20,80,-10), de la que hasta hace poco se cuenta con evidencias de su comportamiento como tal pues era considerada un alineamiento, aporta más de 1 bar a las estructuras antes citadas y es reactivable en las cercanías del frente de San Miguel.

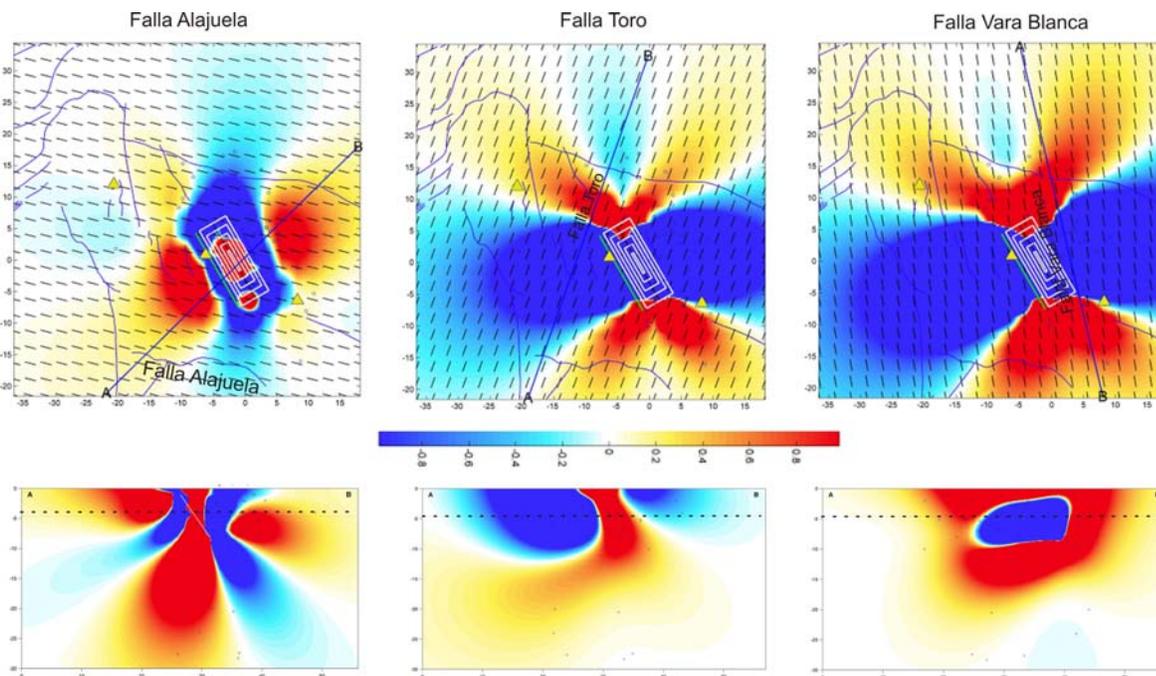


Fig. 2.20: CFS en las fallas Alajuela, Toro y Vara Blanca al ser analizadas como específicas. Note la influencia de sobrecarga en las inmediaciones del volcán Barva impartida por la primera falla.

Por su parte la falla Ángel-Varablanca (350,60, -60), a la que se le atribuye el terremoto también recarga a la Alajuela y San Miguel con niveles importantes de CFS. No menos interesante y retador es la influencia que tanto las fallas óptimas inversas como estas últimas tienen para el volcán Barva y en menor medida para el Cacho Negro, aspecto que merece mayor análisis por haberse detectado relaciones genéticas entre estos y la reactivación de cámaras magmáticas en el volcán Vesuvio (Nostro et al, 1998) . Como continuación de este trabajo se ha iniciado el modelado con datos de paleoesfuerzos, ante la ausencia de instrumentales, para determinar si el terremoto de Sarchí en 1912 fue disparado por el de 1911 y si las fallas Volcán Viejo o Toro tenían la capacidad de haber generado el terremoto de Toro Amarillo en 1955 y valorar su condición actual.

Cuando la falla Ángel-Varablanca se muestrea a 9.6 km de profundidad, cercana a los hipocentros del USGS y CMT y con una fricción de 0.4 (Fig. 2.21), se obtienen los mejores ajustes para la distribución de las réplicas, tanto para todas las calidades como para las mejores. La forma de los lóbulos rojos de CFS es bastante consistente con estas, indicando la coherencia y lógica tectónica del análisis. En este escenario también se visualiza muy claramente la redistribución y sobrecarga de CFS sobre las fallas San Miguel y Alajuela, aspecto que merece análisis posteriores.

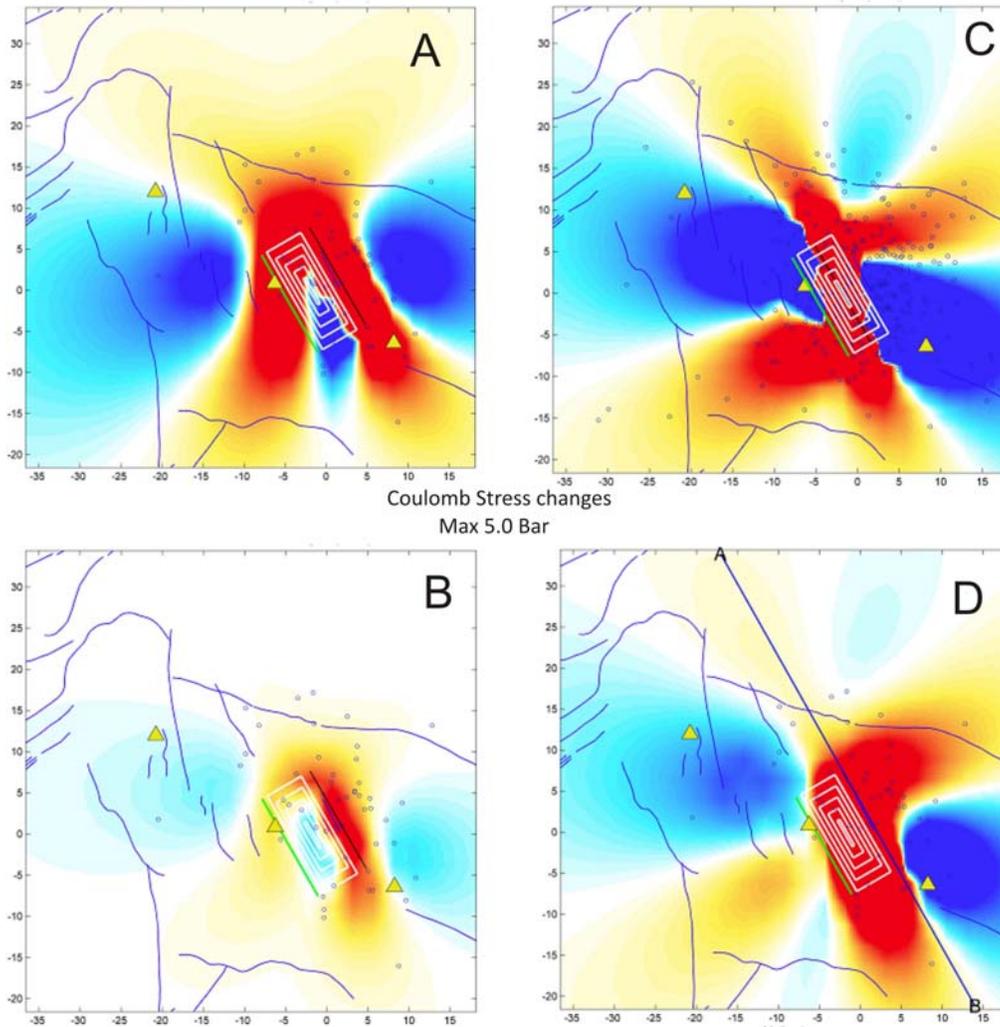


Fig. 2.21: Comportamiento de la falla Ángel-Varablanca ante varios cambios en el CFS y fricción 0.4 A- Como falla especificada con la misma geometría del plano nodal 330, 56, -127 a 9.6 km de profundidad. B- Como falla óptima normal a 4.6 km. La mayoría de las 51 réplicas de varias calidades se agrupan en el lóbulo cargado con 5 bares. C- La misma falla óptima con 341 réplicas de varias calidades. D- Todas las fallas óptimamente orientadas a 9.6 km. En todos los casos las fallas Alajuela y San Miguel reciben sendas sobrecargas de CFS en sus planos, aumentándose así su potencial de reactivación.

Conclusiones

La secuencia sísmica de Cinchona generó una redistribución de hasta 1 bar (0.1 Mpa) en los esfuerzos estáticos de Coulomb en el entorno cercano del macizo del volcán Poás, adelantando la posible reactivación de fallas como la Alajuela y San Miguel que por su geometría y longitud son capaces de generar sismos destructivos importantes y que posiblemente se han desarrollado en épocas históricas. Otras regiones han disminuido este potencial, sobre todo las que están al este y oeste de la falla Ángel-Varablanca, sin que esto signifique que están bloqueadas o inactivas totalmente. La coherencia entre la teoría del CFS y la realidad de las fallas cartografiadas y los planos nodales, así como la distribución de réplicas es evidente, mientras que la cercanía al volcán Barva de lóbulos positivos de esfuerzos de Coulomb deben ser tomados muy en cuenta para evaluar posibles efectos en su cámara magmática. Se sugiere que este método sea utilizado como una herramienta más en el análisis del potencial de reactivación de fallas y el riesgo sísmico.

CAPÍTULO III

GEOMORFOLOGÍA Y DINÁMICA EXTERNA DE LA ZONA AFECTADA

POR EL TERREMOTO DE CINCHONA

Elena Badilla, Luis G. Obando

Badilla, E., Obando, L.G. 2009: Geomorfología y dinámica externa de la zona afectada por el terremoto de Cinchona. En: Barquero, R. (Ed.): El terremoto de Cinchona, 8 de enero de 2009. Inf. RSN. 60-68.

3.1 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología del área afectada por el terremoto de Cinchona, del 8 de enero de 2009, está dominada por la presencia de relieves volcánicos, caracterizados por laderas de pendientes moderadas (promedio de 25-30°), disectadas por valles profundos y verticales, con patrón de drenaje paralelo, rasgos típicos de depósitos de coladas de lava con espesas coberturas de piroclastos de caída (Fig. 3.1 y 3.2).

Se identificaron un total de siete geoformas de origen volcánico, dos de origen aluvial y uno de origen estructural (Fig. 4.3 y 4.4), las cuales se describen de forma general a continuación:

A) Formas de origen volcánico:

V1. Cráter volcánico

El cráter principal del Volcán Poás, así como la Laguna Botos, se clasifican dentro de esta unidad. La geoforma del cráter principal es de forma semicircular, con un diámetro de 1320 m en dirección N-S. Las pendientes de las paredes internas pueden superar los 60° de inclinación. Las pendientes en las paredes de la Laguna Botos son un poco menos empinadas, aunque pueden alcanzar localmente los 50°.

V2. Laderas denudacionales volcánicas (relictos)

Ubicadas en el extremo oeste del área, esta unidad está representada por relieves denudacionales en rocas volcánicas antiguas, por lo que el grado de denudación es muy fuerte. Son laderas largas (~2 km) de pendientes moderadas (promedio 20°), con divisorias de aguas angostas y valles profundos, en V, de hasta 400 m de profundidad, orientados predominantemente en dirección SW-NE. El patrón de drenaje es paralelo.

V3. Laderas volcánicas denudacionales Barva – Poás

Comprenden la ladera sur de los volcanes Poás y Barva y representan la unidad geomorfológica más grande del área de estudio. Se caracterizan por pendientes promedio de 20° y laderas muy largas (> 9 km en el área de estudio), con divisorias estrechas en las partes altas y anchas y aplanadas en las partes bajas. Hacia las cimas de los volcanes, los valles fluviales son en V, moderadamente profundos (200 m o menos), con paredes que alcanzan hasta los 45° de inclinación. Por su parte, los valles cercanos a la base de las laderas, son ligeramente más anchos y menos profundos (< 100 m). En general, los drenajes fluyen en dirección SW, con un patrón paralelo.

V4. Laderas volcánicas inferiores poco disectadas

Ubicadas en el sector central este del área de estudio, en la parte basal de la ladera norte del Volcán Barva. Se caracterizan por una pendiente suave (10° en promedio), valles pocos profundos (máximos 30 m) y de paredes moderadamente empinadas (~20°), con divisorias anchas. Se encuentran inclinadas en dirección NNW, drenando con

un patrón paralelo. Estos relieves suaves pueden relacionarse con depósitos piroclásticos antiguos, incluso con algún grado de retrabajo por acción fluvial.

V5. Laderas volcánicas inferiores moderadamente disectadas

Se localizan en el sector central y este del área de estudio, y están caracterizadas por pendientes ligeramente más empinadas que las de la unidad anterior (15° en promedio). Se diferencian de la unidad V4 en que los valles fluviales son más profundos (50 m o más), con paredes más empinadas ($\sim 30^\circ$) y las divisorias más angostas.

V6. Laderas volcánicas superiores

Se clasifican dentro de esta unidad el cerro Congo y la cima del Volcán Poás. Se trata de relieves de pendientes moderadas a fuertes ($25-30^\circ$), fuertemente disectados por valles en V, profundos (100 – 150 m) y de pendientes que alcanzan los 50° de inclinación. Las divisorias son angostas y el patrón de drenaje radial.

V7. Maar Laguna Hule

Depresión semicircular de hasta 200 m de profundidad, ubicada al norte del Cerro Congo, la cual se encuentra bordeada por un escarpe de pendientes moderadas a fuertes ($30-40^\circ$), y en cuyo interior se aprecia un relieve plano ocupado parcialmente por dos lagunas. El patrón de drenaje es anular.

Durante el evento Cinchona, las paredes del sur de la depresión, fueron muy afectadas por los deslizamientos.

B) Formas de origen aluvial

F1. Abanicos aluviales

Ubicada al norte del área de estudio, esta unidad es la segunda más extensa. Se caracteriza por pendientes suaves (10°) y valles poco profundos (< 20 m), con paredes poco inclinadas ($< 15^\circ$). Las divisorias son anchas y el patrón de drenaje es paralelo, localmente subdendrítico, el ancho de los cauces pueden llegar hasta los 200 m, con una dirección predominante de flujo hacia el norte.

F2. Cañones fluviales

Unidad representada por los cañones de los ríos Toro (al W) y Sarapiquí (al E), los cuales se caracterizan por ser profundos (hasta 300 m), anchos (máximo 1 km) y de paredes empinadas ($>40^\circ$). Su dirección predominante de flujo es hacia el norte. Los flujos de lodo originados por el evento Cinchona, bajaron rápidamente por estos canales colectores erosionando fuertemente sus cañones.

C) Formas de origen estructural

S1. Escarpe falla San Miguel

La presencia de la falla San Miguel se encuentra evidenciada por el rasgo claro que representa el escarpe de hasta 200 m de alto, ubicado al pie de las laderas volcánicas. La pendiente promedio es de 35° y se encuentra disectado por valles de hasta 50 m de profundidad. Este rasgo es atravesado tanto por el río Toro como por el Sarapiquí.

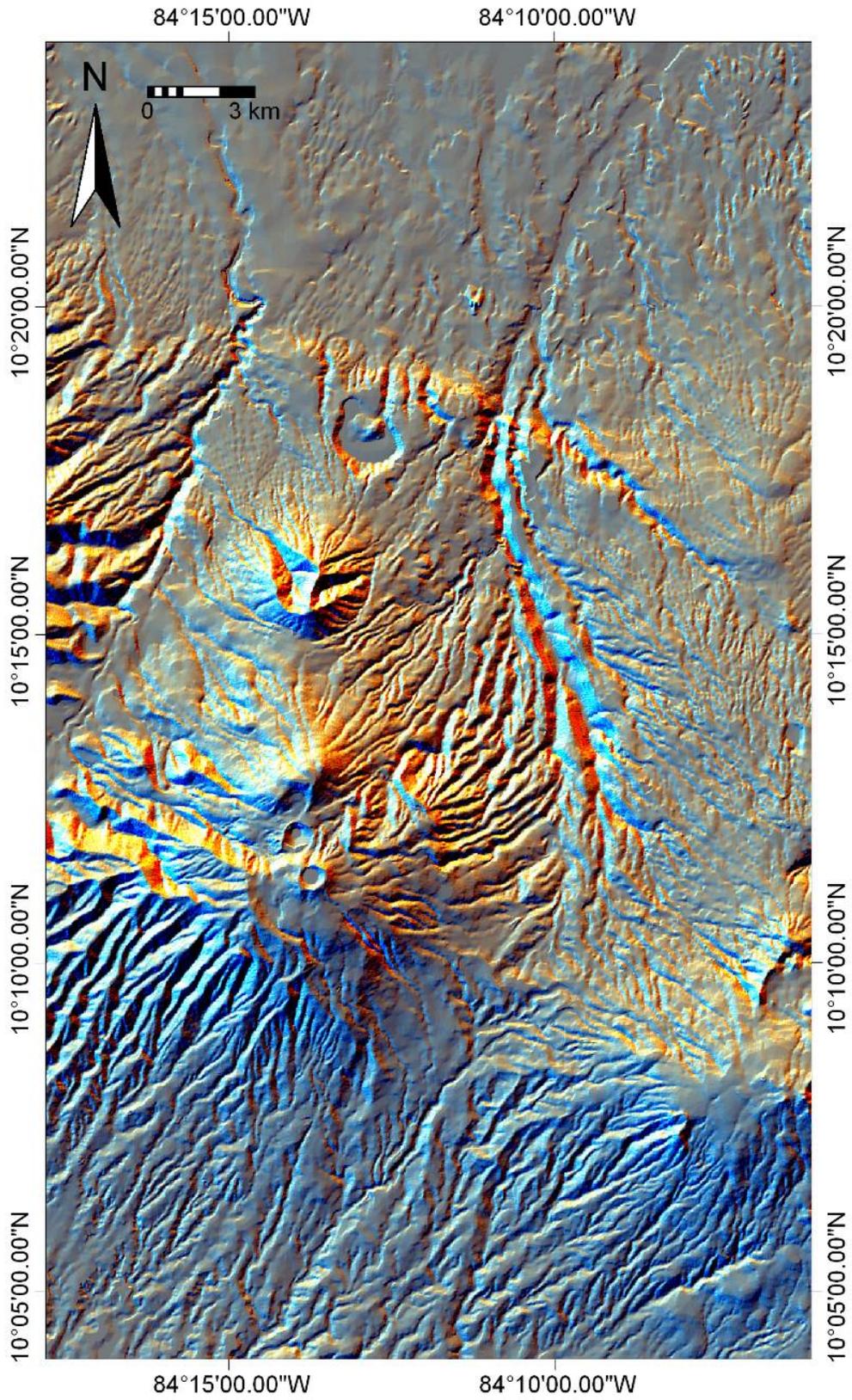
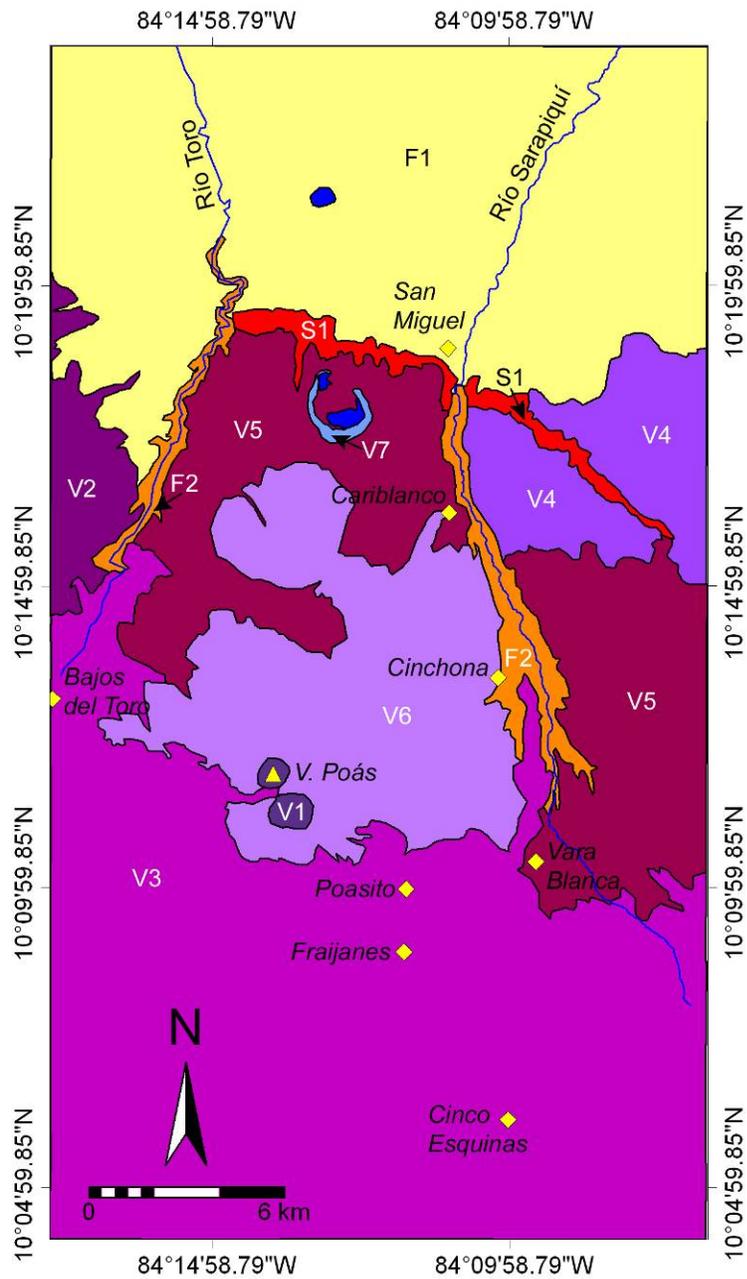


Figura 3.1. Modelo sombreado del terreno



Formas de origen volcánico

- V1: Cráter volcánico
- V2: Laderas denudacionales volcánicas (relictos)
- V3: Laderas volcánicas denudacionales Barva - Poás
- V4: Laderas volcánicas inferiores poco disectadas
- V5: Laderas volcánicas inferiores moderadamente disectadas
- V6: Laderas volcánicas superiores
- V7: Maar Laguna Hule

Formas de origen aluvial

- F1: Abanicos aluviales
- F2: Cañones fluviales

Formas de origen estructural

- S1: Escarpe falla San Miguel

Simbología

- Lagunas
- Poblados
- Volcanes

Figura 3.2. Mapa geomorfológico simplificado del área de estudio

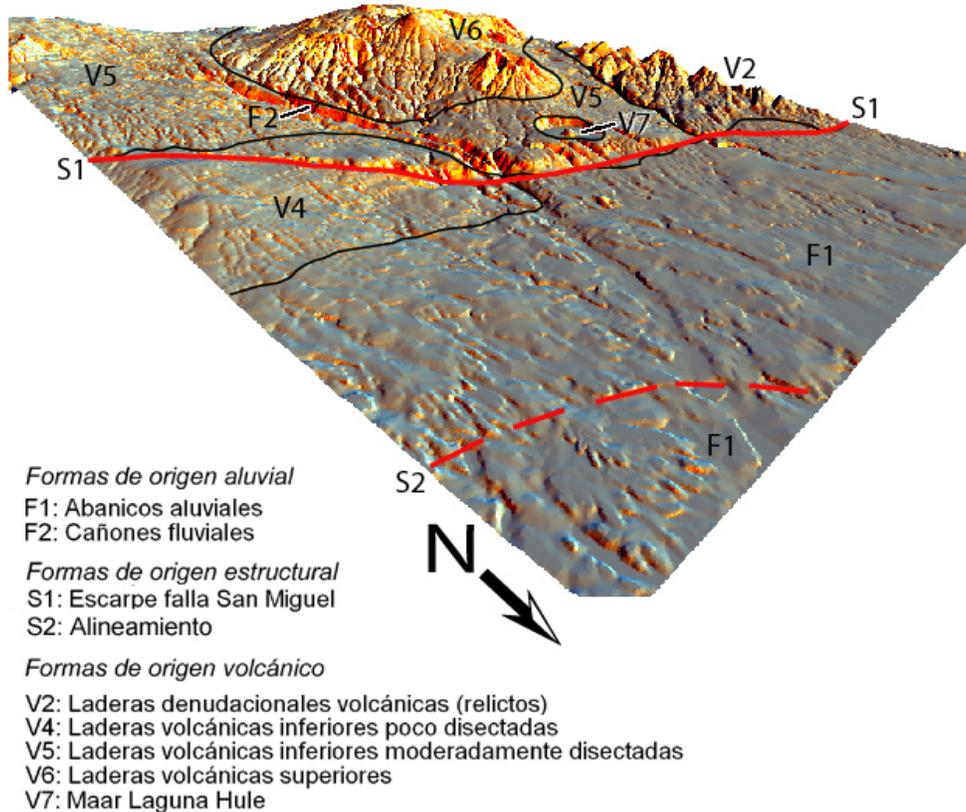


Fig. 3.3. Esquematzación en 3D de la geomorfología del área de estudio.

3.2 FLUJOS DE LODO

Un flujo de lodo o avalancha de lodo, es un flujo viscoso con un fluido como medio de transporte (agua por ejemplo), con una elevada concentración de materiales detríticos (fragmentos) como coloides, arenas, rocas y materia orgánica incluida. Estas avalanchas se mueven hacia los valles por gravedad, se requiere de una *zona de aporte, un canal o canales colectores y una zona de depositación*. Dado que se mueven por gravedad, un cambio de pendiente más suave, implica una disminución de la energía cinética por tanto, ocurre sedimentación, estos flujos de lodo pueden ocurrir en oleadas en dependencia de la frecuencia en que ocurre la obstrucción del canal principal.

Después del terremoto de Cinchona, se observó un potente flujo de lodo. Los testigos reportan que la avalancha ocurrió entre 20 minutos a 1 hora después de ocurrido el evento principal. Las inspecciones de campo muestran que el flujo de lodo principal bajó por el cañón del río Sarapiquí, río Toro y colectores secundarios como por ejemplo, río Ángel, río Sardinal, río Cariblanco, río La Paz, río María Aguilar, etc.

2.1 Zona de aporte: La zona de aporte del material detrítico ocurre en las partes altas de la zona, esto es, en las laderas volcánicas inferiores moderadamente disectadas (V5 en Figs. 3.3 y 3.4) y en las laderas volcánicas superiores (V6 en Figs. 3.3 y 3.4), dado que son laderas propias de los estratovolcanes, están compuestas por coladas de lava, tobas de ceniza, y lapilli principalmente, inconsolidados, meteorizadas y muy susceptibles a la erosión rápida, debido a las altas pendientes.

De acuerdo a los cálculos preliminares se asume una zona de aporte de sedimentos de 200 km², dichos cálculos serán afinados cuando se cartografíen en detalle los deslizamientos que dominan las laderas volcánicas (V5 y V6 en Figs. 3.3 y 3.4).

2.2 Colectores Principales: Los colectores principales que fueron afectados por la avalancha inicial, son el río Toro, un río meándrico encajado y el río Sarapiquí de morfología muy rectilínea (F2 en Figs. 3.3 y 3.4), se reportaron tres avalanchas posteriores al evento principal que bajaron por el río El Ángel, un afluente del Sarapiquí. El flujo primario, destruyó el puente original de concreto, y dos flujos posteriores, destruyeron los puentes portátiles tipo “Bayle”, construidos sobre el cauce del río El Ángel. El sobrevuelo realizado sobre las nacientes de este río, muestra que existe, mucho material no transportado aún, ello explica la causa de las oleadas de avalanchas. Y obliga a un monitoreo constante y la instalación de un sistema de alerta, una vez iniciada la época de lluvias

2.3 Zona de depositación: La zona de depositación empieza a ocurrir marcadamente cuando ocurre un cambio de pendiente, en este caso, el cambio de pendiente se observa en las zonas de abanicos aluviales (F1 en Figs. 3.3 y 3.4), las cuales tienen pendientes muy bajas (10 grados).

En este trabajo se discutirá la zona de depositación del río Sarapiquí, debido a que este río, pone en peligro de inundación a las comunidades de Bajos de Chilamate, Chilamate, Puerto Viejo.

Las avalanchas de barro, bajaron por ríos muy encañados, con alturas de hasta 300 m y pendientes de más de 40 grados, pero al llegar a los abanicos aluviales, los ríos se hacen más anchos. Esto ocurre, en el río Sarapiquí, aproximadamente a partir del sitio Finca Cedros, en donde el cauce se inicia con un ancho de unos de 66 m y llega hasta 330 m aproximadamente. De acuerdo a las observaciones realizadas por personeros del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, común. personal 2008), el río Sarapiquí elevó el nivel del cauce, entre San Miguel y Bajos de Chilamate, aproximadamente en 2 m. Preliminarmente se ha calculado un área de sedimentación de 100 km² por flujos de lodo (Fig. 3.4).

El cuadro No. 3.1 muestra los niveles máximos visibles del flujo de lodo inicial, nótese que en el río El Ángel (F2 cañón fluvial), los niveles máximos visibles llegaron hasta los 15 m de altura sobre el nivel del cauce del río, mientras que cerca de Puerto Viejo (F1 llanura aluvial), tan solo llega a 1 m. De lo anterior se desprende que el río Sarapiquí, dejó su carga sedimentaria aguas arriba del poblado de Puerto Viejo y que este río tiene capacidad para amortiguar avalanchas de este tipo. El tipo de sedimento observado en la llanura de inundación, se compone de limos y arenas finas a gruesas con mucho detrito orgánico, desde hojas hasta troncos de tamaños métricos. Las observaciones de campo muestran que solo en los codos del río, el tirante tiende a ser muy alto hasta 15 m, mientras que en los tramos rectos no sobrepasa los 5 m. De ello se desprende, el hecho que la avalancha inicial al llegar a la llanura de inundación, ésta era poco viscosa, muy fluida y con un gran poder de arrastre de barros y arenas no así granulometrías tipo bloques. La intensidad o densidad del flujo fue tal que es posible observar troncos desgajados incrustados en árboles que crecen a orillas del cauce del río Sarapiquí, por ejemplo en la localidad de Chilamate.

Cuadro No. 3.1: Niveles del tirante máximo visible del flujo de lodo inicial.

Sitio	Tirante de agua máximo visible	Nivel de terrazas aluviales a partir del cauce del río
Río el Ángel, cruce de carretera	15 m	No hay terrazas, cañón del río
San Miguel, hacia Colonia Carbajal	5 m a 15 m en los codos del río	Cañón del río
El Bosque (cercanías)	-----	Alrededor de 20 m
Puente hacia la localidad de Tirimbina	2,5 m	Alrededor 2 a 5 m
La Virgen	2 m	Alrededor de 3 a 4 m
Bajos de Chilamate	2,6 m	De 3 a 15 m, varias terrazas
Chilamante	1,5 m	3 m
Puente carretera Pto. Viejo	1 m	2 -5 m

Estado actual de los sedimentos

Los sedimentos actualmente se encuentran en tres estados:

- 1) *Estado in situ*: corresponde a los materiales detríticos localizados en las laderas de pendiente alta (V5 y V6 en Figs. 3.3 y 3.4)., dichos detritos, aún no han sido transportados hacia los cauces de los ríos, por ejemplo, las zonas de deslizamiento observados en Chinchona.
- 2) *Estado de depósito en las nacientes*: detritos inorgánicos y orgánicos que se encuentran abundantemente en las nacientes de las quebradas y ríos menores que no tuvieron capacidad de transporte durante la ocurrencia de la avalancha inicial. Estos sedimentos posiblemente serán lentamente transportados hacia la planicie aluvial al iniciarse la estación lluviosa.
- 3) *Estado de depósito en las llanuras*: corresponden con sedimentos depositados en las llanuras de inundación, son detritos susceptibles de transporte si hubiese un ligero aumento del caudal del río, en este caso del río Sarapiquí.

Los tres estados presentan materiales altamente inestables, pero el *estado de depósito en las nacientes* y el *de depósito en las llanuras*, representan sedimentos en tránsito de fácil transporte debido a su granulometría de limo y arena. Este sedimento tiende a levantar el nivel del cauce del río, siendo potencialmente amenazante por inundación en la Virgen, Bajos de Chilamante, Chilamate y Puerto Viejo.

El *estado in situ*, pasará por los estados anteriormente descritos, solo se requiere que algún fenómeno natural o antrópico, los mueva de su sitio.

Entre los fenómenos naturales se pueden indicar, el agua, sismos o gravedad, mientras que un fenómeno antrópico que de hecho ha ocurrido, son los procesos de reconstrucción de la carretera u otros, en donde las operaciones de despeje de carretera mueven los detritos hacia los cauces de los ríos y quebradas, aumentando así la potencial vulnerabilidad por inundación.

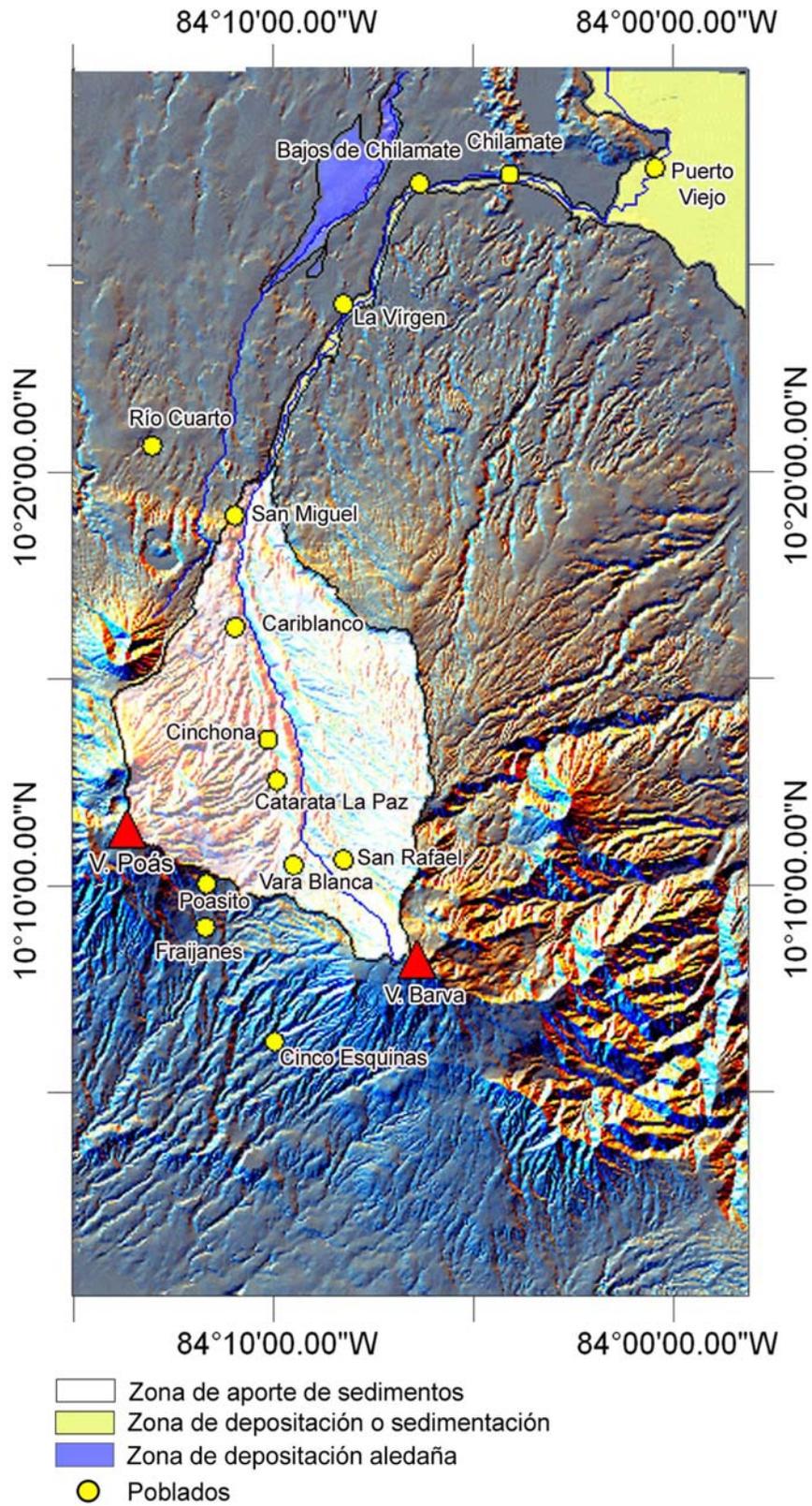


Fig. 3.4: Mapa preliminar de las zonas potenciales de erosión y depositación de sedimentos por flujos de lodo.

Línea de Costa Caribe

La alta tasa de sedimentación sobre los cauces de los ríos, convierte este fenómeno en una anomalía que ha alterado el perfil de equilibrio de los ríos. Esto significa que sistemáticamente los torrentes transportarán los sedimentos hacia la costa Caribe, lo cual implica que dicha carga sedimentaria posiblemente cambiará a mediano o largo plazo, la morfología actual de la costa, ya que el oleaje marino redistribuirá estos sedimentos a lo largo de la línea costera. Posiblemente los canales de navegación de Barra del Colorado necesitarán dragado.

Sistema de Alerta

Dado el historial de inundaciones recurrentes en la cuenca del río Sarapiquí aunado al aumento de la sedimentación y el aumento de la amenaza por inundación, la Comisión Asesora de Hidrometeorología, de la cual la Escuela de Geología es miembro, ha sugerido a la Comisión Nacional de Emergencia (CNE), la instalación de un sistema de vigilancia continua y permanente de las condiciones hidrometeorológicas en la zona, especialmente en la cuenca media alta y la cuenca alta a fin de aplicar un protocolo de prevención y evacuación de las poblaciones y caseríos potencialmente amenazados por posibles avalanchas de lodo, cuando inicie la estación lluviosa. Dicho sistema de alerta ya ha sido instalado y está en operación (Álvaro Brenes CNE, com. escrita, 2009).

CAPÍTULO IV

ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS DE LOS FLUJOS DE LODO

Guillermo E. Alvarado

Alvarado, G.E. 2009: Aspectos sedimentológicos de los flujos de lodo. En: Barquero, R. (Ed.): El terremoto de Cinchona, 8 enero de 2009. Inf. RSN, 69-93.

4.1 INTRODUCCIÓN

El 8 de enero ocurrió el terremoto de Cinchona (M_w 6,2) a las 1: 21': 34" p.m. con una profundidad de 4,6 km y una intensidad muy localizada de grado IX en la escala MM en la zona epicentral a 7 km al ENE del cráter del volcán Poás, pero en términos generales su intensidad en el área mesosísmica fue de grado VIII-VII.

Este terremoto disparó una serie de deslizamientos, en su mayoría regolíticos y de caída de bloques, rotacionales y traslacionales, incluyendo los complejos, concentrados en zonas preferenciales, que serían las del área mesosísmica, establecida entre Varablanca-cono Von Frantzius-Cinchona-río Sarapiquí, y la otra en los alrededores del volcán Congo. Otros deslizamientos menores ocurrieron entre Fraijanes y Cartagos, así como los caminos de acceso a Bajos del Toro, alrededores de San Miguel y de Río Cuarto (Fig. 4.1).

Aparte de los efectos de la intensa y localizada sacudida sísmica, acrecentados por suelos volcánicos arcillosos en elevadas pendientes y por muchas construcciones deficientes, se dispararon una serie de avalanchas, coladas o flujos de barro, de mayor a menor importancia en los ríos Seco, María Aguilar, Sardinal, Cariblanco, Ángel, La Paz, Mastate y Quebrada Tigre.

Claramente el evento más importante y económicamente destructor que recogió gran parte de las corrientes de lodo, fue el río Sarapiquí. Estas corrientes destruyeron 6 puentes e inundaron la Casa de Máquinas de Cariblanco, destruyó la toma del María Aguilar, y afectó levemente la presa del Sarapiquí, en estas últimas dañando el equipo electromecánico (tableros de control, generadores), sacando de operación a la planta Hidroeléctrica de Cariblanco. Otras plantas de generación eléctrica privada, fueron igualmente afectadas de modo severo por el sismo y sus efectos secundarios (deslizamientos y flujos de lodo) tales como El Ángel, Suerkata, Caño Grande e Hidrovenecia, fuera del objetivo del presente estudio.

Unas 40 cabezas de ganado murieron y se destruyeron potreros. Afortunadamente, debido a alertas generadas por personal ICE por diferentes medios y por pobladores, el flujo no cobró vidas humanas en el ICE. De igual modo, el dique protector de la Casa de Máquinas ayudó a que los efectos no fueran más destructivos. La vida en los ríos afectados fue totalmente eliminada, entre ellos una gran cantidad de peces y anfibios, aunque al día de hoy ya algunos peces y nutrias están colonizando de nuevo el río Sarapiquí, procedentes de cauces no afectados.

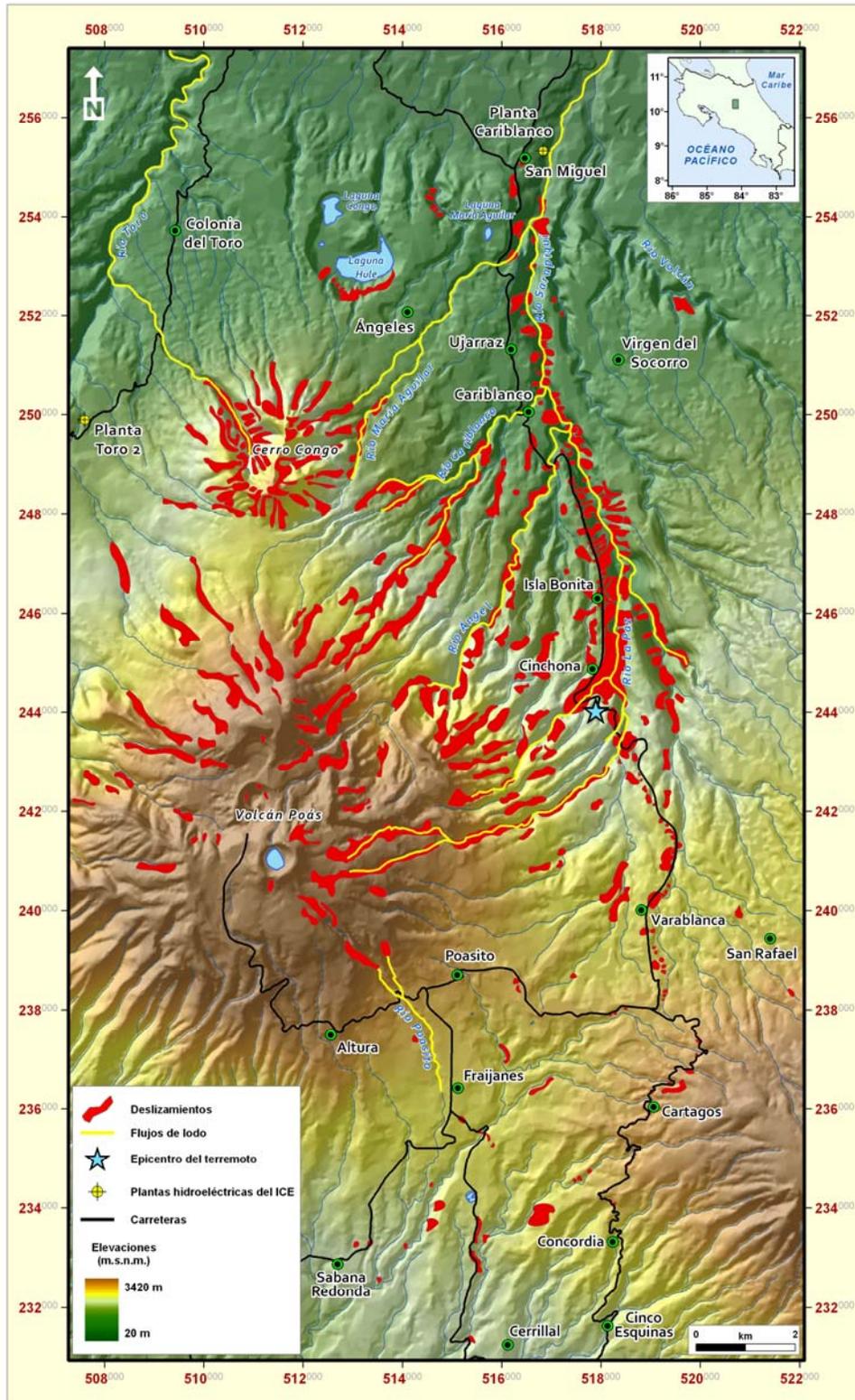


Fig. 4.1. Mapa generalizado y preliminar de los principales deslizamientos y corrientes de lodo disparados por el terremoto del 8 de enero, basado en datos de la UNA, ICE, CNE y UCR, con comprobación parcial de campo y con sobrevuelos.

Un nuevo evento de avalancha se generó el mismo día del temblor como las 9: 30 p.m. y después en la madrugada del 21 de enero. Posterior a esas fechas, otros eventos se registraron e incluso afectando en cierta medida el atracadero y sus embarcaciones en Puerto Viejo de Sarapiquí.

El presente informe trata sobre una recopilación de los antecedentes, hechos, aspectos sedimentológicos e hidrológicos, así como algunos de sus efectos, con el fin de dejar constancia sobre este fenómeno hidrogeológico que afectó severamente al país, particularmente al sector de generación eléctrica y a la infraestructura vial. También se pretende emitir una serie de apreciaciones orientadas a que puedan servir para estudios futuros de carácter preventivo.

4.2 ANTECEDENTES

La región afectada por el terremoto se ubica entre los macizos de los volcanes Poás (activo) y Barva (dormido), a lo largo de los cuales discurre el río Sarapiquí. Varios otros aparatos volcánicos menores y dormidos (Congo, Hule, Cacho Negro, etc.) se presentan en la región y una serie de fallas activas y potencialmente activas ya habían sido delineadas en diversos estudios (Alvarado *et al.*, 1988; Alvarado, 2000). La región presenta laderas de suave hasta abrupta pendiente (60° e incluso verticales), con acantilados entre 300 y casi 600 m, esculpidos en rocas volcánicas y epiclásticas (lavas, tobas, brechas, lahares), con una espesa cobertura de suelos (tobas y tobas de lapilli alteradas, lahares) de por lo menos 5-20 m de espesor.

Desde que el ICE inició los estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos en la cuenca del río Toro en 1985, se visualizó que la región había sido afectada por 5 terremotos locales (1851, 1888, 1911, 1912 y 1955) que junto con el terremoto de Orotina de 1924, habían generado deslizamientos y avalanchas, particularmente por el valle del río Toro. Dichos estudios fueron de índole sismológica, neotectónico y vulcanológico (Alvarado & Climent, 1985; Alvarado, 1988; Alvarado *et al.*, 1988, 1989). Después, con los estudios hidroeléctricos Laguna Hule, Hule, Cariblanco y Toro 3 en la cuenca del Sarapiquí y de Toro, continuaron los trabajos de detalle reafirmando y afinando las conclusiones en cada uno de ellos. De los estudios previos se desprende que la región alrededor del Poás ha sido afectada en época histórica por lo menos por 7 terremotos (sin tomar en cuenta el del 2009), que en su mayoría desencadenaron deslizamientos y crecidas en ambas márgenes de la cordillera Central, incluyendo el sismo relativamente lejano de Orotina (Alvarado, 1988; Alvarado *et al.*, 1988; Mora & Morales, 1986, 1992; Peraldo & Montero, 1994). Ver cuadro 4.1.

Von Frantzius (1861) menciona que en 1770 ó 1776 el río Itiquís se creció mucho a causa de un fuerte temblor, trayendo gran cantidad de piedras, barro y troncos, sobrepasando en muchas partes su nivel y cubriendo extensiones enteras con los sedimentos, cuyos vestigios aún logran verse. En efecto, Alvarado (2000) le asigna que el responsable de todo esto fue el terremoto de San Bartolomé de Barba, acaecido el 15 de febrero de 1772, descrito por Peraldo & Montero (1994).

El terremoto del 30 de diciembre de 1888 originó la laguna de Fraijanes y otros deslizamientos menores así como crecidas en diversos ríos (Alvarado *et al.*, 1988; Mora & Morales, 1986, 1992).

Otro ejemplo corresponde con en el terremoto de 1912, en donde unos 10 minutos después del sismo se originó una crecida en el río Sarchí, la cual arrasó el puente situado en el camino de Grecia a Sarchí, continuando hacia el río Colorado hasta el río Grande. El río San Juan fue afectado devolviendo el sentido de sus aguas unos 700 m. Otros desbordamientos similares bajaron simultáneamente por los ríos Anonos, Desagüe y Gorrión, con intervalos de aproximadamente 5 minutos, matando mucho ganado y destruyendo casas, pereciendo sus moradores (Tristán *et al.*, 1912).

El 4 de marzo de 1924 ocurrió el terremoto de San Mateo (Orotina) que ocasionó destrucción en la región sur-occidental del Valle Central. Días después, el 2 de marzo ocurrió una fuerte réplica bajando posteriormente corrientes de lodo, piedras y árboles en la naciente de la quebrada Sucia (un posible afluente de la quebrada Azufrada), ubicada a poca distancia al oeste de Toro Amarillo, que afortunadamente no causaron daño alguno en esta región casi despoblada (Sapper, 1925; Mora & Morales, 1986).

El 01 de setiembre de 1955 se originó un nuevo terremoto que trajo como consecuencia la crecida de algunos ríos, aproximadamente un mes después en correspondencia con el inicio del período lluvioso, entre ellos el río Toro. Alvarado (1988) realizó entrevistas a personas de Toro Amarillo para calcular el área de las secciones transversales alcanzada por las crecidas relacionadas con este sismo, estimándose tirantes de entre 4 y 9 m con respecto al nivel del río en ese momento.

Dentro de sus principales conclusiones, los estudios del ICE plantearon:

- 1) Que debido a la presencia de terremotos históricos y fallas potencialmente activas y debidamente identificadas, y dado que el período de recurrencia establecido por Alvarado *et al.* (1988) ya se había vencido, existía una alta a muy alta probabilidad de que las obras se vieran afectadas por la sacudida sísmica ($M_w \geq 6,0-6,5$, IMM VIII, aceleraciones de 0,40-0,59 g) durante el período de vida de sus obras, por lo que el diseño debía de contemplar dichas aceleraciones (Climent, 1991; Barquero, 1995, 2000; Barquero & Climent, 2002; Climent *et al.*, 2002; Barquero & Soto, 2003).
- 2) Que la región solía presentar después de los terremotos, deslizamientos y crecidas de los ríos mediante avalanchas, por lo que los estudios ingenieriles debía de contemplar estos fenómenos hidro-geológicos dentro de sus diseños (Alvarado, 1988; Barquero, 1995, 2000; Barquero & Climent, 2002; Barquero & Soto, 2003; Climent *et al.*, 2006; Barquero *et al.*, 2007). Sin embargo, el mayor problema sería evaluar su magnitud (volumen, velocidad y altura o tirante), tal y como fue planteado por Alvarado (1988).

El ICE realizó un estudio de estabilidad de laderas de la cuenca del Sarapiquí con el objetivo de determinar la ubicación de sectores del cañón con potencial de deslizamiento y estimar el volumen de los materiales a deslizarse que podrían llegar a obstruir el cauce y generar una avalancha. Se tomó como modelo el deslizamiento rocoso del río Toro del 16 de junio de 1992 de $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ que generó un represamiento de agua de $300\,000 \text{ m}^3$. Se definieron 3 escenarios por medio de los cuales se realizó el cálculo del volumen de materiales deslizables: 1) $0,17 \times 10^6 \text{ m}^3$, 2) $0,65 \times 10^6 \text{ m}^3$ y 3) $2,56 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Barrantes & Jarquín, 2005; Barrantes, 2006). Dichos estudios fueron la base para el diseño del dique de protección en la Casa de Máquinas a la cuota 419 m s.n.m. (véase resumen en Avilés, 2009).

Cuadro 4.1: Terremotos importantes que han afectado a los macizos del Poás y Barva, y sus efectos.

Terremoto	Fecha y hora	Ms/lo	Muertes	Falla tectónica propuesta	Daños	Deslizamientos/ Crecidas
San Bartolomé de Barba	15-2-1772		?	Alajuela?	?	Crecidas
Fraijanes?	28-3-1851 7:15 a.m.	6,0 VIII	?	Alajuela o Ángel	145 casas afectadas	?
Fraijanes	30-12-1888 4: 12 a.m.	6,0 VII	6	Alajuela o Ángel	3659 casas y edificios dañados. Réplicas hasta el 23-2-1899, y la muerte de 5 personas	Deslizamientos (p.ej. laguna de Fraijanes) y flujos en los ríos Poás, Tambor,, Quebrada Salto y fluentes de La Paz
Toro Amarillo	28-8-1911 10: 06 a.m.	5,8 VII	0	Aguas Zarcas o Carbonera	Casas dañadas	Deslizamientos y crecidas
Sarchí (Bajos del Toro)	6-6-1912 00: 40 a.m.	5,1 VII	17	Aguas Zarcas o Carbonera		Grandes deslizamientos y crecidas que mataron personas
San Mateo (Orotina)	4-3-1924	7,0/IX		Subducción	Una o varias muertes. Daños varios a infraestructura. Deslizamientos	Una réplica disparó una crecida al oeste de Toro Amarillo.
Río Segundo (Bajos del Toro)	01-09-1955	5,5 VII- VIII	0	Aguas Zarcas o Carbonera	Destrucción de casas	Crecidas en correspondencia con el mes lluvioso
Cinchona	08-01-2009	5,9 IX-VIII	23	La Paz	Destrucción de viviendas, puentes, obras energéticas, con 23 muertes y ≥ 7 desaparecidos	Deslizamientos y corrientes de barro

De la imagen de relieve digital y en comprobaciones de campo, se desprende con claridad, que al parecer el río Sarapiquí alguna vez circuló por el actual cauce del río Sardinal, y que en algún momento, en el pasado geológico no muy antiguo, su curso cambió al presente. La causa de por qué el río cambió su curso hacia un nuevo cauce o inclusive el por qué el Sarapiquí cambia su rumbo a la altura de Bajos de Chilamate, permanece todavía como tema abierto de discusión y especulación.

4.3 LOS FLUJOS DE LODO DEL 2009

Los flujos de lodo del 8 y 21 de enero, se pueden describir partiendo de tres aspectos fundamentales: a) iniciación y mecanismo (s) disparador (es), b) transporte y c) sedimentos y su zona de depositación. Sin embargo, dado que lo que usualmente observamos y se preserva por un tiempo, son los sedimentos y la interpretación de estos (mecanismo de transporte, sedimentación, reología), partiremos de este último punto para ir reconstruyendo lo más fehaciente posible los sucesos a partir de las evidencias de campo y laboratorio.

Descripción de los depósitos

El flujo de lodo que afectó la Casa de Máquinas de Cariblanco, fue descrito durante su avance como una pared bien definida de agua, piedras, lodo y troncos de árboles estimada por los observadores de unos 15 m, que avanzaba sobre un río relativamente limpio, emitiendo un cierto vaho o vapor según lo relatan testigos oculares, y en cuyo frente muchos peces saltaban tratando de huir (Fig. 4.2). En otras partes (p.ej. río María Aguilar), las personas describen un fuerte “ventolero” al frente del flujo.

Los levantamientos topográficos realizados por el ICE en el cauce del Sarapiquí a la altura de la Casa de Máquinas de Cariblanco, evidencian que el flujo debió de alcanzar una altura de unos 9,25 m en dicho sector. En las instalaciones del ICE, el flujo alcanzó sobre el terreno circundante, alturas de 4,25-2,10 en la Casa de Máquinas (419 m s.n.m.), 2,40-1,40 m en el Almacén (419,61 m), 0,85-0,15 m en la Bodega de Inflamables (420, 89 m), 2,00-1,10 en el Edificio de Talleres (419,67 m), y 0,75-0,30 m en el Edificio Administrativo (420,35 m).

A la altura del poblado de El Bosque, el frente del flujo poseía un frente de 3-4 m de altura, aunque en algunos lugares cercanos, los lugareños reportan de hasta 7 m. En la estación hidrológica La Virgen, se reporta un tirante de 4,81 m (la media era de 1,61 m), mientras que en Chilamate, por Puerto Viejo de Sarapiquí, se midió 3,31 m (media de 1,4 m) según datos del Área de Hidrología del ICE (S. Laporte, com. escrita, 2009).

El flujo transportó bloques de lava (predominantemente cantos rodados de diverso tamaño) y megaclastos de ignimbritas (densidades 1,46-1,47 g/cm³), estos últimos tan grandes como de 5 x 5 x 2,5 y de 5,5 x 4 x 9 m (90-290 ton), que claramente por su tamaño como de igual modo lo evidencian las fotografías y videos, fueron transportados por rodamiento como parte de la carpeta de fondo del flujo, mientras que con seguridad los clastos de 1-0,5 m de diámetro y menos, fueron transportados como parte del flujo por saltación y suspensión. Los bloques de ignimbrita provienen de afloramientos presentes en el río María Aguilar, pero con su transporte y fragilidad, se fueron fragmentando en tamaños menores, y se les llega a observar a más de 10 km de la fuente de origen.



Fig. 4.2. La corriente de lodo transitando por el río Sarapiquí y las instalaciones en las instalaciones de Casa de Maquinas. Se observan los grandes bloques de ignimbritas de casi 10 m de diámetro transportados como por rodamiento. De igual manera se observa el spray barroso de casi 60 m de altura durante el transporte del flujo (Fotografía de G. Hernández, 13: 45 h del 8 de enero, 2009).

Los suelos in situ en el macizo norte del Poás y Barva, están representados por cenizas recientes (tobas café) sobre tobas color anaranjado hasta amarillento con clastos juveniles (vesiculados y no vesiculados) y líticos pre-existent, muy arcillosa, que suele sobreyacer a lahares y lavas. Mediante el estudio de Chinchilla (2000), los suelos están definidos por los órdenes de los andisoles (*Hapludand*), caracterizados por los altos contenidos de pseudoarcillas (alófanos), los cuales tienen desarrollo edáfico de moderado a avanzado, una alta porosidad, altos contenidos de materia orgánica en los horizontes superficiales. Ocupando principalmente los cañones de los ríos, se encuentran el orden de los entisoles (*Orthent*), caracterizados en cambio por un pobre desarrollo edáfico debido a las fuertes pendientes.

Al momento de su emplazamiento y por una semana, los sedimentos estaban saturados y trixotrópicos, incapaces de soportar a una persona. Las pruebas de caracterización de muestras obtenidas de la matriz de los flujos de lodo, tales como gravedad específica, humedad natural, granulometría y límites de consistencia (límites de Atterberg) evidencia la existencia de materiales esencialmente arenosos. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la mayoría de estos suelos (matriz) se clasifican como SM (arenas limosas), y unos pocos como ML (limos arenosos), GM (gravas con finos limosos) y SP (arenas mal graduadas), todas estas transiciones a SM. Del análisis granulométrico se desprende que entre un 7 y 37% son partículas de gravas, mientras que entre un 34 y un 51% son partículas tamaño arena (Fig. 4.3). La fracción fina varía entre 24 y 52%, con un porcentaje de arcilla de 5-7%. Por otro lado la fracción fina recuperada presenta valores del Límite Líquido entre 48-59%, Índices Plásticos bajos, entre 3-10% y humedades variables entre medias y altas (39 y 85%). Comparando la humedad de estos materiales con los límites de consistencia de la fracción fina (Índice de Liquidez, IL), se obtienen en algunos casos valores cercanos o iguales a la unidad, lo que denota un suelo que se encontraban en un estado casi viscoso, por lo que cualquier perturbación, en este caso el sismo, lo puede hacer colapsar. La situación se agrava si se considera las altas pendientes en que estos materiales se acumulan o se encuentran en la actualidad debido a la erosión, con grandes espesores (superiores a 5 y 10 m) y que al tener una estructura muy porosa, les permite una gran acumulación de agua, lo cual disminuye su resistencia.

Los depósitos del flujo suelen presentar malecones o levees de troncos de árboles, frentes bien definidos de hasta 1,5 m de altura, y subieron contrapendiente con un fuerte poder erosivo y de pulimentar, lo que es indicador de un flujo relativamente viscoso (Figs. 4.4 y 4.5).

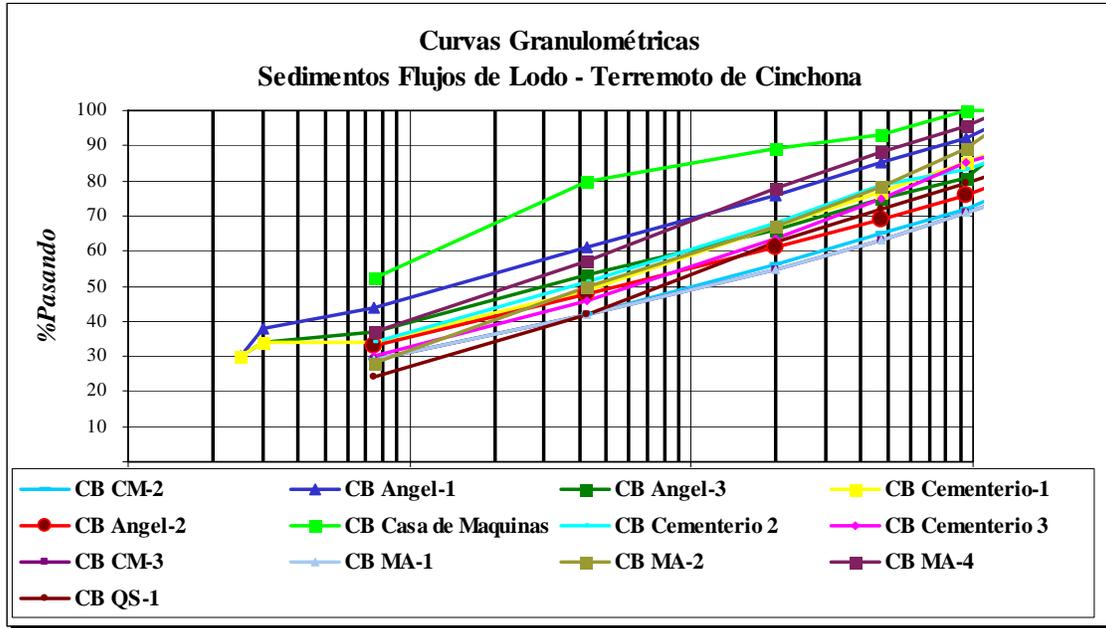


Fig. 4.3: Curvas granulométricas de muestras de la matriz de los flujos de lodo del 8 de enero. CM (Casa de Máquinas), Ángel (río Ángel), MA (río María Aguilar), QS (río Seco), Cementerio (río Sarapiquí cerca del cementerio de San Miguel).



Fig. 4.4: Frente (1-1,5 m de altura) dejado por el flujo de lodo cerca de puente sobre el río Seco (izquierda) y María Aguilar (derecha) camino a Colonia Toro, indicativo de una viscosidad relativamente elevada (Fotografía A. Rodríguez, izquierda y G.E. Alvarado, derecha).

En las partes proximales a medias de los cauces encañonados, los depósitos preservados sobre las pendientes elevadas poseían espesores de 0,1-1 m de espesor, con abundantes evidencias de las marcas dejadas por el flujo (líneas de barro, erosión, pulimento y estriación de las paredes) pero pocas evidencias de colisiones cataclásticas (Figs. 4.6 a 4.8).



Fig. 4.5: Fotografías que muestran los efectos del flujo de barro en el río María Aguilar camino a la Laguna Hule. Se observa en ambas como el flujo dejó un malecón lateral de viscosidad elevada y que se comportó como flujos con longitud de onda larga (megaondas) de unos 200 m. La fotografía de la izquierda es mirando aguas arriba mientras que la de la derecha mirando aguas abajo (Fotografía G.E. Alvarado).



Fig. 4.6: Tronco de árbol con una bien definida línea de barro (*mud line*) indicando el nivel alcanzado por el flujo (derecha) y bloques de ignimbrita (derecha) dejados por el flujo justo en la margen superior del dique de protección (Fotografía de G.E. Alvarado).



Fig. 4.7: Típicas estriaciones dejadas en sedimentos y rocas por el flujo de barro en el río María, margen izquierda Aguilar (Fotografía G.E. Alvarado).



Fig. 4.8: Estructuras de impacto producidas por bloques al contacto con otros clastos de lava (Río Seco a la izquierda y Sarapiquí a la derecha, fotografía, G.E. Alvarado).

Al llegar a sectores más abiertos del pie de monte y a la llanura, los depósitos fueron perdiendo su capacidad de transporte de los gruesos (*gravity segregation*) y estos se depositaron preferencialmente en barras o bermas a modo de enjambres de bloques. Así, los depósitos cambiaron al tipo de llanura de inundación (*floodplain facies*) con una superficie relativamente suave (*smooth flow deposit surface*). En efecto, en los videos de aficionados, tomados en los alrededores de La Virgen, se observa como el flujo no solo transita relativamente lento, sino que posee forma de punta de lanza y es antecedido unos 2-10 m (caso de Lomas de La Virgen) y 1-3 m (caso del restaurante Hacienda Poza Azul) por una pequeña ola ($\leq 0,5$ m de altura) agua relativamente limpia, producto del desplazamiento del agua por la masa más densa del flujo con una altura de la cabeza de 0,5-1 m, cargado de sedimentos y troncos de árboles. Olas similares están descritas en la literatura por Cronin et al. (1999) para lahares en los volcanes Ruapehu (Nueva Zelandia) y Mt. St. Helens (USA), llamadas desplazamientos miscibles. Claramente, se observa como el flujo se va diluyendo lateral y longitudinalmente por incorporación de agua limpia, y con ello transformándose en un flujo hiperconcentrado cargado en troncos, arenas y barros (Figs. 4.9 y 4.10).

En las partes bajas en los alrededores de La Virgen, los depósitos preservados poseen espesores de 0,1-1 m de espesor, con grietas de desecación desarrolladas en las partes más arcillosas, y el depósito suele ser arenáceo con guijarros pero pocos finos, y abundantes evidencias de colisiones cataclásticas en los grandes bloques (Figs. 4.11 y 4.12).

Los flujos asociados con el terremoto de Cinchona poseen las típicas características de una corriente de barro (*mud o muddy flow*), que en la parte montañosa corresponden a un *debris flow*, caracterizado por $\geq 80\%$ de sedimento por peso, $\geq 60\%$ por volumen ($\leq 20\%$ agua), con finos del tipo arcilla del 5-7% por peso, por lo que dentro de la clasificación de los *debris flows* (Scott, 1988a, b), aún con ese bajo contenido de arcilla, se clasificarían como cohesivos. Estos flujos tienen por característica el incrementar el volumen en un factor tan grande como 4 veces y son frecuentes en medios volcánicos con alteración hidrotermal y fuerte meteorización en una región tropical (Scott, 1988a, b; Pierson et al., 1990; Pierson, 1995). En áreas boscosas como la presente, los *debris flows* pueden contener hasta un 20% de árboles (*woody debris*) por volumen (Wilford & Schwab, 1982), hecho comprobado en los flujos de barro acá estudiados.



Fig. 4.9: Vista panorámica de la morfología y tipo de depósitos dejados por la corriente de barro y su retrabajo posterior. Se observa la acumulación de troncos de árboles orientados según la dirección del flujo y reflujos, sectores con sedimentación de “finos”, y los grandes bloques acumulados en enjambres (*coarse channel facies*) en el cauce del río Sarapiquí (Fotografía G.E. Alvarado por la entrada del cementerio de San Miguel).

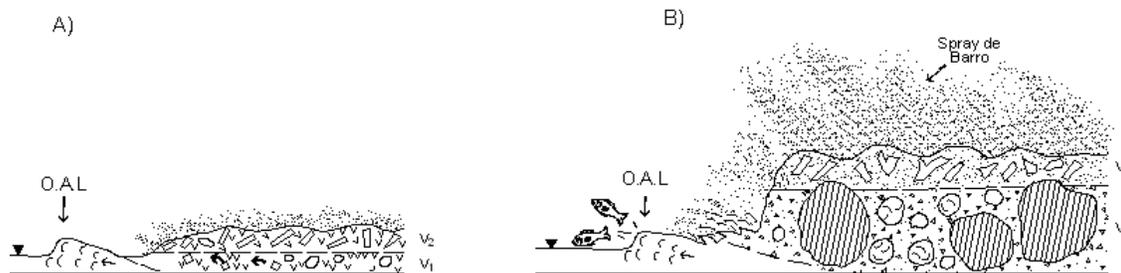


Fig. 4.10: Modelos esquemáticos que muestran al *debris flow* cerca de Casa de Máquinas (B) y su transformación en un flujo más hiperconcentrado cerca de La Virgen de Sarapiquí (A), aguas abajo. Se representan los dos niveles del flujo, uno inferior enriquecido en bloques por rodamiento y saltación (V_1) y otro superior enriquecido en troncos y sedimentos finos con el spray de barro (V_2), así como la ola de agua limpia al frente del flujo (O.A.L.), denominada onda de desplazamiento miscible, debido a la dispersión hidrodinámica y temporal inmiscibilidad.

Dado que se originaron en volcanes activos y dormidos (flancos del Poás, Votos, Von Frantzius, Barva y Congo), se pueden clasificar como lahares (Smith & Fritz, 1989).

Así, una vez que ha pasado el pie de monte, es decir después del puente cerca del cementerio de San Miguel de Sarapiquí, el flujo va perdiendo espesor (tirante) debido no solo a la apertura del cauce fluvial de inundación al llegar a la zona de terrazas y llanura de inundación aluvial, sino también por la incorporación de agua, lo que diluye el flujo transformándolo en un flujo hiperconcentrado, tal como se dijo previamente.

Ya a la altura del plantel del MOPT en Chilamate, el río se abre en varios brazos, disminuyendo significativamente su velocidad, al grado que Puerto Viejo de Sarapiquí no fue afectado.



Fig. 4.11: Delgado manto de arenas (unos 15 cm sobre el suelo y vegetación pre-evento) y de gravas con una cobertura centimétrica de lodo, con grietas de desecación, testigos menores de los grandes flujos hiperconcentrados dejados por el evento del 8 de enero a la altura de Lomas de La Virgen (Fotografías G.E. Alvarado).

El flujo de lodo del 21 de enero, similar en sus aspectos al precedente, tuvo por particularidad que a la distancia se diluyó más por la incorporación de agua, presentando los depósitos a la altura del poblado del Bosque de Sarapiquí, características de un flujo de *debris* hiperconcentrado, debido a la presencia de sedimentos laminados, granulométricamente mejor seleccionados (Fig. 4.12).



Fig. 4.12: Vista panorámica y de detalle de los depósitos dejados por la el flujo del 8 de enero, retrabajados por la crecida del 21 de enero por la madrugada. Obsérvese que los troncos están dispuestos perpendicular al flujo y que los sedimentos son más gravosos y con laminación paralela, típicos de flujos de *debris* hiperconcentrados (Fotografías G.E. Alvarado).

Flujos calientes o fríos?

Varias personas reportaron que los flujos que bajaron por la catarata de El Ángel, venían aparentemente calientes, y de igual modo muchas personas reportaron un vaho levantándose de los flujos y la existencia de troncos quemados en los depósitos. Puesto que no existió ninguna actividad volcánica, no era plausible su relación a menos que se hubiesen roto algunos acuíferos geotermales. Sin embargo, aún esta posibilidad, no explicaría que flujos volumétricamente importantes y procedentes de diferentes sectores, se mantuvieran calientes y mucho menos el quemar los troncos, para lo cual se requieren temperaturas superiores a los 300°C, situación que fácilmente no se puede encontrar en un acuífero geotermal superficial. En los sobrevuelos realizados en helicóptero, no se observaron fumarolas en los sectores deslizados cercanos a los volcanes. Analizando las evidencias fotográficas del flujo durante su transitar por Casa de Máquinas de Cariblanco, efectivamente se deja entrever un spray de color rojizo que se eleva hasta una altura estimada de unos 60-70 m (Figs. 4.2 y 4.10). Dicho spray se puede explicar simplemente por el

levantamiento de una cortina de gotículas de agua contaminadas por sedimentos durante el transitar turbulento y con muchos impactos entre los bloques del flujo. Similar situación pero de menor magnitud, se observa en los videos por La Virgen.

La existencia de supuesta madera quemada en la catarata del Ángel y otros ríos, de igual modo fue investigada (Fig. 4.13). En efecto, por ejemplo en el río María Aguilar se evidenció que entre un 32 y un 38% de troncos, ramas y algunas semillas de color negro emulando carbón vegetal, con su color negro superficial pero no profundo (1 mm espesor). Troncos similares se observaron pero en porcentaje reducido en el río Ángel. Sin embargo, al observarlo con detalle, determinó que no corresponde con madera quemada en el sentido estricto dado que: a) no posee olor a quemado sino un olor azucarado tipo “carao” o similar, procedentes de compuestos aromáticos por putrefacción de la madera, b), las ramas pequeñas no se quiebran fácilmente sino que más bien son flexibles, indicador de que no están efectivamente carbonizadas, c) no tizna la mano como el carbón, d) en algunos sectores se presentan partes internas (fisuras cerradas) negras, en donde no debería de haber llegado la combustión o la temperatura, y e) algunos troncos “lloran” un líquido viscoso de color y olor similar. Se concluye que dichos troncos corresponden con la parte del bosque muerta en diferentes estados de putrefacción, típica de todo bosque tropical lluvioso, en donde parte del dosel arbóreo cae e inicia el proceso, y que por causa del sismo, fueron arrasados junto con el bosque verde.



Fig. 4.13: Troncos seudo-quemados presentes en el río María Aguilar. Corresponden con troncos en estado de putrefacción. Obsérvese en la fotografía de la derecha, como el tronco “llora” aún líquidos varias semanas después. Además, no todos los troncos son negros (Fotografía G.E. Alvarado).

Análisis de los acelerogramas

A la altura de la Casa de Máquinas de Cariblanco, la estación acelerográfica ubicada en el edificio administrativo registró el evento de la avalancha con toda claridad pese a que fue inundado el lugar en donde se encontraba ubicado por 0,3 m de lodo o menos. El equipo y sus valiosos registros (tanto del terremoto como del flujo) fueron preservados dado que el instrumento es hermético. Los registros indican que la parte fuerte del flujo fue registrado de manera significativa por espacio de por lo menos 9 minutos, pese a que debió de continuar por varios minutos (unos 6 o más?), aunque ya el registro no es confiable. El flujo principal con base en el acelerograma, puede ser dividido en tres fases: a) La más fuerte por espacio de casi 1 minuto (41-57 s) entre las 1: 47 y 1: 48 p.m., que acorde con los videos y fotografías corresponde con el impacto y flujo principal con las instalaciones de la Casa de Máquinas, con una aceleración pico de $25,64 \text{ cm/s}^2$, pero en general se mantuvo en $16-19 \text{ cm/s}^2$, b) la segunda fuerte de unos 2,3 minutos (133-155 s) correspondiendo con las oleadas y el refluo observado entre las 1: 47:56' y 1: 48: 39' h con aceleraciones pico de $13,94 \text{ cm/s}^2$, y finalmente c) la cola que se extendió igualmente por lo menos por 5 minutos desde la 1: 48: 39' hasta casi las 1: 53: 30' h con aceleraciones normalmente bajo los $10,79 \text{ cm/s}^2$. Claramente, el flujo debió de continuar por varios minutos o decenas de minutos, pero con un nivel más bajo y transportando fragmentos menores.

Los espectros de Fourier muestran dos picos en la frecuencia (Fig. 4.14): a los 7-8 y a los 37 Hz, al parecer en correspondencia con la respuesta natural del suelo (7-8 Hz) y de una frecuencia mayor de causa desconocida pero no relacionada con el flujo. Los flujos han de contener sus frecuencias en un rango amplio en un plateau entre los 7 y los 37 Hz. Los lahares en volcán Colima poseen picos frecuencias entre 6,3 y 7,6 Hz, en donde la mayor parte de la energía

es interpretada como producto del transporte de la carga de fondo del lahar (Zobin et al., 2008), pero igualmente podrían ser una respuesta natural del suelo. Más investigación es requerida.

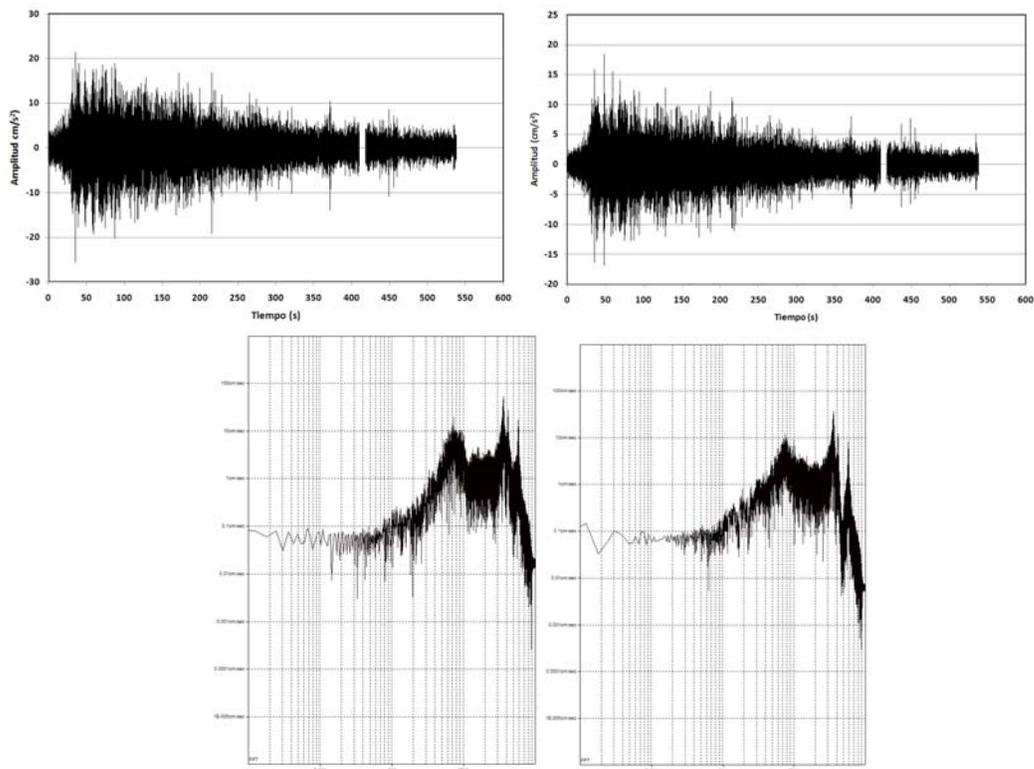


Fig. 4.14: Las señales acelerográficas (arriba) y sus respectivos espectros de Fourier (abajo) registradas en el acelerógrafo localizado en el edificio administrativo de la Casa de Máquinas de Cariblanco, que sobrevivió pese a ser cubierto de lodo. A la izquierda la componente N-S y a la derecha la E-W. El pico a los 59 Hz es producto de una inducción eléctrica.

Velocidades estimadas

La velocidad de los flujos de lodo se puede estimar mediante 3 métodos distintos:

- a) videos y fotografías con cronómetro de tiempo incluido (hora, minutos y segundos), y correlacionados (p.ej. video tomado por Vinicio Herrera Araya y las fotos por Gustavo Hernández), teniendo por ejemplo algunos puntos de referencia y los planos de la Casa de Máquinas. También, se entrevistaron a las personas para anotar sus percepciones temporales. En otros videos de los aficionados (Cuadro 4.2), se estimó la distancia entre un punto y otro del cauce del río Sarapiquí, para lo cual se entrevistó a quienes lo tomaron dado que muchos puntos de referencia en los videos cambiaron con el transitar del flujo y parte de las tomas no se parecen al estado actual del cauce.
- b) altura del flujo ascendiendo contra pendiente o diferencias de nivel del tirante en ambas márgenes en sectores curvados de los ríos, siguiendo las metodologías de Chow (1959).
- c) mediante la estimación de la longitud de onda de las antidunas (cf. Simons & Richardson, 1963).

Cuadro 4.2: Altura de los tirantes del flujo estimadas en diversos sectores.

Lugar	Altura del tirante (m)
Puente sobre el río Seco	30-35
Puente sobre el Río Ángel	17-35
Puente María Aguilar, camino Laguna Hule	2-16
Casa de Máquinas, Río Sarapiquí	12
Por Cementerio San Miguel	6-7
Barrio El Bosque, Las Lomas de La Virgen	3-4
Puente La Virgen (estación 12-22)	4,81
Bajos de Chilamate (Estación 12-25)	3,31

Se dice que aproximadamente unos 15 minutos después del terremoto, pasaron las “cabezas de agua” por el puente sobre el río Ángel y del Sarapiquí a la altura de la Cuesta Ángel. El arribo del frente de la crecida sobre el río Sarapiquí se reportó en Casa de Máquinas de Cariblanco se reportó aproximadamente las 1: 46’ 25” h, es decir 25 minutos después del terremoto, a una distancia de unos 8-10 km de las áreas más afectadas, particularmente cerca de Cinchona y volcán Congo. Ello nos trae una velocidad promedio de al menos 19,2-24 km/h. El flujo fue observado desde Casa de Máquinas, ubicada en el pie de monte y donde ya existe un cambio hidráulico en el río, impactando y arrasando a una isla fluvial a las 1: 46: 44’. La Casa de Máquinas debió de ser alcanzada aproximadamente a la 1: 47 p.m. y finalmente el flujo impactó al entubamiento de la quebrada Marín a las 1: 47: 24’. Esto nos da una velocidad de entre 17,5 y 22,5 km/h. Velocidades similares se obtienen a la hora de estimar la longitud de onda de las antidunas en la parte central del flujo.

La velocidad estimada del flujo a lo largo de las instalaciones de Casa de Máquinas y alrededores se estimó entre 6,1 y 11,7 km/h, siendo la velocidad más precisa la de 9,6 km/h, con el uso del video y las fotografías. Claramente se nota un decaimiento en la velocidad debido a ser un flujo lateral y al haber tenido que saltar el dique de protección. En efecto, el dique de contención al pie de la Casa de Maquinas promovió a que el *debris flow* sufriera al impactar un cambio o salto hidráulico, marcando una transición de un flujo turbulento supercrítico a un flujo turbulento subcrítico, dando como resultado una relativa tranquilidad (*tranquil flow*) en el transitar del flujo hacia la obra sin provocar ningún daño estructural, tan solo electro-mecánico debido a la sedimentación y los impactos de los troncos de árboles sobre la maquinaria.

El flujo debió de tener en las instalaciones un número de Froude de 0,48-0,84 típico de un flujo subcrítico, pero previo a su arribo, a la salida de la garganta del Sarapiquí, debió de haber tenido un número de Froude superior a la unidad, típico de flujos supercríticos, particularmente en la parte central del flujo (Fig. 4.15).

Se utilizaron 5 videos de aficionados tomados en el río Sarapiquí en (Cuadro 4.3): a) Casa de Máquinas de Cariblanco, b) el mirador de la Hacienda Pozo Azul por La Virgen, c) Terraza Restaurante Hacienda Pozo Azul, d) Puente Colgante de Tirimbina, y e) Bajos de Chilamate, tres de ellos fueron puestos por un tiempo en la página web “youtube”. Mediante entrevistas a las personas involucradas en sus tomas, medidas en el campo de puntos de referencia y su comparación con el cronómetro (tiempo en segundos), se permitieron hacer estimaciones sobre las velocidades in situ en cada lugar.



Fig. 4.15. El flujo transitando por la Casa de Máquinas y otras instalaciones de Cariblanco. Se observa en el cauce del río las antidunas (régimen supercrítico) y la parte tranquila del flujo (subcrítico), así como las oleadas en la puerta principal de la Casa de Máquinas (Fotografía de G. Hernández, a las 13: 47 h del 8 de enero, 2009).

Cuadro 4.3: Principales videos utilizados en el presente trabajo para obtener datos sobre el flujo del 8 de enero y sus velocidades.

Lugar	Cortesía	Duración	Aspectos generales
Casa de Máquinas de Cariblanco	Vinicio Herrera	04':03''	Tomado desde el camino de acceso de la Casa de Máquinas de Cariblanco. Se aprecia el frente del flujo y sus efectos sobre las obras.
Lomas, 8,5 km al sur de San Miguel o 2,9 km al sur de la iglesia católica de La Virgen	Gabriel Carvajal Gonzáles (27611545, 83464885)	6':15''	Se observa el flujo venir a la distancia y las aves así como el ganado huyendo, para finalmente perecer 34 de 37 cabezas de ganado.
Terraza Restaurante Hacienda Pozo Azul	Esteban Corrales Rodríguez	3':15''	Se observa un cable y las aves escapar.
Puente Colgante de Tirimbina, 1,8 km norte de cementerio de La Virgen.	Ronald Hernández Pereira (88358919, 27611111, 27111160)	18':05''	Se observa como un frente bajo del flujo cargado de troncos, muy enriquecido en agua, transitar por un brazo del río (isla) en donde se describe el olor a barro y una vaca siendo acarreada.
Aventuras Sarapiquí, a 1,3 km al este de Chilamate	Ryan Gillum (2766-6768)	4'35''	Video editado en donde se observa la lenta llegada del flujo y sus efectos sobre los peces y varias tomas del día siguiente.

Para determinar las velocidades promedio también se utilizaron las localizaciones y los tiempos de arribo de las máximas crecidas a las estaciones pluviográficas del ICE que sobrevivieron a los flujos del 8 de enero, teniendo como tiempo origen el de Casa de Máquinas (13: 47 h): Puente la Virgen (estación 12-22) a las 14:25 h y Bajos de Chilamate (estación 12-25) a las 15: 05 h (Cuadro 4.4). El flujo llegó a las Lomas a las 14: 05 h.

En el río Seco se observó un impresionante flujo de lodo en el punto donde discurre por el puente que comunicaba Colonia Toro con Bajos del Toro (Fig. 4.16). El flujo provino de una serie de deslizamiento de las paredes internas “cratéricas” del Congo, a una distancia de 3 km y al parecer unos 5 minutos después del terremoto se escuchó un gran ruido (descrito como el de un avión despegando por el personal del Campamento de Toro 3, Colonia del Toro) y del Congo se levantaba un poco de “polvo” (*spray?*). Aproximadamente unos 5 minutos adicionales se le observó pasar tempestivamente arrasando el puente sobre el río Seco bajo la forma de una corriente de lodo. El cauce era de unos 20-40 m de ancho por unos 5 de profundidad, pero ahora quedó algo más ancho y más profundo, aunque no se dispone de datos comparativos por el momento. La duración del flujo de lodo y su recorrido nos trae una velocidad promedio de 36 km/h si tomamos unos 10 minutos de tiempo. Sin embargo, al calcular el rebase de la avalancha y sus diferencias de elevación, se determinaron velocidades entre de 19,5 y 29,5, para un promedio de 24,9 km/h.

Se dice que dichas velocidades suelen ser aproximadamente un 15% inferiores a las medidas en casos reales, lo que nos traería una velocidad máxima de casi 34 km/h, muy similar a la estimada en duración, lo cual nos parecer un dato bastante cercano a la realidad.



Fig. 4.16: El río Seco mirando aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha). Se observa la altura alcanzada por el tirante de barro y su forma de megaonda (Fotografía G.E. Alvarado).

El María Aguilar está formado por la confluencia de dos quebradas, una que nace en el interior del cráter derruido del Congo y otra que bordea al volcán, y del mismo modo, los flujos que bajaron por ella ampliaron su cauce. Otros flujos de lodo menores pero igualmente energéticos, fueron observados y filmados (E. Garita y É. Loaiza, com. escrita, 2009).

El flujo de lodo que bajó por el río Ángel el 21 de enero, aunque posiblemente de elevada velocidad inicial y energía, después se diluyó por la incorporación de agua de los afluentes y muy probablemente su velocidad disminuyó. De hecho entre el puente arrasado sobre el Ángel (aprox. 4: 30 ó 5: 00 a.m.) y el poblado El Bosque (aprox. 9: 30 a.m.), el flujo dilató entre 4,5 y 5 horas para recorrer una distancia aproximada de 14 km.

Como vemos, con toda certeza el flujo debió de tener velocidades de unos 25 km/h en general, aunque debieron de ser significativamente más altas en la cuencas superiores donde las pendientes son mayores, pudiendo alcanzar velocidades de entre los 40 y los 50 km/h, y más bajas en la llanura de inundación y terrazas del orden de 8-12 km/h en incluso menos en Puerto Viejo de Sarapiquí (Cuadro 4.4).

Estas velocidades son comunes en los diferentes *debris flows* históricos a nivel mundial, en donde sus velocidades suelen ser de 5-15 m/s (18-54 km/h), siendo común las de 40 m/s (144 km/h) para los grandes eventos, con un máximo reportado de 72 m/s (260 km/h) según la literatura especializada (Scott, 1988a, b; Pierson *et al.*, 1990; Pierson, 1995; y referencias en ellos citados).

Cuadro 4.4: Velocidades del flujo de lodo del 8 de enero estimadas en diversos sectores.

Lugar	Velocidad promedio m/s * (km/h)	Velocidad estimada in situ m/s (km/h)
Puente sobre río Ángel	6,66 (24,0)	13,3 (48,0)
Puente María Aguilar, camino Laguna Hule		6,2-7,6 (22,5-27,6)
Puente sobre el río Seco	10 (36,0)	5,4-8,19: 6,9 (19,5-29,5: 24,9)
Casa de Máquinas Cariblanco, Río Sarapiquí	5,3-6,6 (19,2-24,0)	4,8-6,2 (17,5-22,5)
Flujo a través de la Casa de Máquinas de Cariblanco y otras instalaciones	-	1,6-3,2 (6,1-11,7)
Lomas (2,9 km al sur del restaurante Hacienda Pozo Azul)	6,59 (23,72)	5,7-8,4 (20,5-30,4)
Restaurante Hacienda Pozo Azul		7,1-10,0 (25,7-36,0)
Puente Colgante Tirimbina		6,6-9,7 (23,9-35,1)
Bajo de Chilamate	2,5 (9,0)	
Chilamate		2-3 (7,2-10,8)
Flujo de lodo del 21 de enero	0,7-0,8 (2,8-3,1)	

Cálculo del volumen y caudal

El cauce del Sarapiquí y sus tributarios, así como el río Seco, tributario del Toro, se ensancharon y profundizaron en varios sectores, indicando que erosionaron y tomaron parte de los sedimentos de su lecho fluvial, aunado al regolito y árboles de su cauce durante su crecida al exceder su tirante normal de agua.

La estimación del caudal, volumen del flujo y sus sedimentos depositados es crucial para la comparación de eventos y para una concepción de su magnitud como evento hidrogeológico. Sin embargo, en el presente caso resulta en extremo difícil al día de hoy dado que a) muchos sectores son topográficamente de difícil acceso, b) el peligro siempre presente de nuevas avenidas, c) la constante erosión y redepositación de nuevos eventos de magnitudes menores, d) lo difícil de tener un estimado del espesor de sedimentos, e) gran parte de las estaciones hidrológicas fueron destruidas y f) otros trabajos fueron considerados prioritarios ante la emergencia, por lo que mejores estimaciones y medidas no se obtendrán hasta dentro de unos meses.

Claramente, el flujo estuvo constituido por dos fases principales: a) agua y b) sedimentos (rocas, finos, troncos de árboles, y objetos culturales (puentes, vehículos, ganado, etc.). Gran parte del agua y los sedimentos finos fueron a parar a la confluencia del Sarapiquí con el Puerto Viejo.

En tan solo dos lugares los flujos no destruyeron las estaciones hidrológicas y se pudieron allí medir los tirantes y con ello hacer una estimación grosera y preliminar del caudal: La Virgen con $442 \text{ m}^3/\text{s}$ y Bajos de Chilamate con $533 \text{ m}^3/\text{s}$ (S. Laporte, com. escrita, 2009).

De los registros acelerográficos en Casa de Máquinas vimos que el flujo de lodo tuvo su mayor fase por espacio de 9 minutos, y puesto que tenemos una sección del cauce y su velocidad, se puede estimar no solo el caudal sino también el volumen de sedimentos transportados en ese lapso. Teniendo un cauce con un ancho de 75 m, un tirante de 12 m, y una velocidad estimada entre $4,86 \text{ m/s}$ (mínima) y $6,66 \text{ m/s}$ (máxima), tendríamos un caudal de entre 4374 y $5994 \text{ m}^3/\text{s}$. Puesto que el evento se extendió por al menos 9 minutos, entonces el volumen de sedimentos groseramente se puede estimar entre $2,36$ y $3,23 \times 10^6 \text{ m}^3$. Si a ello le agregamos los 6 minutos que restantes de fase tranquila y de posible menor velocidad y tirante, se le podrían agregar un mínimo de unos $200\,000 \text{ m}^3$ de sedimentos saturados, para un volumen de $2,46\text{-}3,43 \times 10^6 \text{ m}^3$. En Casa de Máquinas y alrededores, sobre el dique de protección, en algún momento antes del retrodrenaje o retirada, el flujo debió de alcanzar un volumen total en las instalaciones de al menos 4600 m^3 .

Al volumen anterior, todavía debe de agregársele el volumen de sedimentos transportado por el río Seco (procedente del volcán Congo) y el río Mastate y la quebrada Tigre (procedentes del volcán Votos), que al confluir se llaman río Poasito, todos ellos de difícil estimación. Puesto que los flujos se originaron a unos 2000 m de elevación y se detectaron a la altura del puente cerca del cementerio de San Miguel todavía como facies de debris flow con un tirante importante, el coeficiente de fricción aparente (*fahrböschung*) sería de 0,09 y de 0,06 para los flujos de *debris* y los hiperconcentrados, respectivamente. Si utilizáramos esta información con base en las relaciones obtenidas por Devoli et al. (2009), este volumen de 10^6 m^3 sería el mínimo pero podría ser tan alto como dos órdenes de magnitud más.

Las descargas pico del Sarapiquí para este evento se encuentran dentro de los rangos para otros eventos históricos a nivel mundial que suelen estar entre 71 y $48\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Scott, 1988a, b; Pierson, et al., 1990; Pierson, 1995, y referencias citadas en ellos).

El mecanismo disparador y de transporte

Claramente, el mecanismo disparador fue el evento sísmico que con su sacudida, desestabilizó los terrenos volcánicos en un medio tropical lluvioso, rico en suelos volcánicos tanto antiguos como recientes, y laderas de fuerte pendiente, incluso verticales.

Sin embargo, una pregunta particularmente surge entre los diferentes observadores y profesionales, y es: ¿De dónde provenía tal cantidad de agua de estos flujos? La respuesta más común es pensar en la existencia de taponamientos o represamientos, incluyendo algunos presumiblemente provenientes de deslizamientos durante el sismo premonitor (7 de enero, $M=4,7$). Sin embargo, varios aspectos apuntan a que esta no es el mejor modelo que se ajuste y explique lo observado:

- a) No todos los ríos bajaron de manera evidente el caudal de los ríos producto de un eventual represamiento (por ej. Sarapiquí), puesto que las personas ni los guías de turismo de aventura (p.ej. *rafting*, *canopy*, etc.) no reportaron ni deslizamientos de importancia ni un decrecimiento en el caudal. Tan solo se reporta un descenso del caudal en el río Toro, justo en donde los deslizamientos fueron menores.
- b) Aunque sismos con magnitudes de este orden ($M\ 3,7\text{-}4,7$), suelen disparar deslizamientos menores, estos suelen ser muy pequeños.

- c) Las crecidas acontecieron pocos minutos después del sismo principal (entre 5 y 15 minutos), por lo que un represamiento y su ruptura no da tiempo suficiente para formar un embalse natural importante con su rompimiento en un lapso tan corto.
- d) Las tomas de agua de Recreo Verde (Marsella), una fría y tres calientes, aumentaron su caudal después del terremoto.
- e) Los sondeos de los acuíferos libres y confinados en Casa de Máquinas, acueducto de Marsella se abatieron en promedio 1,5 m después del terremoto.
- f) Existe una idea muy arraigada dentro de la población e incluso el gremio profesional (ingenieril y geológico) de que los represamientos producto de deslizamientos son los responsables de casi todas las crecidas. Aunque no se excluye esta posibilidad, muchos casos nos indican que son las fuertes lluvias y/o los repentinos deslizamientos saturados sobre los ríos, los que disparan las avalanchas de agua y escombros, tal y como se demostró en el caso del Irazú, contra la opinión popular muy arraigada (ver Alvarado & Schimcke, 1994), y en muchos otros casos históricos más recientes como los deslizamientos de Arancibia (Alvarado *et al.*, 2004) o de Orosi.

La explicación más plausible sería que:

- a) El sismo disparó en regiones con pendientes superiores a los 26° e incluso verticales, una gran cantidad de deslizamientos regolíticos y de tobas constituidos por suelos volcánicos antiguos (enriquecidos en arcillas con meteorización y alteración hidrotermal) que poseían cierto grado de saturación, aunado a la cobertura vegetal y húmica, pero relativamente con pocas rocas (Fig. 4.17). En efecto, la información suministrada por el meteorólogo del ICE, el Ing. Sadí Laporte, indican que en noviembre y diciembre llovió en esa región por encima del promedio, aunque previo al evento se presentó una época seca. Estos suelos en parte saturados, con presiones intersticiales de importancia, se traducen en cierta medida en suelos trixotrópicos. El comportamiento dinámico de estos suelos volcánicos, al poseer valores de límites líquidos sobre 100 y humedades similares, implican que los valores del índice de liquidez sean cercanos a la unidad con resistencia al corte prácticamente nula, lo que combinado con una reducción de las características mecánicas bajo condiciones dinámicas, producen que los limos se comporten como un flujo viscoso (ver Laporte, 2009).
- b) Durante su caída, el espesor del deslizamiento se adelgazó con la distancia, una condición crítica y fundamental para pasar de un deslizamiento normal a un flujo (Ellen & Fleming, 1987).
- c) Estos deslizamientos al momento de la sacudida sísmica cayeron desde alturas de 200-300 m (caso del río Sarapiquí) o inclusive 500-600 m (caso del volcán Congo) sobre los ríos y quebradas, con una velocidad de llegada estimada desde su punto de inicio hasta el cauce (estimada en unos 15 m/s con base en eventos similares) con cierta cantidad de agua previa (humedad en el suelo y agua libre en las rocas), favoreciendo la rápida mezcla de agua fluvial con detritos (rocosos y orgánicos).
- d) La energía cinética de los deslizamientos junto con su dilución en agua, favoreció su movilidad. Es necesario tan solo un 20% de agua o incluso menos, para que un sedimento cargado en arcillas y limos así como detritos orgánicos, pueda convertirse sin ningún problema en un flujo, pudiendo alcanzar velocidades moderadas a elevadas.

Algunas personas reportaron “gran cantidad de agua que brotaban de las paredes de los cañones”, sin embargo, debe de evaluarse en qué grado pudo aportar estas aguas subterráneas a las corrientes de barro debido a:

- a) La transmisibilidad del agua es lenta en los acuíferos, sin embargo, si se pudo liberar agua de acuíferos confinados (lavas fracturadas y acuitardos) y deslizados, que quedaron descompresionados en unos pocos segundos, favorecidos por el efecto de la onda sísmica compresional. Pese a ello, su aporte aún así, tiene que ser evaluado y justificado con referencias bibliográficas.

- b) Claramente, los deslizamientos dejaron los acuíferos descubiertos y cauces colgados, por lo que los “lloraderos” de agua en las rocas de las cicatrices deslizadas daban la apariencia de una gran cantidad de agua corriendo por las elevadas pendientes.
- c) Resulta difícil explicar una cantidad significativa de agua aportada por las rocas en las pendientes escarpadas y superiores del volcán Congo, con cuencas de recepción sumamente reducidas para un sector que, sin embargo, aportó el impresionante flujo del río Seco. Por ello, una combinación de varios factores (suelos saturados, colapso y descompresión de acuíferos y aguas de los ríos), aunado a la energía cinética que favorecía la mezcla, sería la mejor explicación.



Fig. 4.17. Típicos deslizamientos regolíticos (superficiales), que dispararon en buena medida los flujos de barro: Volcanes Congo (izquierda) y Von Frantzius (derecha). Fotografías G.E. Alvarado.

Aspectos generales sobre los efectos

Los efectos de los flujos de lodo se pueden resumir en: a) destrucción de los puentes sobre los ríos: Seco, María Aguilar, Ángel, La Paz y dos en el Sarapiquí, b) muerte de al menos unas 40 cabezas de ganado y toda la fauna fluvial, así como la destrucción de pastizales, c) afectación a equipos electromecánicos y otros, particularmente a la Planta Cariblanco y toma María Aguilar, y d) afectación de la parte superior (cresta) de la presa del Sarapiquí.

La existencia de dique en la Casa de Máquinas, previno a que la carga de fondo del flujo afectara la estructura de la obra, dado que sin él habría sido arrasada. Otro efecto fue el que al llegar el flujo justo a Casa de Máquinas, se da una apertura hacia un valle más abierto. En efecto, del cuadro 4.5 se desprende que las instalaciones de la Casa de Máquinas de Cariblanco y edificios vecinos, estaban bien diseñadas y que quizás la velocidad del flujo debió de ser inferior a los 2 m/s durante su recorrido por las obras (Fig. 4.18).

La presa sobre el Sarapiquí fue afectada por la erosión parcial de su cresta y el llenado de sedimentos en el embalse, pero soportó muy bien el embate sísmico y del flujo (Fig. 4.19).

De igual modo, se nota a otra escala, como una caseta de *blocks* cerca de un andarivel sobrevivió en cierto modo a la empalizada de árboles transportado por el flujo pero claramente y de igual modo, la terraza aluvial inferior impidió que el río transportada los bloques de la carga de fondo. El nivel del agua en la caseta fue de un metro aproximadamente (Fig. 5.20).

Una crecida sobre el río Ángel arrasó un puente provisional para no mantener incomunicadas a las personas y sus productos, aspecto que generó mucha controversia en la prensa y algunas personas fuera del área mesosísmica (Fig. 4.20).

Cuadro 4.5: Comparación modificada entre las condiciones de inundación y daños en Masonry (EE.UU., Penning-Roswell et al., 1992) y Suiza (Wieland & Mueller, 2009) versus las instalaciones de Casa de Máquinas de Cariblanco.

Velocidad (m/s)	Velocidad x profundidad (m ² /s)	Resultado
< 1	≤ 0,5 (h ≤ 0,5 m)	Solo daños menores por inundación
0,5-0,9	1 ≥ v x h > 0,5 (1 ≥ h > 0,5 m)	Daño moderado por inundación, particularmente para vehículos y personas acampando
1-1,9	2 ≥ v x h > 1 (2 ≥ h > 1 m)	Daño intermedio por inundación para vehículos, personas dentro de edificios y acampando
1-1,9	3 ≥ v x h > 2 (h > 2 m)	Daño elevado inclusive dentro de edificios, trenes y autobuses.
> 2	3-7 (3,5 m ≥ h > 1,5 m)	Falla parcial
> 2	> 7 (7 m ≥ h > 1,5 m)	Colapso estructural
1,69-2,6 (3,2)	≥ 1,69-6,75 m ² /s (4 m ≥ h ≥ 1 m)	<i>Solo daño por inundación en C.M. Cariblanco y obras vecinas</i>



Fig. 4.18: Efectos despreciables de los flujos de barro sobre la infraestructura pero considerable en los equipos electromecánicos de la Casa de Máquinas de Cariblanco y edificios aledaños (Fotografías G.J. Soto, arriba; y archivos ICE, abajo).



Fig. 4.19: Efectos relativamente menores de los flujos de barro sobre la presa del Sarapiquí (Fotografía E. Campos).



Fig. 4.20: A la izquierda se pueden observar los efectos dejados por el flujo del 8 de enero el caseta del moto de un andarivel y las retorceduras de los postes de acero. La casetilla sobrevivió pero debe de ser demolida. A la derecha, el Puente “Bailey” arrasado unos 75 m por el flujo del río Ángel del 21 de enero de 2009 (Fotografía G.E. Alvarado, 22 de enero, 2009).

4.4 DISCUSIÓN

En la literatura especializada, existen gran cantidad de referencias a nivel mundial (p.ej. Keefer & Wilson, 1989) e inclusive a nivel centroamericano (Bommer & Rodríguez, 2002; Rodríguez, 2007; Devoli *et al.*, 2009) y costarricense (Mora & Morales, 1986, 1992; Mora & Mora, 1994), en donde se establecen las relaciones entre la magnitud de los sismos, el área afectada, el área deslizada, y la generación de corrientes de barro, entre otras cosas. En Costa Rica, los deslizamientos y corrientes de lodo importantes se han generado a partir de sismos con magnitudes > 5,2 (Mora & Mora, 1994). Según dicho trabajo, los deslizamientos disparados por sismos con IMM VII pueden ocasionar que en un área de 90 km² aparezcan al menos un deslizamiento por km² (área de la destrucción de alrededor del 60%).

Para una magnitud de 6,2 como la del terremoto de Cinchona, el área afectada > 60% según las relaciones de Mora & Mora (1994) sería de unos 200 km². Esta área es coincidente con los datos preliminares aportados por la RSN, para un total al menos 349 deslizamientos de diversos tañamos, contabilizando un área total de 21,7 km² de deslizamientos en total (Fig. 4.1).

Los flujos de lodo asociados con el terremoto de Cinchona, estaban contemplados por los profesionales del Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica del ICE dentro de los eventos en extremo probables de ocurrir, inclusive durante el período de vida de la obra. Lo que sí era difícil de prever era su magnitud aunque se podría estimar con base en los trabajos previamente citados. Ahora está en claro que deslizamientos y avenidas recientes asociados o no con terremotos, son más frecuentes de lo que se esperaría, y que por lo tanto deben de ser considerados y adecuadamente evaluados dentro de los estudios de peligros geológicos.

Estos flujos nos dejan como enseñanza adicional, la explicación de por qué los cauces de ciertos ríos con poco caudal (inclusive con el atributo de “Seco”), suelen ser profundos y encañonados, indicadores de la fuerte erosión vertical durante eventos “fortuitos” de *debris flows* en el pasado geológico reciente. De igual modo, tal y como se reportó para el Irazú, los eventos suelen no preservarse o sus espesores son profundamente reducidos debido a erosión posterior y a la compactación, dando una falsa estimación (subestimación o no consideración) de la magnitud de los eventos en sí cuando son evaluados en el registro geológico prehistórico.

Para futuros análisis, se recomienda seguir no solo los aspectos acá contemplados, sino seguir en buena parte las pautas dadas por Wieland & Mueller (2009).

Las cuencas del Sarapiquí, quedó alterada dada su el gran número de deslizamientos que cayeron sobre el cauce principal, muchos otros todavía inestables, y los sedimentos que todavía existen sobre las laderas, claramente visibles en sobrevuelos. Aunado a ello, en esta cuenca se tiene gran cantidad de sedimentos aportados durante la reconstrucción de la carretera Varablanca-Cariblanco. Debido a lo anterior, tal y como lo han manifestado varios geólogos e hidrólogos, durante el inicio de la estación lluviosa existe el peligro de nuevos flujos de lodo, aunque con probabilidad no van a alcanzar la magnitud del flujo del 8 de enero. Deberá de evaluarse sobre cuál sería la mejor solución, si permitir la explotación de los sedimentos y troncos extra depositados, o dejar su estabilización de manera natural. La cuenca como tal y como se indicó, quedó en condición alterada y tardará en recuperarse varios años.

De igual modo, otras cuencas en terrenos volcánicos con fallamiento potencialmente activo, como la de los ríos Reventazón, Toro, Peñas Blancas y San Lorenzo, entre muchas otras, merecen la realización de estudios especializados de estabilidad de taludes y potencial de generación de flujos de barro. Los estudios de amenazas naturales multidisciplinarios de las cuencas como un todo, son una necesidad imperante antes y durante las investigaciones de grandes proyectos de infraestructura (energética, industria y civil), y líneas vitales.

Finalmente, merece llamar la atención a las autoridades de la CNE y municipales, que la ciudad de Aguas Zarcas está fundada sobre el gran abanico de deyección del río del mismo nombre, en donde se observan claramente diferentes frentes de lenguas de abanicos aluviales, con diferentes grados de preservación y de meteorización, indicativo de eventos de *debris flows* de épocas prehistóricas hasta no muy antiguos, con gran probabilidad disparados por eventos telúricos similares, pero en este caso asociados con la falla Aguas Zarcas. El gran desarrollo habitacional en

dicha ciudad merece una revisión y estudios preventorios, para que no se repita la historia, pero esta vez en un sector altamente poblado.

Reconocimientos

Un particular agradecimiento al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), en particular la ayuda espontánea y desinteresada ofrecida por el personal del Centro de Producción Cariblanco, particularmente a Víctor Martínez Angulo, Gustavo Hernández Carvajal, así como diversas personas allí involucradas. Los geólogos Albán Rodríguez y Edwin Garita colaboraron con material fotográfico, fílmico y experiencias propias del terremoto. El video del Sr. Vinicio Herrera en el preciso momento del flujo de lodo, ayudó a estimar mejor los tiempos al cotejar las fotos y sus tiempos suministradas por Gustavo Hernández. Otros videos tomados y/o cordialmente aportados por Gabriel Carvajal González, Ronald Hernández Pereira, Esteban Corrales Rodríguez, Johana Argüello M. y Ryan Gillum, igualmente se utilizaron para comprender mejor los mecanismos del flujo y estimar las velocidades. La información hidrológica suministrada por Sadí Laporte (Centro de Servicios de Estudios Básicos de Ingeniería), así como información sobre los niveles de la avalancha en Casa de Máquinas de Cariblanco realizados por el Área de Topográfica fue igualmente incorporada. Los estudios de los sedimentos de la matriz del flujo fueron realizados por el Laboratorio Geotécnico del ICE, agradeciéndose en particular a los técnicos Antonio Torres y Fernando Quesada. Álvaro Climent y José M. Barrantes aportaron los valiosos datos del registro acelerográfico del flujo de lodo. Los comentarios y colaboración de Rafael Barquero, Erick Campos, Gerardo Soto y Alberto Vargas, fueron oportunos. El sobrevuelo en helicóptero fue posible a la ayuda de Luis Fernando Sáenz.

Los asistentes R. Torres, M.E. Torres, R. Sánchez, A.E. Vargas, K. Thiele, D. Madrigal y R. Espinoza fueron de gran ayuda.

Las discusiones e intercambio de información con el Dr. Thomas Pierson, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, fueron muy valiosas.

CAPÍTULO V

OBSERVACIONES GEOTÉCNICAS, TERREMOTO DE CINCHONA

Rolando Mora

Mora, R. 2009: Observaciones geotécnicas terremoto de Cinchona, 2009. En: Barquero, R. (Ed.): El terremoto de Cinchona, 8 de enero de 2009. Inf. RSN, 94-100.

5.1 Respuesta dinámica del terreno

Cinchona se localiza sobre una loma muy alargada, con pendientes de fuertes a muy fuertes en sus flancos, lo cual ha inducido al desarrollo de un efecto péndulo sumamente destructivo. Producto de este efecto y de la cercanía al epicentro del evento, el pueblo fue sujeto de aceleraciones del terreno muy elevadas (Fig. 5.1)



Fig. 5.1 Evidencias de aceleraciones del terreno muy elevadas en la comunidad de Cinchona.

5.2 Deslizamientos:

El evento sísmico disparó una cantidad de deslizamientos, prácticamente innumerable. Los sectores más afectados han sido los de topografía fuerte o escarpada, donde el tercio superior de las laderas ha desarrollado deslizamientos traslacionales, rotacionales o caídas (Fig. 5.2), que luego se han transformado en flujos de troncos, suelos y rocas, y que se han depositado en los ríos y quebradas. Es notoria la gran cantidad de deslizamientos que todavía no han alcanzado a movilizar todo su material ladera abajo, se espera que con la entrada de la temporada de lluvias este proceso se intensifique.



Fig. 5.2 Deslizamientos concentrados en el tercio superior de las laderas y deposición de materiales en ríos y quebradas.

Los deslizamientos han dejado al descubierto los acuíferos volcánicos (Fig. 5.3), lo cual explica muchas observaciones de lugareños, donde describen la surgencia de enormes cantidades de agua de las laderas luego del evento sísmico. Este proceso también brinda explicación al desarrollo de avalanchas de lodo y rocas, pues las descargas de los acuíferos mantienen la saturación de los suelos y son fuente de un volumen considerable de agua.



Fig. 5.3 Acuíferos volcánicos expuestos por los deslizamientos

Se han manifestado también una gran cantidad de deslizamientos en taludes verticales de poca altura, compuestos por suelos volcánicos muy meteorizados y sueltos (Fig. 5.4). Este proceso evidencia la necesidad del reforzamiento de los taludes, a la hora de proyectar las obras de infraestructura en este tipo de materiales.



Fig. 5.4 Deslizamiento de taludes de poca altura compuestos por suelos volcánicos sueltos.

5.3 Ausencia de regulación de uso del terreno

El evento ha dejado en evidencia la imperiosa necesidad de impulsar una política nacional de regulación de uso apropiado del terreno. Muchos de los colapsos de viviendas y negocios comerciales, se ha dado debido a su ubicación en lugares sujetos a deslizarse y a que se construyen de manera informal (Fig. 5.5).



Fig. 5.5 Daños a viviendas y comercios por ubicación en lugares inapropiados.

Otras obras de carácter comercial también fueron afectadas por los deslizamientos y la respuesta dinámica del terreno, al carecer de taludes diseñados y estar ubicadas en sectores inapropiados, pero también se observan deficiencias estructurales muy evidentes en el inmueble (Fig. 5.6).



Fig. 5.6 Afectación en plantas de producción de alimentos

5.4 Respuesta de la infraestructura habitacional.

Una vez más se ha puesto de manifiesto que la construcción sin diseño sismo-resistente, en la mayoría de los casos construcción informal, es la causa de los colapsos de las obras de infraestructura habitacional (Fig. 5.7).



Fig. 5.7 Ejemplos de viviendas colapsadas, carentes de diseño sismo-resistente.

En algunos sitios se pueden apreciar ejemplos de construcciones que se ajustaron al diseño apropiado y que a pesar de que deben ser demolidas, han cumplido con su función sismo-resistente de no atrapar a sus moradores (Fig. 5.8).



Fig. 5.8 Ejemplos de viviendas con comportamiento aceptable ante la sacudida sísmica.

También se observan ejemplos de respuestas satisfactorias en el caso de obras sumamente rígidas, o de obras construidas con paneles prefabricados (Fig. 5.9). En este último caso, un mejor diseño estructural puede inducir un comportamiento aún más satisfactorio en caso de eventos sísmicos.



Fig. 5.9 Respuesta satisfactoria, pero aún mejorable, de estructuras a base de materiales prefabricados.

5.5 Respuesta de la infraestructura vial

La ausencia de un diseño de taludes, que considere aceleraciones sísmicas, así como, la falta de estructuras de retención, ha conducido a una ruptura masiva de las pendientes arriba y debajo de las vías de comunicación (Fig. 5.10).

Si se pretende reconstruir las vías de comunicación, deben tomarse muy en cuenta las lecciones dictadas por este evento sísmico y proceder a diseñar apropiadamente los taludes, así como, establecer un trazado donde el impacto de eventos naturales sea minimizado.



Fig. 5.10: Infraestructura vial dañada por la ausencia de un diseño apropiado

5.6 Avalanchas de lodo, rocas y troncos

Según indican testigos, cerca de 20 minutos luego del evento principal, se presenta el desarrollo de una serie de avalanchas que arrastran lodo, rocas y una gran cantidad de troncos. Estas avalanchas, en la mayoría de los casos, arrasaron el lecho menor de los ríos y quebradas, en otros casos destruyeron puentes, inundaron o amenazaron con inundar obras de infraestructura (Fig. 5.11).



Fig. 5.11 Subestación eléctrica amenazada por el paso de una avalancha.

En el caso del río El Ángel, la avalancha arrasó el puente de la vía y alcanzó un tirante de cerca de 20 m (Fig. 5.12). La cuenca quedó en un estado muy deteriorado, lo cual produjo más avalanchas, que han de nuevo arrasado el puente. Aquí la situación refleja que nuestras autoridades no han entendido que este proceso continuará repitiéndose hasta que las cuencas encuentren de nuevo un equilibrio natural. Reconstruir las obras de infraestructura de la misma manera en que se encontraban antes del evento, lo único que conduce es a la reconstrucción de la vulnerabilidad y no a una reducción efectiva del riesgo.



Fig. 5.12 Resultado del paso de la avalancha por el cauce del río El Ángel

5.7 Conclusiones

La situación topográfica de la comunidad de Cinchona ha contribuido a que los efectos del sismo hayan sido de gran intensidad, de manera que es sumamente importante establecer regulaciones en lo que respecta a la ubicación de asentamientos, mediante un ordenamiento del territorio que considere las amenazas naturales.

Por otro lado, el desarrollo, reconstrucción y rehabilitación de obras civiles, como carreteras, caminos y puentes, debe realizarse tomando en consideración todas las enseñanzas que ha dejado el evento. De ahora en adelante nuestras obras civiles deben de ser seguras, para lo cual deben implementarse análisis de estabilidad de taludes que consideren las aceleraciones sísmicas, técnicas modernas de reforzamiento de taludes y trazados de vías por los sectores menos vulnerables.

Deben, nuestros gobiernos locales, ser sumamente estrictos a la hora de otorgar permisos de construcción y supervisar constantemente el territorio para evitar las construcciones informales y la invasión de terrenos vulnerables.

Es evidente, luego del evento, que las edificaciones que se apegaron al Código Sísmico fueron las que se mantuvieron en pie, aunque sea necesaria su demolición, cumplieron con su papel sismo-resistente de evitar atrapar a sus moradores.

Las avalanchas de lodo, rocas y troncos deben ser consideradas muy seriamente, pues como ha quedado manifiesto, su poder destructivo es inmenso y pueden afectar a distancias considerables del epicentro. Toda obra civil que se construya en las cercanías de una corriente fluvial debe considerar la posibilidad del tránsito de estas avalanchas.

La gestión para la reducción del riesgo, en su etapa de reconstrucción y rehabilitación, establece que las obras deberán ser reconstruidas o rehabilitadas para que no sean impactadas por un evento similar al que las afectó.

CAPÍTULO VI

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PÉRDIDAS Y DAÑOS

John Laurent

Laurent, J. 2009: Evaluación económica de pérdidas y daños. 2009. En: Barquero (Ed.): El terremoto de Cinchona, 8 de enero de 2009. Inf. RSN, 101-127.

6.1 Introducción

Quizá por la exposición que la prensa le ha prestado al evento, el impacto de este terremoto ha sido multiplicado con respecto a otros eventos que han afectado el país en años anteriores y aún cuando en diversos medios de prensa hasta han expresado que ha sido “la peor tragedia natural en la historia de esta nación centroamericana” (Diario electrónico Nuestro País, 10 enero 09), la magnitud de este terremoto es menor al de Limón (Telire, 15:57 horas del 22 de abril de 1991: Mw 7,6) y de igual manera, los daños son menores, como se expondrá más adelante. Un recuento de desastres que han golpeando al país en los últimos 20 años y el impacto de sus daños se muestra en el Cuadro 6.1.

Cuadro 6.1: Impacto de desastres importantes en los últimos veinte años

EVENTO	IMPACTO
Terremoto de Limón, 1991	\$148 millones, 48 muertos, comunidades aisladas y devastó caminos y puentes.
César 1996, huracán	\$100 millones Se reportaron 34 muertos y 29 desaparecidos.
Mitch 1998, huracán	\$93 millones 52 vías de comunicación y cosechas, desde Guanacaste hasta Atenas, de Tres Ríos a la zona sur.
Caribe 2008, lluvias	\$73 millones. Sistemas de baja presión provocaron lluvias e inundaciones en el Caribe y la zona sur, pero sus efectos se sintieron en el 70% del país, según datos de la CNE.
Terremoto en Damas, Nov. 2004, (Mw 6,2)	Severos daños en los cantones de Parrita y Quepos. Cientos de familias perdieron sus casas. Daños en carretera costanera.

Fuente: Informes CNE, web

Partiendo de magnitudes y no del impacto necesariamente, éste ha tenido semejanza con otros sismos recientes ocurridos en sitios como Laurel (2004; MI 5,3), Puriscal (2003; MI 5,4), Burica (2002; MI 6,2), Upala (2002; MI 5,4), Quepos (1999; MI 6,9), Pejibaye (1993; MI 5,8), Naranjo (1992; MI 6,0) y Frailes (1991; MI 4,9), entre otros (Arguello, revista 184. CRID). Se decretaron cinco días de duelo nacional y por parte del Gobierno se manifestaron solicitudes y demandas de ayuda internacional, incluyendo solicitudes de ayuda inmediata de países europeos, eximiendo de crítica solamente a China (Periódico La Nación, 12 enero 09).

La magnitud de la tragedia llevó al Gobierno a declarar emergencia nacional en nueve cantones de dos provincias: cantón central de Alajuela, Grecia, Poás, Alfaro Ruiz y Valverde Vega, en Alajuela y en el cantón central de Heredia, Barva, Santa Bárbara y Sarapiquí, sitio donde, según el Gobierno, está la situación más difícil; el significado de la declaratoria de emergencia, implica la posibilidad de que instituciones del Estado giren recursos sin mucho trámite burocrático y que además puedan realizar compras directas, sin mediar licitación, para atender a damnificados y daños.

Un préstamo por \$65 millones

En los días posteriores al terremoto, se aprobó el expediente N° 17.243, con el préstamo No. 7594-CR entre la república de Costa Rica y el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF), donde el Gobierno solicitó la suma de \$65 millones para atender emergencias y como parte de la justificación, la información menciona entre otras cosas (Diario Oficial La Gaceta, No. 10): “Todo parece indicar que este terremoto sirvió de motor para terminar de

concretar este crédito, lo cual es positivo; no obstante, es de resaltar el hecho de que no se menciona la manera con que dichos fondos serían utilizados, ni los protocolos que harían efectiva su utilización, ni su práctica específica en alguna de las tareas del ciclo de un desastre, sea para prevenir, preparar, atender, rehabilitar o reconstruir, derivado de los efectos de algún evento, ni tampoco se menciona si se utilizará para atender emergencias pasadas o esta en particular.”

Fuentes de ingreso y población en la zona, antes del terremoto

Un desastre es aquel evento que afecta la vida humana y las condiciones que la rodean, pues no existiría daño, si esto no fuese de esa manera. Mucho se ha hablado de que los desastres tienden a afectar de mayor forma a los sectores más necesitados (Los desastres naturales afectan más a los pobres, 1985) y en este caso no se da una excepción, pues las condiciones previas en la zona donde se produce el evento, no eran necesariamente las más desarrolladas y probablemente, éste va a repercutir sobre el rezago social de los cerca de 50 000 habitantes de la zona, aunque en el área de Cinchona se habla de que 2.500 personas era la población antes del terremoto,. (Periódico La Nación, 18 de enero, 2009)

Según el Índice de Desarrollo Social –IDS–, indicador que incluye información referente a la riqueza económica de las familias, ecuación, salud, entre otros, de los 469 distritos de Costa Rica (Informe MIDEPLAN, febrero 2008), las poblaciones cercanas al volcán Poás se caracterizaban por la escasez de recursos económicos, un limitado acceso a la educación y poca organización social. Poblaciones como Cinchona, Los Cartagos y Poasito están ubicadas dentro de esos distritos, cuyos habitantes presentan rezagos en la calidad de vida; por ejemplo, Varablanca, distrito quinto de Heredia, tiene un IDS que lo cataloga como “muy bajo”, mientras que de los ocho demás distritos más heridos por el movimiento, tres presentan un IDS “medio-bajo” y cinco están en la categoría de “bajo”. (Periódico La Nación, 19 enero, 2009).

Antes del evento varias familias vivían en precarios, dependían del trabajo en lecherías, cultivos, turismo y ahora todavía, se está a la espera de una solución de parte del Gobierno, mientras varios continúan viviendo en condiciones de casas temporales. Incluso por la falta de una definición clara sobre las condiciones futuras de vivienda de la zona, se han levantado protestas por parte de habitantes de Cinchona principalmente, ante la incertidumbre que ello les genera (Informa-tico, 31-3-09). Ya en años anteriores se ha hablado de reubicaciones de poblados debido a otros desastres, algunas se han verificado y otras no, pero se están igualmente realizando valoraciones para la reubicación de los habitantes de este poblado.

6.2 CLASIFICACION DE LOS COSTOS DEL TERREMOTO

La dificultad de cuantificar el daño, parte de informaciones difusas, donde ni siquiera la simple sumatoria de personas y familias afectadas concuerda con los totales que se mostraron en prensa o informes oficiales y cuando era de esperar que en un albergue, luego de un número aceptable de días de permanencia la cantidad de personas decrezca, en muchos de los números mostrados la cifra más bien tendió a aumentar. (Informes de situación CNE, No. 8 y No. 10).

Existen diversas metodologías para la presentación de costos derivados de un desastre (CEPAL; ISO 14000, OSHA 18000), siendo que en el país no existe una normativa que se haya implementado y que estandarice la presentación de los datos asociados con el mismo. Esto es una real necesidad sobre la cual no se ha trabajado apropiadamente y cuando se presenta información de daños y costos, puede ser que la misma se realice a la libre por parte de las diversas instituciones involucradas; si bien es cierto que la CNE ha promovido a lo largo de los años capacitación en cursos como EDAN (Evaluación de Daños y análisis de necesidades), instruyendo a funcionarios de diversas instituciones a lo largo del país, no ha sido contundente en la normalización de información solicitada con relación a emergencias y desastres, ni en la manera de recopilar la misma.

Debe destacarse también que la comparación entre reportes oficiales ha sido compleja, pues entre otras cosas, los mismos no son acumulativos, no son consecutivos (como el No. 9 que no existe), en unos viene una información – en otras no y hasta datos diferentes manejan uno con respecto a otro. Por otro lado, dentro de los

informes de situación oficiales, es a partir del informe No. 6 en que se comienzan a dar información de cada uno de los sectores involucrados, hasta cierto punto, de forma ordenada.

En términos generales, la cobertura periodística, dejando de lado el amarillismo de algunos medios, fue sumamente importante tanto para darle seguimiento al evento como para que no se deje en el olvido a las personas afectadas, pues nunca antes se le ha dado tanto seguimiento, ni divulgación, ni permanencia en el tiempo, a información relacionada con algún desastre que haya afectado el país.

Adicional al informe de sectores oficial, se adjuntarán una serie de datos de costos complementarios que no aparecen inscritos como daños oficiales, pero que sí pueden resultar significativos al final.

Impacto del desastre

No se cuestionan detalles informativos oficiales, dando por un hecho – no necesariamente verdadero - que su cuantía es correcta, pero se tratará de cotejar el detalle de la información que se anote. Por ejemplo, el detalle de viviendas afectadas muestra referencia a observaciones como daños leves, parciales o totales, pero no especifica el daño localizado en la vivienda ni un eventual costo de reparación cuando es pertinente. En muchos casos ni siquiera especifica el problema y declara la casa inhabitable y en general, no se conocen los criterios que se utilizaron para valorar la condición de la vivienda.

Los daños que se presentarán serán principalmente directos (aquellos que sufren los activos inmovilizados, destruidos o dañados y los infligidos a las existencias (tanto de bienes finales como de bienes en proceso, materias primas, materiales y repuestos)) (CEPAL), producidos por el desastre de manera inmediata y con el paso de los días y los daños indirectos, se presentarán en algunos de los casos donde ello fue posible.

Diversos medios de prensa manejaron un dato de \$100 millones de pérdidas, en principio suministrado por Casa Presidencial y CNE (pero sin presentar mayores detalles asociados), informando de ello solo 4 días después de sucedido el evento (Periódico La Nación, 13 enero 2009). Obviamente, tal grado de precisión es de difícil exactitud, pues para ese momento, apenas se estaba en condiciones de verificación y medición de la magnitud del impacto del evento.

Cuando se produjo el terremoto de Limón, con unos daños aproximados a \$181 millones, se afectaron principalmente los sectores agropecuario (33,16%), vivienda (27,08%), transportes (15,10%) y acueductos (12,56%), tomando en consideración que la densidad de población era superior a la de Cinchona, que la infraestructura pública era más concentrada, la condición boscosa es inferior y por otro lado, los proyectos agropecuarios son más amplios en Cinchona y la dependencia a ellos mayor, entre otros aspectos.

Debe tenerse presente además que las necesidades de normalizar información relativa a daños por sismo, son las mismas tanto antes como ahora (en los detalles del evento de Limón, ni siquiera se mencionaron daños en turismo, ambiente, etc.).

Del informe final emitido por la CNE para este terremoto, se habla entonces de unos 280.765 millones en pérdidas (unos \$492 millones).

6.3 CARACTERIZACIÓN DE SECTORES

Para la caracterización de los sectores afectados, se presenta a continuación una breve descripción del daño ocasionado y de los costos relacionados:

Sector Agropecuario

La dificultad de cuantificar un dato relacionado con los daños en esta área se ve más que manifiesta en la recopilación de información, pues por ejemplo mientras que se menciona preliminarmente una inversión necesaria de 6.300 millones de colones (Informe No. 18, CNE), en datos posteriores se menciona que se requerirían 750 millones del mismo sector (Informe 19, CNE). En el informe final, la información vuelve a subir, para dar por resultado 5.996.103.979, pero otorgándole un aproximado a 64.8% a daños provocados sobre los helechos (3.885.000.003,00), elemento que ni siquiera había sido mencionado con anterioridad en ningún informe previo (Informe final por sectores, CNE).

Producción Agrícola

Previo al evento, la actividad agrícola más importante en la zona era la producción de flores con un volumen de producción cercano a 1.5 millones de kilogramos y de comercialización de 1 millón, concentrándose en los cantones de San Carlos y Sarapiquí. Otra de las actividades importantes era la producción de cultivos de fresas con 21.000 kilogramos reportados, en los cantones de Alajuela, Heredia y Poás (SENASA). Partiendo de que la zona era sumamente dependiente de la producción agrícola, es de esperar que las pérdidas en la materia sean significativas, representando este rubro un porcentaje elevado del total de daños derivados del terremoto, siendo estos cercanos a los 6 mil millones de colones (Cuadro 6.2). Instituciones involucradas en las labores de rehabilitación y reconstrucción: Coopesarapiquí, MAG, INTA, SENARA, CNP, IDA, INA, INCOPECA, Sociedad de Usuarías de Poasito, PRODIFRESA, Asociación de productores de Vara Blanca, SENASA, SEPSA.

Cuadro No. 6.2: Daños en el sector agrícola

Producto afectado	No. Fincas	Area afectada (Ha)	Cantidades (Vol. en ton)	Monto del daño (Colones)
Café	4	4	40	337 739 443
Flores	4	9		95 000 000
Helechos	11	259		3 885 000 000 *
Hortalizas	7	5,7	89	
Fresa	105	34,9	1 950	693 820 000
Trucha	3	0,51	109 000	28 250 000
Palmito	1	3		4 009 597
Riego	207			206 572 189
Proyectos cobertura nacional				876 880 000
Total (agrícola, infraestructura, proyectos)				5 996 103 979 **

Fuente: Informe final de la CNE

(*) 11 fincas productoras de helechos con 259 Ha afectadas en Sabana Redonda de Poás.

(**) Infraestructura más afectada las cercas con unos 460 000 m², seguidos de caminos con 90.000 m², invernaderos con poco más de 41 000 m² y lecherías con 14 000 m² (SENASA).

Otros daños reseñados (sin especificar costos asociados):

Pastos	7356 ha	379 Ha	
Cultivos	831 ha	65 Ha afectadas	
Charrales	349	2,5	
Bosque	2269	405	(SENASA)
Ornamentales	259 Ha	72 000 000	(Informe No. 18, CNE)

Producción Lechera

La producción de leche era una de las actividades productivas más importantes de la zona, siendo muy rica, con un volumen total de producción de leche de aproximadamente 150 000 litros/día y de comercialización de 137 668 litros/día, siendo el mercado más importante la Dos Pinos (SENASA). La producción ganadera se ve reducida debido a la reacción emocional de los animales ante los fenómenos naturales que los afectan. Por ejemplo, luego de un huracán o una inundación prolongada, las gallinas dejan de poner, las vacas disminuyen considerablemente de peso y baja su producción lechera, etc; las vacas no se pueden dejar de ordeñar porque se enferman de mastitis y sufren otros trastornos. (Situación todavía es de emergencia. Marvin Barquero S.). La cuantificación de estos efectos indirectos es difícil de realizar y casi siempre se estiman con base en una reducción de hasta un 20% de la producción normal (SENASA).

De los productores de la zona, 86 de ellos gestionaron operaciones bancarias con el fin de reactivar en el corto plazo su producción y a mediano plazo a renegociar el monto global de la deuda, cercano a 2,7 millones de dólares (1 551 949 380 colones). Intervino el Sistema de Banca de Desarrollo dando financiamiento por 2 000 millones con un año de gracia y 1 000 millones en avales o garantías, además de inversiones iniciales por 6 300 millones de colones. (Terremoto 6,2, Irene Vizcaíno).

De los informes de situación se obtiene nuevamente información confusa, pues mientras que se habla de 4 500 cabezas de ganado lechero, con problemas en ordeño en las primeras 72 horas (Informe No. 18, CNE), en el siguiente se habla de 2 500 cabezas de ganado lechero (Informe No. 19, CNE). Los costos asociados con la producción lechera se muestran en el Cuadro 6.3, donde se nota un total de 1 611 456 875 de costos relacionados. Instituciones responsables de la rehabilitación y la reconstrucción; MAG, productores, SENARA, CNP, IDA, Banca de Desarrollo, Acueductos, Municipalidades, CNE.

Cuadro 6.3: Ganadería Lechera

	No. Fincas	Área (Ha)	No. Animales	Infraestructura Pecuaria m ²	Pérdidas	Costos (¢)
Heredia	230	87	74			1 191 585 000 *
Alajuela	117	464	6900	51408	341 271 625	419 871 875
	347	551	6974	51408	341 271 625	1 611 456 875

Fuente: Informe final de CNE.

(*) Se afectó infraestructura como: galeras, salas de ordeño, corrales, cercas, bodegas, equipos de ordeño y tanques de frío, 74 animales muertos, 87 Ha afectadas, 230 fincas productoras afectadas en Cariblanco, Ujarrás, los Ángeles (pata Gallo), colonia Virgen del Socorro, Colonia Carvajal.

Población Animal

Las pérdidas animales más importantes fueron de 72 vacas, 68 novillos, 51 terneros y 882 aves (SENASA), pero no se cuantificó el daño económico asociado, ni con las diversas enfermedades presentadas por efecto directo del evento, aunque sí se encontró una descripción de las mismas de manera porcentual, siendo la mastitis de un 56% y los trastornos digestivos de un 19%, como los más representativos (SENASA). No obstante, en los reportes que se estudiaron, no se cuantificó la cifra de animales domésticos afectados.

Sector Acueductos: Fuentes y Sistemas de distribución de agua.

Veinte fuentes y tomas de agua con diferentes grados de afectación fueron evaluadas, reparadas y normalizada la distribución para una población atendida de 125 000 personas, como primera acción inmediata de parte de AYA. La dificultad de entrar a la zona, hizo que la región de Cinchona permaneciese sin líquido por más tiempo que otras localidades del país, dando por resultado que no se pudiesen habilitar 250 servicios para 1 250 habitantes, dada la destrucción en el sitio. La totalidad del daño se dio sobre 24.499 servicios y 106.940 habitantes, donde transcurrieron aproximadamente 15 días en que se suministró líquido de manera regulada, de los cuales, solo en Alajuela, donde se presentó la mayoría de daños, se dañaron 16.800 servicios y se afectaron a 68.880 habitantes (Informe 18 CNE).

En el área de Cinchona y alrededores se calcula que 7 900 personas permanecieron sin agua potable en razón de los daños que el sismo provocó en el sistema de abastecimiento de agua potable, pues se dañaron tres acueductos rurales, de los cuales, el AyA restableció el servicio para tres acueductos, sin embargo, se mantuvieron diez sistemas sin funcionar. AYA utilizó caminos cisternas para el abastecimiento de agua potable en Poás, Varablanca y San Miguel. (Informe No. 19, CNE).

Aspectos complementarios fueron la limpieza de cauces y dragado de ríos en Alajuela, con una extensión de 7.4 km, aproximadamente 80 toneladas de dragado y un costo de €39 millones; en lo correspondiente a alcantarillas y vados, se perdieron €17 millones por 1.310 metros lineales en San Isidro de Sabanilla de Alajuela, para un total de costos de recuperación de 253.7 millones, incluyendo otros daños menores en Poás. (Informe final por sectores, CNE) Solo en Alajuela se reportaron pérdidas por €37.6 millones, y una gran cantidad de tuberías debieron ser reparadas, quedando laderas muy inestables y requiriéndose de la construcción de gaviones y muros de contención, de puentes para paso elevado de tuberías, de bloques de anclaje para tuberías, desviación de líneas de conducción, para un costo de recuperación de €420 millones. Le siguió Santa Bárbara de Heredia con €25.1 millones en pérdidas y €75.5 millones por costos de recuperación; Grecia, Poás, Heredia y Sarapiquí, sumaron pérdidas por €11.25 millones y costos de recuperación por €113.5 millones. (Informe final por sectores, CNE)

6.4 ACCIONES DE PRIMERA RESPUESTA

No existe referencia específica de parte de las labores de las diferentes instituciones en las acciones de primera respuesta a la atención del terremoto, salvo las efectuadas por la CNE, pero solo en algunos aspectos. Como primera respuesta se entienden las labores relacionadas con la atención inmediata posterior al evento, donde eventualmente participan instituciones como: CNE, OIJ, Poder Judicial, Cuerpo de Bomberos – INS, Cruz Roja y otras.

La CNE reportó un total de gastos por €342.09 millones, que fue empleado para la compra de materiales para habilitar albergues, alimento para ganado, alquiler de maquinaria, compra de 5.000 cobijas, compra de dos estaciones meteorológicas y el alquiler de un helicóptero (Informe final por sectores, CNE).

SALUD

Como parte de las labores de los equipos de primera respuesta, están las acciones de otorgar atención médica inmediata a las personas que han resultado afectadas por el terremoto, siendo esto paralelo a la constitución apropiada de albergues.

No obstante, no hay mayor referencia en los informes de situación, ni en reportes de instituciones de salud (Ministerio de Salud, Caja Costarricense de Seguro Social, Cruz Roja, EBAIS, ni instituciones particulares), sobre aspectos relacionados con la atención médica inmediata.

Los medios de comunicación hicieron referencia que existía gran necesidad médica (Periódico La Nación, 23 enero 2009), pero cuando instituciones de salud privadas colaboraron en la atención, no se les dio la ubicación apropiada, ni información sobre las necesidades de las localidades (Referencia personal de Lic. en enfermería).

Se menciona que se conformaron planes hasta esta emergencia, “pues no existía con anterioridad” y que se conformó una unidad para la próxima emergencia (Viceministra de salud, Revista Colegio de médicos y cirujanos, marzo 09), denotando la necesidad de establecer este tipo de protocolos.

Solamente se menciona que debieron trasladarse 3 personas a centros médicos en todo el país, con fecha 10 de enero (Informe N° 1, Cruz Roja). Diversas instituciones colaboraron en la atención médica, hasta voluntarios, pero no queda del todo claro, el apego a algún protocolo de atención médica inmediata de parte de instituciones que les haya permitido coadyuvar de forma simultánea con la CNE o la Cruz Roja en la situación de emergencia. Ante consulta al gerente médico de la CCSS menciona que “Por una iniciativa propia empezamos a llamar a los Equipos Básicos de Atención Integral en Salud (EBAIS), de nuestra zona” y “Un alma caritativa nos prestó la cochera de la casa...entonces instalamos un hospital ambulante” ([Diego Coto Ramírez](#), Infocaja).

Sobre medidas de tratamiento sanitario en el agua y los alimentos proporcionados en los albergues, solo hasta los últimos informes de la CNE (No. 18, No. 19), se pudo encontrar información relacionada (lo cual no quiere decir necesariamente que no se realizara con anterioridad). De dichos informes de situación puede extraerse de forma indirecta alguna información relacionada, de donde se obtuvo que se atendieron 1.058 pacientes y 812 fueron dados de alta en el mismo lugar (Informe No. 18, CNE), pero nuevamente, no se encontró ningún informe oficial sobre organización y sus costos.

Participaron especialistas en diversas ramas de la medicina, como psicólogos del Colegio de Psicólogos, Universidad de Costa Rica, Cruz Roja, Patronato Nacional de la Infancia, Defensoría de los Habitantes y otras instituciones para la atención de familias impactadas y afectadas, que debieron permanecer en albergues.

EDIFICIOS DE SALUD

Diferentes edificios en el área de salud a lo largo del país sufrieron daños en su infraestructura física, pero solo se incluyen los datos referentes a los que se encontraron dentro del área de mayor afectación por parte del terremoto, siendo que con daño total se encontró el EBAIS de Poasito (€300 millones en pérdidas) y el edificio del CEN-CINAI (€110 millones en pérdidas) y otros edificios con daños parciales (€4.14 millones en pérdidas). (Informe final por sectores, CNE).

MANEJO DE ALBERGUES

Como aspecto consecuente al impacto del terremoto, la medida sanitaria consiguiente es de orden paliativo, procurando evitar brotes epidémicos, minimizando la propagación de enfermedades, controlando la difusión de medicamentos y la calidad del agua, manejando apropiadamente los desechos, controlando aguas residuales, manejando cuerpos humanos y restos de animales, principalmente. Puesto que representa un monto considerable y del cual no se encontraron valores económicos relacionados, se muestra una estimación en el Cuadro 6.4, considerado ello a partir de una existencia de albergues en Alajuela y Heredia (atendiéndose en un principio a 1868 personas, 365 familias, distribuidas en 18 albergues).

Cuadro 6.4: Costos estimados de mantenimiento de los albergues

Día	Albergues	Promedio personas	No. personas	Duración	Totales
1	18	104	1 868	1	9 340 000
2	21	112	2 358	2	23 580 000
3	21	93	1 957	3	29 355 000
4	20	119	2 376	3	35 640 000
5	21	106	2 220	1	11 100 000
6	21	94	1 965	2	19 650 000
7	20	94	1 881	1	9 405 000
8	20	91	1 822	1	9 110 000
9	19	80	1 523	2	15 230 000
10-45	5	99	495	36	99 100 000
Totales					261 510 000

Supuestos asumidos:

Costo promedio por persona (comida, atención médica, etc)	5 000
Costo promedio por albergue por día para atención personas	890 000
Cantidad de personas promedio por albergue	99
Albergues establecidos luego del décimo día	5 x 36 días

Evaluación de los albergues

100 000 mensuales a familias en los albergues (menos de 1000 personas) (Periódico La Nación, 29 enero) Alquileres por 3 meses por parte del IMAS por cierre de albergues.

Se mencionaron 49 casos de tos, 5 casos de diarrea, 6 casos de alergia, 2 casos de gripe, 1 dolor de cabeza, 1 caso de fiebre, 3 malestar estomacal, 1 crisis hipertensiva, 1 síndrome anémico, 1 caso vómito, 1 caso lesiones de piel, 11 casos depresivos, 2 metrorragia, 1 lumbalgia. (Informe No. 18, CNE). Pero de igual manera, no se pudieron contabilizar aspectos asociados con: Control sanitario, Lucha antivectorial, Costo de personal, Costo de material y equipo, Costo de difusión de información pública, Costos para la atención de salud preferencial a grupos vulnerables, Costos indirectos suplementarios de funcionamiento de los servicios de salud, Diferenciación de enfermedades, Tratamientos por trastornos psicológicos – físicos, tratamiento por Género – Edad u otros.

Debe indicarse además que la CNE, aproximadamente 12 días después del evento inició la distribución de unos 15.000 diarios debidamente empacados casa por casa y albergue por albergue, en toda la región afectada. (Informe No. 18, CNE).

6.5 DAÑO AMBIENTAL

Bajo una perspectiva económica, los recursos naturales y el ambiente como tal, pueden verse como activos (capital natural) de los cuales se derivan bienes y servicios que contribuyen a aumentar el patrimonio de las personas, lo cual puede apreciarse desde diferentes ópticas: el turismo ecológico muy presente en la zona, con su aporte en la economía del lugar, los beneficios psicológicos del esparcimiento derivados, la preservación del capital natural para el disfrute de las futuras generaciones, la presencia de elementos naturales de investigación para áreas como la medicina, etc.

Antes del evento se conocía de la riqueza en la zona de epifitas, helechos, sombrillas de pobre, chile, muelos, melastomáceas, azahar de monte, robles por ejemplo, y contribuyen con la condensación foliar. Asimismo, en el momento del evento alguna fauna tiene que haberse perdido, (colibríes, ardillas, quetzales, yigüirros de montaña,

dantas, cabro de monte, perezosos, pizotes, salamandras, ranas, serpientes, etc); peces y vida acuática de ríos como el Sarapiquí. (Informe preliminar de daños, UNA). El día 20 de enero se conformaron 5 comisiones interinstitucionales para la evaluación de los aspectos ambientales ocasionados por el evento del sismo, en las áreas de bosques, vida silvestre en cautiverio y en su hábitat natural, suelos y recursos hídricos, siendo que en estas comisiones participaron representantes de las siguientes instituciones: MINAET, AYA, SENARA, MAG, INBIO, UNA, MINSALUD (interés en las comisiones de suelos y recurso hídrico). (Informe No. 18, CNE).

Definitivamente la conciencia ambiental en el país es muy diferente a la existente hace 20 años, pues en análisis diversos de los daños en el terremoto de Limón, no se encontró referencia al daño ambiental, ni tampoco el atinente al turismo (aunque para éste terremoto solo se menciona, pero sin los costos derivados).

El área de mayores efectos en infraestructura, topografía y bosques se encuentra en la región montañosa y abrupta en los alrededores y al este de Cinchona, siendo que los principales daños ambientales se centran en un cuadrante comprendido entre los macizos Poás y Congo, así como Varablanca (Heredia) y Cariblanco de Sarapiquí (Periódico La Nación, 22 marzo 2009) y la mayoría de deslizamientos, unos 180, de distintos tamaños ubicados mayormente entre el Volcán Poás, el Volcán Congo, Cariblanco y Vara Blanca. Pocos deslizamientos se observaron en las cercanías de Poasito y Fraijanes (OVSICORI). El arrastre de sedimentos cambió considerablemente la calidad físico química del agua de los ríos. (Jorge Herrera, UNA). Unas 2137.8 hectáreas sufrieron daños y se estima que la pérdida relacionada es de \$31 880 410 463 (Cuadro 6.5).

Cuadro 6.5: Daño Ambiental al bosque

Nombre de Cuenca o Subcuencas	Extensión (Hectáreas)	Descripción de los Daños	Descripción de las labores requeridas	Monto estimado costo de obras (¢)
Cuenca del Río Sarapiquí, Subcuencas Toro y Poás	2137,8	Deslizamientos con daños directos en cobertura de bosques primarios. Costo social indirecto por efectos en "el flujo de servicios ambientales" del recurso hídrico, fijación de carbono, recursos maderables y no maderables, la belleza escénica, caza, pesca, material genético, protección del suelo, regulación del clima, conocimiento ancestral e investigación.	Recuperación por vía natural y por reforestación: monitoreo y mantenimiento: Corresponde a bosque, bosque secundario, café, no forestal y nubes	31 880 410 463
TOTAL				31 880 410 463

Aspectos complementarios:

La recuperación del bosque podría demorar al menos 20 años y en algunas zonas hasta más, aparte de que podrían producirse migraciones de animales hacia otras zonas cercanas en busca de alimento y casa, pero "los grandes claros que se abrieron en el bosque podrían afectar la conectividad física de las especies". (Periódico La Nación, 19 enero 2009). Muchos peces de agua dulce resultaron muertos; la nutria o "perro de agua" ([Lontra longicaudis](#)), se verá afectada porque su dieta se basa en grandes cantidades de crustáceos y peces; cadáveres de "saíno" ([Tayassu tajacu](#)) y de "pizote" o "gato solo" ([Nasua narica](#)), se observaron sobre el cauce del río Sarapiquí; posiblemente afectados están el mono congo o aullador ([Alouatta palliata](#)) y el mono carablanca o capuchino ([Cebus capucinus](#)). (Informe preliminar de daños, UNA). Podría presentarse contaminación en algunos focos del ambiente, pues se desconoce sobre la presencia de productos químicos y/o veterinarios existentes previos al evento en las fincas lecheras, las helecheras, los hoteles, sodas y restaurantes, por lo que eventualmente ello podría lixiviarse hacia los ríos (agroquímicos, detergentes, combustibles, etc.). Asimismo los aceites y combustibles de los vehículos que cayeron al fondo de los precipicios poco a

poco irán soltando los aceites y combustibles, que en algún momento llegarán a aguas subterráneas o los ríos (Periódico La Nación, 19 enero 2009).

6.6 TURISMO

El sector se afecta por aspectos como: disminución de ingresos de turistas y la falta de trabajo en el sector por parte de personal dedicado, así como en el daño a los elementos correspondientes al ambiente que eran explotados para aprovechar el ecoturismo.

No se ha cuantificado el daño en este sector por parte de ninguna entidad pública o privada, ni el daño en el recurso ecoturístico como las cataratas (la Paz y San Fernando), el uso de los ríos, ni la laguna Botos del Poás, la naciente del río Mastate en el Potrero Grande del Poás que corre hacia los bajos del Toro y las nacientes de agua hacia Grecia, en la entrada del Parque. Se activó un programa de emergencia para evacuar los turistas que se encontraban en la zona de Vara Blanca y otras del centro del país y no se reportaron personas muertas o heridas sufridas por algún turista en el terremoto. No hay un dato exacto del número, pero se mencionó de unos 31 [franceses](#), 19 [holandeses](#), dos [españoles](#), un [alemán](#) y un número no definido de [estadounidenses](#) resultaron afectados en el cambio de sus planes de viaje por la incomunicación de la que fueron objeto ([Instituto Costarricense de Turismo](#) (ICT), Wikipedia).

Aún cuando el turismo venía siendo afectado por la crisis internacional, lo cual de manera directa va a afectar consecuentemente a la zona, con o sin terremoto, la entrada de turistas al país se ha venido reduciendo y es probable que esto se mantenga, debido a la situación económica internacional, al temor de nuevos temblores y a los daños causados en la zona del epicentro.

Los afectados en el sector turismo son personas que trabajaban en restaurantes, tiendas de recuerdos y otros negocios relacionados con la actividad turística. Como un subsidio a los trabajadores, se les ofreció un monto de ¢130.000 durante 30 días a las cerca de 300 personas que quedaron cesantes, lo cual representa un costo representativo que se suma al resto de daños (Periódico La Nación, 29 enero 2009) (Cuadro 6.6).

Cuadro 6.6: Gastos del sector turismo estimados

No. Personas	Subsidio (colones)	Tiempo (días)	Total (colones)
300	130 000	90	3 510 000 000

Fuente: Periódico La Nación, 29 enero 2009. Página 17a

Mucho menos se ha valorado la imagen de la zona o del país, por el efecto del terremoto, aún cuando hay evidencias de afectación, como las 35 personas que quedaron sin empleo en la zona de Sarapiquí (de la provincia de Heredia, no Alajuela) por la baja en turismo (Diario Extra, 10 febrero 2009, Página 14) y menciona que “lo que estamos sufriendo es un terremoto económico, por la baja en la visitación a la zona”, (Ibid), aún cuando no sufrieron ningún tipo de daño directo por el evento.

6.7 EDIFICIOS PÚBLICOS

Responsables de la valoración de edificios públicos cercanos a la zona del epicentro (principalmente cerca de Poasito), pertenecen al Ministerio de Salud, el IMAS y la CNE. Los daños se encontraron principalmente en Barva (Hogar de ancianos, edificio municipal, cementerio), requiriendo acciones de demolición, reconstrucción y reparación, con ¢49 250 000 en daños y en Santo Domingo (Centro de nutrición, Iglesia, Edificio Mesén, Delegación de policía), con ¢21 200 000 reportados de daños.

Como daños indirectos, pueden mencionarse otros, como que alrededor de 50 empleados de la Municipalidad de Alajuela iniciaron una huelga indefinida debido a los daños que tiene el edificio, aún cuando esto sea casi 2 meses después (Periódico La Nación, 13 de marzo, Página 6a).

Otros edificios que se evaluaron y que representaron un rubro significativo, lo fueron los centros educativos, donde algunos sufrieron daños parciales y otros totales, reportando un daño representativo del total de ¢2 722 514 790, reseñados en el Cuadro 6.7:

Cuadro 6.7: Centros Educativos con daños parciales

Localidad	Cantidad	Alumnos	Pérdidas	Montos
Alajuela	6	1 175	95 114 561	95 114 561
Poás	1	215	8 451 306	10 951 306
Heredia	2	1 698	113 104 173	113 104 173
Barva	1	409	70 998 260	70 998 260
Santa Bárbara	7	1 730	49 511 289	49 511 289
Sarapiquí	2	787	493 040	493 040
Totales			2 516 318 681	2 722 514 790

Fuente: Informe final por sectores, CNE.

EDIFICACION ESCOLAR

Aún cuando las actividades de reconstrucción requieren una serie de normas que por ley la CNE debe dirigir, instituciones como el MEP indicaron que lo realizarían de manera aparte, para lograr la reparación de escuelas y colegios dañados por el terremoto. El MEP indicó que requeriría de “padrinos” para 13 casos y que no necesitará de la ayuda de la CNE para construir las aulas temporales en los lugares donde hay albergues y que el costo de las instalaciones es de ¢159 millones, siendo que el 70% de ese monto será cubierto con recursos propios del MEP y el restante 30% donado por la Agencia de Cooperación Española. (Periódico La Nación, 13 febrero 2009). Mencionó que “Es más rápido hacerlo por contratación directa que tener que pasar los datos a la CNE”, (Ibid). El total de daños reportados por colapso total de los diferentes centros educativos fue de ¢2 498 742 157, estando ubicados en la provincia de Alajuela (Cuadro 6.8) y todas contaban con 15 Computadoras, 1 Impresora, 15 UPS, 4 mesas, 4 sillas, 6 conectores, regletas, extensiones, cableado de red, 1 router.

Cuadro 6.8: Centros Educativos con daños de colapso total (Alajuela)

Distrito	Poblado	Centro Educativo	Matrícula	Infraestructura	Pérdidas	Monto del daño
Carrizal	Pavas	José Manuel Herrera S.	283	Daños generalizados en paredes y pisos. Inhabilitar zona de juegos y aula 11.	312 804 810	312 804 810
San Isidro	Laguna	La Laguna	259	Reventaduras y desprendimiento de cielo raso. Construir muro de contención oneroso.	312 262 464	451 200 000
Sabanilla	Fraijanes	Fraijanes	107	Daños menores: desplazamiento de muro de contención de aulas y algunas reventaduras.	305 529 180	338 400 000
Sabanilla	Poasito	Poasito	268	Colapso parcial, daños considerables. Actual local es inhabitable.	524 945 558	524 945 558
Sabanilla	Poasito	T.V. Poasito	96	Daños importantes en local provisional de construcción empírica - considera inhabitable.	305 312 246	337 200 000
Toro Amarillo	Bajos Toro Amarillo	T.V Bajos Toro A.	18		116 400 000	116 400 000
Sarapiquí	Cinchona	Cinchona	49	Colapso total. Terreno falseado por derrumbe	307 706 738	307 706 738
Varablanca	San Rafael	San Rafael-Vara Blanca	32	Destrucción total: daños severos generalizados por deslizamiento del terreno.	110 085 051	110 085 051

Fuente: Informe final por sectores, CNE.

6.8 SECTOR ENERGÍA-TELECOMUNICACIONES

En este sector se produce uno de los daños más significativos y además, más difícil de cuantificar debido a la falta de normalización de la información, su adecuada recopilación y la incorrecta definición de canales adecuados de comunicación oficial.

Las divergencias informativas detectadas surgen del hecho de que en comunicación directa con los responsables del propio Proyecto Cariblanco, donde se presentan los mayores daños del sector, los funcionarios manifiestan aspectos de relevancia para los efectos de los daños que aquí se presentan, tales como:

- 1.-que no han dado información sobre el plazo que comenzará el Proyecto a trabajar (pero información periódica reiterada generó informaciones diferentes);
- 2.-que los costos no se aproximan al monto que recibió la CNE como dato oficial de la institución;
- 3.-que no han facilitado información de costos, ni a nivel ICE ni a nivel externo, mucho menos a la prensa.

Para hacerle frente a los daños en el proyecto Cariblanco, el ICE hizo uso de la póliza U500, en trámite a partir del mismo jueves 8 de enero y como parte interviniente, la Unidad Ejecutora de Fideicomiso del Banco Nacional. A partir de esto es que no es posible definir con exactitud el daño en el sector energía por negociaciones INS-ICE, al mantenerse en secreto el costo del reaseguro y el costo de los daños a la infraestructura (Periódico Nación, 4 abril 09).

Sistema de Distribución

Se repararon 136 km de redes de distribución (labores de inspección, reparación de amarras, aplomado de postes, reparación de retenidas, sustitución de elementos y/o líneas, cambios de transformadores, corta y eliminación árboles, sustitución de acometidas y remoción de obstáculos) Se inspeccionaron 1.825 postes, se instalaron 24 postes nuevos, se sustituyeron 27 postes quebrados y 21 transformadores, se construyeron 2.12 km. de línea trifásica nueva, retiro de 5 km de línea trifásica, 26 maniobras de operación, se atendieron 287 averías, se instalaron 29 lámparas de alumbrado público, se atendieron 4.000 clientes por vía telefónica, se restableció el servicio a 13.293 clientes, participando 220 funcionarios. (Informe de daños en infraestructura eléctrica, ICE). Se vieron afectado 11.700 clientes en el servicio eléctrico (Fig. 6.1), los cuales fueron restablecidos en menos de 24 hrs después del sismo, a 700 clientes más se les restableció 48 hrs. después del sismo y solo por condiciones del terreno, no se restableció el servicio a 300 clientes en Cinchona (Gravin Mayorga, Presentación ICE). El daño reportado por el ICE a la CNE, pero desvirtuado por personal del ICE, indicó que los daños del sector energía fueron de \$205.427.820.000, lo cual es una muestra de la necesidad de mejorar la normalización y la recopilación de la información, entre otras cosas, con el fin de entregar información oficial fidedigna.

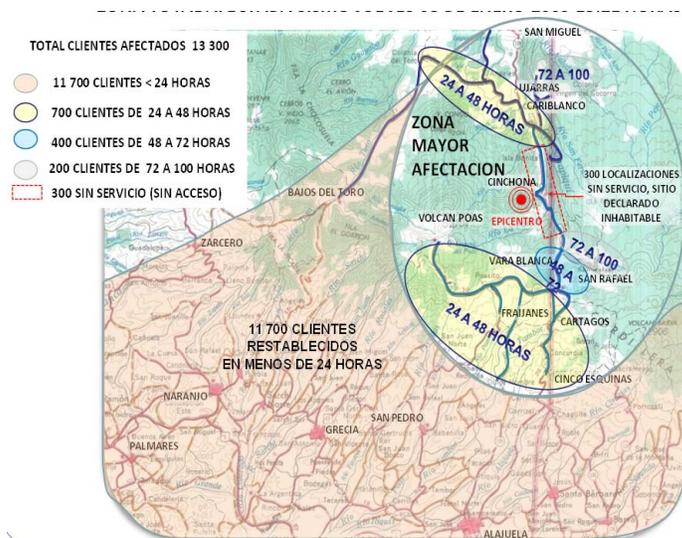


Fig. 6.1: Daños en el sector de distribución del ICE

Sistema de generación

Proyecto Hidroeléctrico Cariblanco: Una cabeza de agua inundó la casa de máquinas del Centro de Producción, generando daños en las obras civiles y electromecánicas; se realizaron acciones de limpieza y normalización de equipos y en casa de máquina, sala de control, reparación de equipos, telefonía y comedor, generadores, tableros de control, equipos mecánicos, sensores. Se adquirieron equipos, revisión estructural, instalación de equipos y pruebas. Rehabilitación de toma y embalse de Cariblanco, Reconstrucción de tomas: María Aguilar, Quicuyal y Sarapiquí, por daños en equipos electromecánicos y derrumbes en la zona.

Proyecto Hidroeléctrico Toro I: Revisión y limpieza de casa de máquinas y tubería, túnel y macizos de tubería. Inspecciones en los ríos Toro, Segundo, Quebrada Gata y Pilas. Reparación de acceso en Río Seco.

Proyecto Hidroeléctrico Toro II: Limpieza del acceso al patio de transformadores de potencia, reparación de grietas y daños en zona de embalse y oficinas, limpieza de atascamiento en la toma de la Quebrada Gata e inspección en tomas menores: Río Claro y Azul, reparación de caminos.

Las plantas privadas de la zona representan 11 734 kW y son las nombradas en el cuadro 6.9.

Cuadro 6.9: Plantas privadas afectadas

Empresa	Planta	Potencia de Contrato	Ubicación
El Ángel S.A.	El Ángel	3 850 kW	Cinchona
Hidroeléctrica Caño Grande S.A	Caño Grande	2 245 kW	Venecia de San Carlos
Hidrovenecia S.A.	Hidrovenecia	2 939.75 kW	Venecia de San Carlos
Suerkata S.A.	Suerkata	2 700 kW	Vara Blanca

Sistema de Transmisión

Tendido eléctrico (cableado e infraestructura complementaria) y posteo con grados diversos de afectación principalmente en las comunidades de Cinchona, Montaña Azul, Vara Blanca, Los Cartagos, Poasito.

Línea de transmisión: Grietas en el revestimiento de concreto, delizamiento en las bases del terreno, debilitamiento de los conos de arrancamiento, curvaturas y deflexiones en montales y elementos de cerramiento o marco a nivel superior de patas que indican asentamientos y desplazamientos diferenciales entre las patas, que pueden aumentar (Fig. 6.2).

Toro - Cariblanco: 29 torres estables

Cariblanco - San Miguel: 118 torres: 6 críticas, 6 para reparación, 106 estables

Se requirió impermeabilizar el área, evaluar la estabilidad, control para detectar movimientos de terreno y verticalidad de la estructura, tratamiento del sitio con inyecciones, micropilotes, muros anclados con tirante, muro o zapatas y/o gaviones anclados, o soluciones conjuntas, reubicar torres 39 y 45, drenaje de terrenos. Reubicar el circuito Cariblanco - San Miguel: Por los daños que se presenta en la línea de transmisión, desde la cercanía a la población de Marsella hasta la zona de Carrizal, se concluyó la necesidad de reubicar el circuito Cariblanco- San Miguel: La ruta posible tiene 20 km de longitud, desde el entronque de Cariblanco hasta Carrizal, siguiendo la margen derecha del Río Sarapiquí.

Circuito Ciudad Quesada - Toro: Torres 75, 76 y 77

Ciudad Quesada - Toro: 99 torres: 2 críticas, 97 estables

Como parte de la colaboración del ICE ante el desastre, invirtió \$750 mil para realizar estudios con equipo especial fotográfico con imágenes aéreas especializadas (Periódico La Nación, 25 febrero 2009, pág. 15).

Mapa de líneas de transmisión y fallas

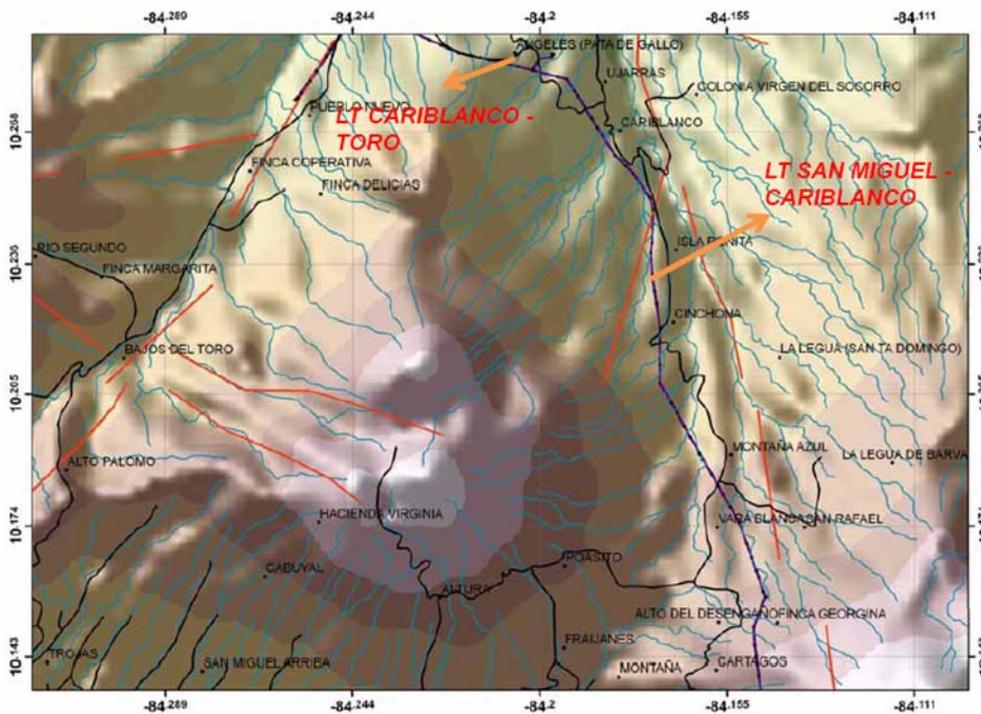


Fig. 6.2: Líneas de transmisión afectadas

Telecomunicaciones

El ICE facilitó servicios de Internet de alta velocidad, sistemas de videoconferencia, radiobases móviles, maquinaria pesada y equipo especial, transporte aéreo y terrestre, instalación de albergues iluminados por alumbrado público, 5 radiobases ubicadas en la zona dañadas y tres de ellas se recuperaron; se envió un sistema de micro bandas y radiobases portátiles para las zonas afectadas.

Tras el evento los usuarios realizaron más de 2,2 millones de llamadas. (Periódico La Nación, 9 enero 2009). En Sarapiquí la postería se falseó, cables de la red convencional fueron arrasados por flujos de lodo en Carrizal de Sarapiquí. La central telefónica sufrió daños en paredes, tapicheles y cielo raso y se dio un cierre de vía con daños en la postería. En Varablanca se afectó la postería y el cableado, así como 50 postes aproximadamente, cable de 100 pares y fibra óptica, postería y cables. Todo ello significó para el ICE en el sector de telecomunicaciones un daño de \$90.171.902 (Informe final CNE).

6.9 SECTOR TRANSPORTES

Este es otro sector donde no se encontró una manera uniforme de presentación de la información, pues desde un principio se encontraron datos que al final contrastaron con otros que resultaron disímiles entre sí. Responsables directos de este sector son el MOPT, el COSEVI, CONAVI.

CARRETERAS

La red vial, así como en otros terremotos fue uno de los elementos más afectados, agravado por las condiciones topográficas de la zona, la cual es sumamente quebrada e irregular. Se vieron afectadas las rutas 712, 126,

130, 146, Ujarrás, La Noble, San Miguel de Sarapiquí, 708, 120, 702, 4, Rancho La Laguna, Toro Amarillo. (Informe oficial del MOPT). Se realizaron trabajos de remoción de derrumbes en ruta 46, ruta 126 Vara Blanca – La Virgen de Sarapiquí, ruta 708 Bajos del Toro, ruta 741 Naranjo y Zarcero, ruta 712 San Isidro de Alajuela – Fraijanes, ruta 120 Volcán Poás – Vara Blanca, donde además se produjeron afectaciones por agrietamientos, desprendimientos en taludes, deslizamientos, entre otros y debieron habilitarse trochas en 26 tramos de carretera afectados por deslizamientos o desprendimientos de la carretera. (Informe oficial del MOPT).

De los informes del MOPT, del COSEVI, de CONAVI o de la CNE no se infiere un tamaño específico del daño en carreteras, ni el costo complementario de la maquinaria trabajando, el traslado de la misma, ni de los trabajadores, ni los expertos en valoraciones y demás. El valor del daño a carreteras de €9.050.985.850, que se presenta en el cuadro 6.10, hace referencia al valor de reposición con asfalto:

Cuadro 6.10: Costos y pérdidas en carreteras

	<i>Longitud</i>	<i>Ancho</i>	<i>Pérdidas</i>	<i>Costos</i>	
Alajuela	11,105	31,5	11 245 000	4 622 017 250	* **
Poás	22,2	83,1	23 921 643	50 221 600	
Valverde Vega					
Heredia	11,4	4	312 587 000	4 318 747 000	***
Barva	1,5	11	10 000 000	10 000 000	
Santa Bárbara				50 000 000	
				9 050 985 850	

Fuente: Informe final de CNE.

- (*) San Isidro: Diseño y construcción de 3 km de Tramo Nuevo (Tramo perdido entre zona catarata de la paz y 2.0 km antes de Cinchona), para un estimado de €2 545 200 000.
- (**) Río Cuarto de Sarapiquí: Derrumbes sobre la calzada, cunetas y espaldones, deslizamientos de carretera que afectan al menos un carril. 7 065 km para un estimado de €2 000 000 000.
- (***) San Rafael de Vara Blanca de Heredia. RN 120, 126, 712 – 11,415 km, para un estimado de €4 000 000 000.

Diversas voces se han alzado en contra de la reconstrucción de la carretera por el mismo sitio que se encontraba, desde funcionarios del MOPT, hasta especialistas universitarios, pero a la fecha, se está construyendo de nuevo por el mismo camino, que puede apreciarse del mapa de carreteras adjunto (Informe No. 19, CNE)

“...sugerimos que la carretera no se vuelva a construir por donde estaba, aumentaría el impacto que ya se dio” (Informe preliminar daños, UNA).

PUENTES

La información referente a puentes es un asunto de difícil tratamiento, pues por ejemplo, en el último informe oficial de la CNE no se hace alusión a nada relacionado, mientras que en informes anteriores (Informe CNE, No. 18), sí se mostraron dichos datos, los cuales son sumamente relevantes por el alto costo que se encuentran asociados a los mismos.

Como parte de las contradicciones en la información, se mencionó que 3 puentes en los cantones de Alajuela, Heredia, Valverde Vega, Poás y Grecia resultaron afectados, que hubo desplazamiento de puente Bailey en estructura colapsada en el Ángel y que 25 estructuras no sufrieron daños (de 28 puentes inspeccionados) (Informe MOPT) y que el 89% de los casos resistieron los movimientos de tierra, cabezas de agua y caídas de terraplenes sobre ellos (Ibid), pero del Cuadro 6.11 puede verse que el daño al final fue de 14 puentes, para €1 617 391 200 en costos.

Solo un puente provisional como el del El Ángel, con una longitud de 21 metros, tiene un valor de €93.5 millones. (Informe No. 18, CNE). Por otro lado, es de resaltar el hecho de que de los puentes que se reemplazaron, uno de ellos fue sustituido en 3 ocasiones, porque el mismo fue afectado por las condiciones naturales en un lapso inferior a 1 mes; al final se colocó un puente de 60 metros de largo, supuestamente con el objetivo de que sus bases no estuviesen tan próximas del cauce y no se viesen afectadas por nuevas crecidas del río. La pérdida de un puente “provisional” solo nueve días después de colocado, instalado en un sitio obviamente inadecuado, falseado y propenso a crecidas y avalanchas, se advirtió ampliamente y era conocido por los responsables institucionales (Periódico La Nación, 17 enero 2009)

Cuadro 6.11: Costos derivados de los puentes afectados

<i>Localización</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Metros</i>	<i>Pérdidas</i>	<i>Costos</i>
Alajuela, Sarapiquí	7	294	636 016 000	1 411 641 200
Poás, Sabana Redonda	3	30	1 750 000	25 750 000
Barva, San José de la Montaña	3	30	130 000 000	130 000 000
Heredia, Santa Bárbara	1	10	50 000 000	50 000 000
			TOTAL	1 617 391 200

Fuente: Informe final por sectores, CNE.

6.10 VIVIENDA Y ASENTAMIENTOS HUMANOS

Como ha sucedido en otros terremotos, la infraestructura habitacional es uno de los rubros que se ven más afectados; instituciones como la CNE, IMAS, MIVAH, Ministerio de Salud, CFIA, voluntarios, IDA, principalmente, han sido los responsables de cuantificar los daños correspondientes en este sector.

Como daños de posible reparación se pueden mencionar: fisuras y grietas simples, deformaciones, destrucción parcial, a través de la Formas de reparación: reparación del elemento o reparación y reforzamiento; como daños imposibles de reparar: fisuras profundas, deformaciones, destrucción total, grietas (CEPAL).

No se incluyen en los apartados de costos lo referente a: demolición y remoción de escombros, previos a la reconstrucción y posteriores a la etapa de ayuda humanitaria, costos para reducir la vulnerabilidad de la vivienda y mitigar los daños ante nuevos fenómenos naturales extremos, costos por estabilizar los suelos, proteger las viviendas o reforzar las estructuras, costos de adquisición y urbanización de terrenos para reubicar viviendas que antes del desastre se encontraban en sitios vulnerables, costos de vivienda temporal que se utiliza mientras se edifican las nuevas unidades o se reparan las que resultaron dañadas.

Debe tenerse en mente la necesidad de una adecuada fiscalización de los trabajos a futuro en las acciones de rehabilitación y reconstrucción, siendo que la construcción es una industria que es percibida particularmente como de poca supervisión gubernamental y que se ubica entre las que requieren mayor control y organización (Transparencia Internacional, Bray, 2005) y para efectos de implementar precisamente un programa de trabajo que ante todos los observadores sea el mejor, se debería prestar la mayor de las atenciones sobre el mismo; ello también es válido dadas las quejas de los habitantes afectados ante la incertidumbre de su situación y lo que en otros momentos incluso se ha dicho con respecto a la reubicación de poblados y que a la postre no se ha concretado.

Alajuela y Poás reportaron el mayor número de viviendas con daño total, 433 y 122 respectivamente, lo que representa un 71,06% de las dañadas y un 23,25% del total de viviendas con algún tipo de daño (2 387 viviendas reportadas). Otras zonas con viviendas reportadas con daño total: Grecia, Heredia, Santa Bárbara y Sarapiquí (226 viviendas). (Informe final por sectores, CNE). La cuantificación de daños en este sector indicó la suma de €20.536.880.000, tal como se muestra en el Cuadro 6.12.

Cuadro 6.12: Estimación de daños en sector vivienda

Cantón	Monto en colones			Sin daño o reinspección	Monto total
	Leve	Parcial	Total		
Alajuela	1 426 880 000	5 166 000 000	4 849 600 000	1 467 200 000	12 909 680 000
Grecia	35 280 000	58 800 000	201 600 000	11 200 000	306 880 000
Poás	188 160 000	1 184 400 000	1 366 400 000	526 400 000	3 265 360 000
Heredia	246 960 000	361 200 000	750 400 000	190 400 000	1 548 960 000
Santa Bárbara	98 000 000	285 600 000	526 400 000	100 800 000	1 010 800 000
Sarapiquí	0	16 800 000	884 800 000	0	901 600 000
Sub total:	1 995 280 000	7 072 800 000	8 579 200 000	2 296 000 000	19 943 280 000
No. Viviendas	524	851	781	235	2 391
No indicado	58 800 000	75 600 000	168 000 000	291 200 000	593 600 000
	2 054 080 000	7 148 400 000	8 747 200 000	2 587 200 000	20 536 880 000

Fuente: CNE, con base en Evaluación de Daños en Infraestructura de Vivienda Lista Consolidada, sistematizada por la CNE al 19/02/09 y 20/03/209, depurada DVAH-MIVAH al 20/03/09, a partir de información recolectada en campo por CNE, MIVAH, CFIA, MINSA IMAS, ICE, Municipalidad de Poás, Alajuela, Santa Bárbara y Profesionales Voluntarios.

Nota: Monto de nivel de daño tomado del Plan de Recuperación Terremoto Cinchona de la Presidencia de la República de Costa Rica, según el siguiente orden: daño leve \$700 parcial \$10 000 total \$20 000, convertido a colones según el tipo de cambio ₡560.

6.11 Aspectos complementarios:

Diversas organizaciones ofrecieron colaborar en la construcción de soluciones habitacionales, como la ONG “Un techo para mi país” que construyó 15 viviendas al 11 de febrero (Diario Extra, 11 febrero), construida de módulos habitacionales de madera, de 18 m² sobre pilotes. Se contó con la ayuda de un número no contabilizado de voluntarios, aunque a esta misma ONG le colaboraron unos 100 voluntarios, recaudaron fondos para unas 200 viviendas y a un costo cada vivienda de \$1 600 (Periódico La Nación, 8 febrero 2009).

Se han reubicado parcialmente familias, como 30 de ellas fueron reubicadas a un proyecto habitacional denominado El Abanico en Peñas Blancas de San Ramón; las viviendas son de 42 m² y cuentan con sala, comedor, cocina y dos dormitorios, valoradas en ₡11 millones. (Diario Extra, 9 febrero 2009). Nuevamente, este valor no se incluye en el detalle final de daños acumulados, aunque podría representar unos ₡330 millones. (Número. 15. COMUNICADO DE PRENSA IDA).

El seguimiento a lo ofrecido para subsanar el daño del terremoto, en las labores de rehabilitación y reconstrucción constituye un difícil reto, tanto por el dicho, como por el cambio de prioridades de las instituciones. Por ejemplo, a través del Proyecto de Ley denominado ATENCIÓN DE POBLADORES RURALES AFECTADOS POR DESASTRES NATURALES se le permitirá al IDA, la compra de una finca para la reubicación del poblado de Cinchona (COMUNICADO DE PRENSA del IDA, 28 enero), pero no será fácil definir la fecha en que ello podría concretarse y sobre la condonación de deudas por compra de tierras y Caja Agraria a los beneficiarios damnificados del IDA (Ibid), aún cuando se mencionó de que dicha condonación era por más de ₡1 500 millones (Periódico La Nación, 5 marzo 2009), tampoco se encontró mayor información complementaria, ni sobre la aprobación por parte de la junta directiva del Banhvi de ₡3 000 millones a la construcción y reparación de las casas más dañadas, especialmente para la reubicación de familias asentadas en los poblados de Cinchona, La Paz y San Rafael de Varablanca (Unidad de Comunicaciones, Enero 13, 2009).

“No sería extraño que haya emigración. Sería algo natural para familias que necesitan buscar empleo. Ojalá no se dé, porque los necesitamos en la zona y porque para un campesino nunca es fácil irse a la ciudad”, opinó Fonseca, dueño del restaurante Varablanca” (Periódico La Nación, 19 enero 2009).

La condición legal de depender de la CNE para la construcción de viviendas llevó a la misma decisión que el MEP, a empresas donantes de viviendas a decir en un principio que ya no realizarían las construcciones de vivienda ofrecidas (Diario Extra, 26 marzo 2009); pero días después, corrigieron su dicho para realizarlas de otra manera.

DONACIONES

Donar es “traspasar graciosamente a otra algo o el derecho que sobre ello tiene” (Definición literal de la Real Academia Española) y la donación es “la liberalidad de alguien que transmite gratuitamente algo que le pertenece a favor de otra persona que lo acepta” (Ib.). Más allá del concepto, la aplicación de la misma, su reglamentación, su recepción y su control en un desastre como este terremoto, no puede decirse que haya sido del todo la más clara a nivel nacional.

En los primeros días, luego de sucedido el hecho, en Comunicado de prensa emitido por la CNE esta menciona:

“La CNE aclara a la población costarricense que no está realizando ningún tipo de recolección de ayudas para la atención de las víctimas de esta tragedia. Hasta el momento, la institución cuenta con los recursos suficientes para la atención de la emergencia en esta primera etapa, en las próximas horas se valorará si es necesario algún tipo de colaboración, con lo cual acudiremos a solicitarlo.”

No obstante, es importante indicar que muchas personas perdieron, no solo sus pertenencias, sino que también sus casas quedaron completamente destruidas. Estas familias van a necesitar mucha ayuda.” (Comunicado de prensa, CNE, 9 enero 2009).

Podría considerarse una contradicción por un lado asegurar que se cuenta con “recursos suficientes” y que “no se está realizando ningún tipo de recolección de ayudas”, pero por otra parte, se menciona que “estas familias van a necesitar mucha ayuda”.

Prácticamente a los dos días de haberse producido el evento y sin que la CNE lo solicitare, se formaron diversos grupos independientes que comenzaron a solicitar ayudas por medio de donaciones. Se emitieron comunicados adicionales por parte de la CNE donde se manifestaba que solo ellos podían recibir donaciones de manera oficial, pero al final, aparentemente debieron abrirse ante esta posibilidad que al fin y al cabo, una importante ayuda les significó y según palabras posteriores, sin ella no hubiesen podido hacerle frente a la situación.

Para coordinar recepción y clasificación de ayudas, el 20 de enero la CNE emitió un nuevo comunicado de prensa donde nombró un grupo facilitador de donaciones con representantes de instituciones estatales y no gubernamentales, tales como la Defensoría de los Habitantes, la Asociación Obras del Espíritu Santo y la Cruz Roja Costarricense, como instituciones que organizarán las contribuciones, bajo la supervisión de la Comisión Nacional de Emergencias, coordinando además la clasificación de alimentos donados, organizando los centros de acopio autorizados y planificando con las autoridades del CNE, el respectivo traslado a los lugares afectados en el momento en que se requieran.

“Las donaciones en especie las canalizará el Comité, pero para donaciones en efectivo únicamente están autorizadas las cuentas oficiales que para ello abrió la Comisión Nacional de Emergencias” (Comunicado de prensa, CNE, 9 enero 2009).

El Comité de donaciones indicó que las únicas cuentas autorizadas para recibir efectivo eran las siguientes, todas a nombre de la CNE: BCR en colones #91100-3 y en dólares #118281-1 y en el Banco Nacional en colones #911-8. (Comunicado de prensa, CNE, 9 enero 2009). No obstante, se manejaron otras cuentas por parte de otras instituciones, tales como: BANHVI, BCR, BAC San José, Banco Nacional de Costa Rica, Banco Popular, CONACCOOP, Coopesarapiquí R.L., Coocafé. Instituciones como el BANHVI a su vez, giraron instrucciones a 17 entidades autorizadas a destinar un porcentaje de su presupuesto anual en la atención prioritaria de afectados; para la recepción de donaciones se

utilizaron además diversas localidades para recibirlas, oficinas de la Cruz Roja en todo el país, Casa Presidencial, Defensoría de los Habitantes, Movimiento de Guías y Scouts con 10.000 miembros recogiendo ayudas, oficinas regionales de ANDE, negocios como Mega súper y Gollo, Hotel SanGildar, San Rafael de Escazú, Colegio Claretiano, maratónicas en diversos sitios, etc.

Ante una cantidad tan grande de entidades recogiendo donativos, surge la duda: ¿De qué manera controla la CNE las donaciones?

“Este es un tema importante. Si usted toma las emergencias de los últimos tres años, se dará cuenta de que en dos o tres hemos recibido donaciones importantes. En las de dinero, depositadas en las cuentas de la CNE, hasta la fecha del 6 de febrero nos han entrado ¢416 millones” (Semanario U, Edición 1794).

Pero pocos días después por diferentes medios, se escuchó de sumas superiores obtenidas por donativos económicos; en una de ellas se dice “Ciudadanos e instituciones aportaron ¢3.150 millones para damnificados, las donaciones por terremoto permanecen ociosas, ¢2 800 millones dispersos en cuentas y fideicomisos para afectados por sismo CNE reporta gastos por ¢357 millones de ¢1 340 millones recibidos (11% del total de fondos recibidos)” (Periódico La Nación, 19 febrero 09).

Se mencionó además en medios de prensa que las bodegas de la CNE estaban desbordadas de comida, ropa y productos de higiene y que el exceso de artículos donados ha generado que las ayudas se repartan sin control ni medida. (Periódico La Nación, 31 enero 09) y en otra información se dijo que sin la anuencia de la CNE, se captaban donaciones en efectivo para los damnificados del terremoto a través del sistema de cuentas electrónicas PayPal (Ibid). Un aporte importante fue del Fideicomiso YO NACI EN ESTE PAIS que depositó un monto de ¢1.850 millones a las cuentas de la CNE, en campaña conjunta con el Banco de Costa Rica, la cual indican los encargados que pretenderán que se utilice en financiar la nueva Cinchona (Periódico La Nación, 4 abril 09).

Aún cuando no se encontró un informe final que incluyese las donaciones recibidas, se adjunta en el Cuadro 6.13 un listado de todas las donaciones recopiladas en diferentes medios de prensa.

Otros costos que debería adicionarse al total de dinero aportado para atender las secuelas del terremoto:

- ¢1 000 000 000 autorizados del superávit acumulado a diciembre del 2008, al Servicio Nacional de Salud Animal (SENASA) y el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE), (¢500 millones cada uno), para que se utilicen en acciones relativas a dar respuesta inmediata, rehabilitación y reconstrucción de las actividades del Sector Agropecuario en la zona de desastre. (La Gaceta No. 43).
- Se han desembolsado ¢4 730 millones por daños en infraestructura de viviendas, fábricas, complejos hoteleros y por riesgos del trabajo. Esto corresponde al 44% de 3.501 reclamos por seguro que se han realizado (Diario La República, Natasha Cambroner). A la planta Hidroeléctrica El Ángel se le desembolsaron ¢1 416 millones, faltando por incluir el lucro cesante (probablemente a la planta hidroeléctrica Suerkata se le estaría cancelando una suma similar) y al hotel Waterfalls Garden se le desembolsaron ¢1 207 millones por los daños que recibieron (Ibid). Reclamos por seguros podrían durar meses y hasta años, de acuerdo con la complejidad de los casos.
- Campos pagados por instituciones en referencia a aspectos propios del manejo de la emergencia, como por ejemplo de Cruz Roja Costarricense (Diario Extra, 10/2/09), Grupo ICE (Una plana Suplemento Somos célebres), AyA, etc.
- Lucro cesante de las empresas de la zona, como la Fábrica El Ángel, donde trabajaban unos 300 operarios y que estaría reubicándose en Ujarrás de Sarapiquí. (Periódico La Nación, 25 febrero 09), Hidroeléctricas, pequeños y medianos productores, hoteles, etc., no se tiene certeza del costo.
- Vuelos aéreos para llevar alimentos y rescatar víctimas, donde se escuchó de unos 89 viajes (Periódico La Nación, 12 enero 09) a un costo aproximado de \$1 600, serían unos \$142 400.
- Más de 16 equipos de evaluación de daños y pérdidas visitando casa por casa y censando a todas las familias golpeadas por el sismo, que visitaron más de 500 familias.
- Unos 15 equipos de trabajo con personal de diferentes instituciones, en labores de búsqueda y rescate en todas las zonas impactadas. (Periódico La Nación, 9 enero 09).

- Subsidio por 130 000 por 3 meses a 600 desempleados para un total de ¢250 millones, entre agricultores, pequeños artesanos y otros (Periódico La Nación, 25 febrero 09).

Cuadro 6.13: Cuadro de donaciones

Donante	Donación
Banco Interamericano de Desarrollo	\$15 000
Cooperación Española	\$115 000
Gobierno de China	\$70 000
Banco Nacional	\$70 000
Organización de Estados Americanos	\$10 000
Gobierno de EEUU	\$35 000
Pueblo de Costa Rica	¢460 000 000
Banco de Costa Rica	¢1 850 000 000
Banco Centroamericano de Integración Económica	\$115 000
Gobierno de España	\$160 000
Total	¢2 900 000 000 LN 30-1 citando fuente CNE
Cruz Roja	¢140 000 000 LN 19-2
Mensajes texto ICE	¢259 200 000 (estimados 109 000 m snm) LN 29-1
Fiestas de Palmares a una familia que lo necesite de los aprox. 275 millones que recibió	¢5 000 000 (4/2 P2 Segunda sección)
Iglesia católica –	¢120 000 000 y enviaron una solicitud a a la Santa Sede y la organización Caritas para más ayudas. LN 28-2 P10.
Colegio Periodistas	¢2 500 000
Naciones Unidas	\$240 000 en cooperación técnica LN 15-1
Corporación de Fomento Ganadero	¢20 000 000 millones
Western Union	\$50 000
CONARROZ	13800 bolsas de 2 kilos de arroz
LAICA	10 000 kilos de azúcar
Sector cafetalero	4 000 bolsas de medio kilo de café
Dos Pinos	Equipos y facilidades
Coca cola	16 800 litros de agua
PIPASA	3 000 kilos de huevos LN 17-1
Fondo de Población de la Organización de Naciones Unidas	2 500 paquetes de higiene personal con lo que se cubre a todos los damnificados”, indicó Saborío. LN 18-1
Estados Unidos	Cuatro helicópteros tipo Black Hawk tripulados durante 4 días.
Colombia	Una aeronave con seis rescatistas.
Francia, México, Venezuela, Chile, Ecuador, Brasil y el Istmo	Ofrecieron ayuda de diversas formas. LN- 14-1
Visita de Dr. Adams y 20 payasos.	(Nación 8/2/9 P. 13)
Concierto por damnificados	costo 2 000 La Nación 6/2 P.9 Tiempo Libre
Fundación M, del Grupo Monge.	¢50 000 para 25 niños efectivo y víveres. DE- 10-2 P14.
Payless –	25 pares de zapatos a niños. DE-14-2 P17
Comunidad de Talamanca –	4 400 kilos de verduras más su transporte. LT- 26-2 P9.
Florida Bebidas –	¢120 000 000 por 13 casas en Tambor de Alajuela en convenio con Hábitat para la Humanidad, LN 27-3 P8.
UCCAEP	100 casas con un valor de 6 millones.
IDA Buscando terrenos.	264 diarios x 6 millones Boletín enero 2009.

Fuente: Las indicadas en cada renglón.

OTROS ASPECTOS NO CUANTIFICADOS:

Donaciones en efectivo y en especies

Ayuda Internacional
Ayuda voluntaria de personas & Profesionales
Estudios de especialistas técnicos &
Remesas al exterior
Daños y necesidades de Niños & Adultos & Estudios &
Mujeres
Visión a futuro de la zona
Diferenciación de daños entre sectores Privado y
Público
Repercusiones en Salud: Atención de Vidas Humanas &
Atención Médica
Animales & Atención médica
Lucro cesante en Empresas
Daño en el sector Trabajo
Ubicación de las fincas por eventuales cambios en los
límites territoriales
Reubicaciones de los poblados
Costo de mantenerse en el sitio y de construir las
carreteras por la misma ruta
Lucro cesante de afectados
Seguros

Otros efectos sociales:

Calendario escolar
Condiciones de salud física, mental y emocional de la
población
Visión de la organización de la gestión de los desastres
en el país
Migraciones
Comportamiento de variables económicas por
influencia directa del sismo: tasas de interés, medios
de producción (MO, materia primas,)
Temas de género
Organizaciones sociales
Incidencia sobre el PIB
Seguros
Adulto mayor
Imagen internacional ante la prevención

Intangibles:

Deterioro social
Daños psicológicos y cambios societales,
Solidaridad o desinterés mostrados frente al
desastre, desesperanza entre quienes no reciben
ayuda.

¿Por qué del daño?

La zona más afectada no supera los 20 km² y estaba casi despoblada, solo con dos o tres pequeños caseríos y la mitad de muertes se dieron en un solo lugar -una soda- y la mayoría a lo largo de la ruta que zanja pendientes casi verticales (Revista Ambientico, Manuel Arguello), lo cual se aproxima a las estadísticas que indican que el 75% de muertes son causadas por el colapso de estructuras civiles, el 63% por colapso de estructuras de mampostería y un 23% por causas no estructurales o post-evento y que los efectos provocados por terremotos son más nocivos que otros desastres (Loaiza & Biondet, referencia en marco conceptual, CEPAL, 2001).

Determinantes del daño fueron las condiciones locales del suelo: elevadas pendientes de la región, saturación de humedad en los suelos, suelos de origen volcánico de baja consistencia, régimen hídrico de la zona y abundancia de quebradas y ríos, muy probable que la deforestación contribuyera a la inestabilidad de los terrenos, la ocupación del suelo presenta un sobreuso importante en el sector de los poblados Los Cartagos y Cinco Esquinas, inestabilidad de los terrenos, aumentando su vulnerabilidad ante amenazas naturales como sismos, altos niveles de precipitación (entre 3.259,6 mm y 4.118,3 mm), inestabilidad de laderas, amenazas naturales como deslizamientos, erosión por pastoreo, barrancos, sismos históricos, fallas geológicas e inundación por acumulación de basura en los cauces, uso del suelo inadecuado (Hernando et al. 2003).

La ubicación de viviendas y carreteras en lugares de fuerte pendiente, definitivamente también contribuyó para que colapsaran y se deslizaran parcial o totalmente. Producto de los abundantes deslizamientos, los ríos modificaron su dinámica debido al aporte de sedimentos a su cauce y los que de todas maneras poseen un potencial de amenaza alto en relación a avalanchas podrían aumentar esta amenaza, especialmente a inicios de la época lluviosa (ríos Poasito, Desengaño, Prendas, Tambor y Alajuela, cercanos a poblados como Fraijanes, Poasito y Los Cartagos).

Además de la magnitud (6,2 grados) y de la cercanía al epicentro, factores como el diseño de edificaciones con problemas estructurales que no siguieron el código sísmico, la pertenencia a grupos sociales de bajos ingresos, como lo evidencia el tipo de material y el diseño de las viviendas, agregados o ampliaciones a la estructura principal.

Ninguna casa sufrió impactos por avalanchas; la topografía de Sabana Redonda no permite la construcción de casas en el fondo de los cauces de ríos o quebradas y muchas construcciones fueron construidas sin la supervisión de un profesional en ingeniería o arquitectura y se otorgaron permisos de construcción en todas las municipalidades, sin que debieran hacerse. (Periódico La Nación, 13 enero 09).

¿Qué razones pudieron provocar que se hicieran las construcciones de esa forma?:

Se podría achacar esta debilidad a la deficiente información técnica que poseían los propietarios en el momento de construir viviendas, lo cual podría indicar un carácter clandestino y si fuese así, la debilidad abarcaría a las instituciones encargadas de evitar este proceder.

Las iglesias, escuelas, restaurantes dañados o destruidos y la única fábrica tenían serias deficiencias constructivas y en contraste, la mayoría de los hoteles de más elevados niveles de control y técnica sufrieron daños menores (Comunicado CFIA).

Se debería realizar una evaluación de las prácticas de construcción. "Una de nuestras grandes preocupaciones es que hay evidencias preliminares de errores gravísimos de construcción, columnas que faltan, casas sobre rellenos con mala compactación... puede ser una señal de mucha edificación, sobre todo rural, que no sigue la normativa", (Herbert Arley Archivo GN /PARA EF).

6.12 Observaciones finales

Luego de una catástrofe surgen muchas voces, principalmente las que hacen referencia a que debieron haberse corregido múltiples elementos para que la misma no se produjese, surgen ofrecimientos varios, voces de alerta, campos pagados, cambios en requisitos legales, etc. hasta que todo queda otra vez en el olvido y vuelve el próximo desastre. Mientras no haya una modificación en la cultura referente a la gestión del riesgo en el país, donde la memoria realmente se utilice, donde no se autoricen permisos en condiciones inapropiadas y el paradigma del desastre se base en una real planificación, no en una actitud improvisada, se seguirán recibiendo los embates de terremotos, inundaciones y demás desastres, algunos más, algunos menos. Un desastre es tal, hasta que afecta al ser humano, no antes.

Algunas consideraciones adicionales a lo que otras voces mencionan que debe hacerse:

¿Cuánto cuesta un desastre?

Como uno de los primeros pasos antes de emitir cualquier planificación financiera, una de las preguntas elementales es ¿cuánto se necesita para realizar la acción? – pues bien, en materia de gestión del riesgo, debería conocerse con mayor detalle el valor real de un desastre, con el fin de tener una aproximación de lo que debe invertirse para minimizar los efectos de los próximos.

Normalización de la información

En materia de recopilación de datos referentes al terremoto, de la misma forma como ha sucedido con un buen número de emergencias acaecidas en el país, se revela un factor común: la dificultad de encontrar una manera estandarizada de recopilar la información relacionada con los diferentes sectores afectados y el lenguaje diferente utilizado por las diferentes instituciones.

Mientras que algunos sectores, facilitan información actualizada y hasta la publican con un sinnúmero de detalles, otros presentan escasa o nula información. Por dicha razón, el dato final de lo que cuesta un desastre como el terremoto de Cinchona, no podrá ser definido con el mayor de los aciertos en este escrito, aunque sí con un amplio margen de proximidad, de acuerdo con el nivel de detalle que se ha utilizado.

Los estudios de la Contraloría determinaron que durante esta administración, la CNE se “autonombró” como unidad ejecutora en diversos proyectos y concentró la estimación del daño ocasionado por la emergencia, la elaboración de la solución, la organización del concurso de compra y la supervisión del control de calidad de los proyectos, siendo esta práctica contraria al principio de legalidad administrativa (Periódico La Nación, 1 abril 09) y que obviamente redundaba en la dificultad de normar la información. Y esta noticia no es nueva, pues tres estudios previos de la contraloría ya lo habían señalado y hasta en medios de prensa de años anteriores se hablaba del asunto (Periódico La Nación, 6 marzo 08).

Oficialización de la información e informes de situación “oficiales”:

Los mismos informes de situación emitidos por la CNE, no guardan una relación coherente entre todos los temas que se incluyen dentro del mismo y ni siquiera en muchos de los casos en la acumulación de la información. Inclusive datos dentro de un mismo informe, difieren de una sección a otra; por ejemplo, un tema tan relevante como la cantidad de fallecidos, se menciona en el último informe oficial que “El sismo principal causó daños importantes a la población ocasionando hasta este informe 20 muertos...” (Informe No. 19, CNE) y en el mismo se indica luego, que los muertos son 23. Esto es una muestra de la necesidad imperativa de normalizar la presentación de la información. Aún cuando una muerte puede cuantificarse en un costo, de acuerdo con valoraciones económicas de daños diversas (como la propuesta por CEPAL), no se presentó en este escrito, por diversas razones. Si a todas las instituciones que intervienen en un evento se les solicita la información con base en una base preestablecida, se tendrán mejores opciones de recibir los datos pertinentes; sino, seguirá quedando a la libre la manera de presentar los datos.

Controles más estrictos sobre las donaciones

Llevar un control pormenorizado de lo recibido y por parte de una entidad directora, con el fin de que un objeto tan noble como una donación, sea utilizado de la mejor manera. Sobre justificar este control...

Planes de emergencia apropiados, con comunicación y seguimiento interinstitucional

Un plan de emergencias no es solo un documento que se escribe para cumplir un requisito, ni es un directorio telefónico, ni una serie interminable de pasos a seguir, ni un adorno en una biblioteca, sino que debe ser un instrumento práctico que sea utilizado y corroborado. Además, debe contarse con personal que sepa qué hacer, cómo dirigir y qué acciones tomar en una situación de desastre, así como establecer las bases de comunicación entre las diferentes instituciones al momento de un evento. Debe saberse qué protocolos de acción seguir, los planes de acción por tomar y sobretodo, que se le de seguimiento a todo lo estipulado.

Dadas las reacciones de diversas instituciones, se encontraron deficiencias en las comunicaciones entre empresas, el ente rector pecó en muchos apartados, muchas personas sin práctica en la materia figuraron y entre otras se mencionó que Asociaciones administradoras de acueductos locales, conocidas como ASADAS, no tuvieron planes de atención de emergencias (Jorge Herrera, UNA).

La falta de poner en práctica acciones en simulacros de valor, fue puesto en evidencia, como además quedó en claro en el sector salud, donde especialistas médicos llegaron incluso a manifestar que “tuvimos que construir procedimientos sobre la marcha”, destacando además la necesidad de una adecuada comunicación (Revista informativa oficial del Colegio de Médicos y Cirujanos, marzo 09).

El impacto sobre la mujer

Además de que la mujer en muchos casos lleva la jefatura del hogar, en los programas de rehabilitación y reconstrucción resulta necesario diseñar programas y proyectos específicos que ellas mismas deberán llevar a la práctica. La gente que trabaja aquí es del pueblo; las mujeres en muchos casos amas de casa y jefas de hogar, suelen trabajar en labores agrícolas y quizá ahora no tienen con qué hacer frente a la situación y no se sabe a ciencia cierta las necesidades de este sector de la población.

Fuentes de información en diarios u otros: Se agradece la valiosa información que se logró recopilar para este capítulo de múltiples fuentes de prensa y de instituciones que amablemente suministraron sus datos. Entre ellas:

1. Diario electrónico Nuestro País, elpais.cr, 10-1-09
2. Informe histórico CNE, vía web
3. Riesgo, memoria y politiquería, Manuel Arguello, revista Ambientico, CRID. No. 184 Enero 2009
4. Periódico La Nación, 12 de enero, 2009
5. Diario Oficial La Gaceta No. 10 del 15 de enero del 2009
6. Los desastres naturales afectan más a los pobres, Buenos Aires, 1985, CRID
7. Periódico La Nación, 18 de enero, 2009)
8. Informe MIDEPLAN, febrero 2008
9. Periódico La Nación, 19 enero, 2009
10. Informa-tico, 31-3-09
11. Informes de situación CNE, No. 8 y No. 10
12. CEPAL
13. La Tribuna, El sismo en cifras, Viernes 9 -1, Informe No. 1, Cruz Roja.
14. Periódico La Nación, 13 enero 2009
15. Informe No. 18, CNE
16. Informe No. 19, CNE

17. Informe final por sectores, CNE
18. SENASA
19. Situación todavía es de emergencia. Lecherías perdieron unos €1.000 millones. Marvin Barquero S. | mbarquero@nacion.com
20. Terremoto 6,2, Producción se reactiva en zonas dañadas por sismo. Irene Vizcaíno | ivizcaino@nacion.com
21. Sector Acueductos: Fuentes y tomas de agua, Informe 19
22. Periódico La Nación, 23 enero 2009
23. Referencia personal de Lic. en enfermería Vanessa Zúñiga Morales, enfermera de la Clínica Bíblica
24. Viceministra de salud, Revista Colegio de médicos y cirujanos, marzo 09
25. Informe N°1. Cruz Roja. Sismo 6.2º, San Pedro de Póas de Alajuela, Costa Rica
26. CCSS gestionó atención médica en zonas de afectadas por el sismo. Diego Coto Ramirez | Infocaja.
27. “Informe preliminar de daños” Universidad Nacional (UNA)
28. Periódico La Nación, 22 marzo 2009
29. (OVSICORI) – 180 deslizamientos
30. Jorge Herrera, coordinador Laboratorio Análisis Ambiental, Escuela Ciencias Ambientales, Universidad Nacional)
31. Alexander Bonilla. LN 19-1
32. LN 29-1 7
33. ([Instituto Costarricense de Turismo](http://es.wikipedia.org/wiki/Instituto_Costarricense_de_Turismo) (ICT) Wikipedia)
34. Periódico La Nación, 29 enero 2009. Página 17a.
35. Sarapiquí no está devastado – Extra 10/2/09 Página 14
36. El tercer y cuarto piso del edificio municipal presentan daños importantes a causa del terremoto del 8 de enero...LN 13-3 P6a
37. Periódico La Nación, 13 febrero 2009). MEP se separa de CNE para arreglar escuelas y colegios. Jairo Villegas S. | jvillegas@nacion.com. “Es más rápido hacerlo por contratación directa que tener que pasar los datos a la CNE”, LN 13-2-09
38. Informe de daños en infraestructura eléctrica, ICE
39. Gravin Mayorga, Presentación ICE en CFIA
40. Periódico La Nación, 25 febrero 2009, pág. 15
41. ICE atiende daños en electricidad y telecomunicaciones en zona del sismo, 09/01/2008 03:45 PM, Carlos Cordero Pérez)
42. Informe oficial del MOPT
43. Transporte: Puentes No. 3.2 del 18
44. Periódico La Nación, 17 enero 2009
45. Transparencia Internacional, Bray, 2005
46. Diario Extra, 11 febrero P. 14
47. Periódico La Nación, 8 febrero 2009 P8
48. Diario Extra, 9 febrero 2009, p.6
49. Emergencia por “Terremoto”: Número. 15. COMUNICADO DE PRENSA IDA
50. COMUNICADO DE PRENSA del IDA 28-1
51. Periódico La Nación, 5 marzo 2009, p. 7
52. Terremoto 6,2 Bahví: reconstrucción de casas requiere más de €7.000 millones Ana Lupita Mora | lumora@nacion.com) y (Unidad de Comunicaciones Enero 13, 2009) UC BP 003- 2008 LuisFer/REA.
53. Unidad de Comunicaciones, Enero 13, 2009).
54. Periódico La Nación, 19 enero 2009).
55. Álvaro Murillo | alvaromurillo@nacion.com (LN-19-1)
56. Diario Extra, 26 marzo 2009, p. 2 Empresas ya no harán casas Extra 26-3 P2
57. Definición literal de la Real Academia Española
58. Comunicado de prensa, CNE, 9 -1-09
59. Gallardo – Semanario U Edición 1794
60. Periódico La Nación, 19 febrero 09), Marcela Cantero. Giannina Segnini | gsegnini@nacion.com
61. Periódico La Nación, 31 enero 09 P5
62. Periódico La Nación, 4 abril 09

63. La Gaceta No. 43, Declaratoria de Emergencia Sanitaria Regional
64. Diario La República, Natasha Cambroner
65. Cruz Roja costarricense no vende donativos – Extra 10/2/09 Pág. 3 1 plana
66. 60% de los negocios de Poás todavía no abren. LN 25-2 P15.
67. Periódico La Nación, 25 febrero 09
68. Periódico La Nación, 12 enero 09
69. Periódico La Nación, 9 enero 09
70. Periódico La Nación, 25 febrero 09) P15.
71. Revista Ambientico, Manuel Arguello
72. Hernando, Ligia, et al. 2003. Manejo y ordenamiento territorial de cuencas de Costa Rica. El caso de la microcuenca del río Poás. Informe final de investigación. Escuela de Ciencias Geográficas. Universidad Nacional. Costa Rica.
73. (Periódico La Nación, 13 enero 09) P29a Daños se podían evitar.
74. (Comunicado CFIA).
75. Herbert Arley Archivo GN /PARA EF, ¡Emergencia! Urge revisión total. Terremoto de Cinchona evidenció que debe mejorar gestión de desastres; hay ajustes a la vista. Edición 702 . [Mario Bermúdez Vives](#)
76. Periódico La Nación, 1 abril 09
77. Periódico La Nación, 6 marzo 08
78. Revista informativa oficial del Colegio de Médicos y Cirujanos, marzo 09.
79. Jorge Herrera, coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES GENERALES, LECCIONES APRENDIDAS Y RECOMENDACIONES

El terremoto de Cinchona ocurrido el día 8 de enero de 2009 a las 13:21 hora local, tuvo una magnitud Mw 6,2 y una profundidad de 4,6 km. Su intensidad máxima en la escala Mercalli Modificada fue de IX en Cinchona, el largo de ruptura fue de unos 12 km, el área de ruptura calculada fue de 67 km² con un deslizamiento promedio de 30 cm. La falla tuvo un movimiento oblicuo, en un plano bastante vertical buzando al este y de tipo dextral, con componente normal que se podría asociar con la ruptura de la falla Ángel-Varablanca.

La zona ha sido afectada por 6 sismos históricos ($5,8 < M < 6,1$) en los últimos 158 años, por lo que la posibilidad de un nuevo sismo fuerte en la zona (intensidades de VII) era alta. Sus daños principales fueron deslizamientos y consecuentes avalanchas en los ríos afectados.

La sismicidad registrada en la zona en los últimos 15 años muestra un área sísmica superficial (prof. < 20 km) hacia el SE de la zona. Se pueden observar tres fuentes principales de actividad: a) al sur-sur-oeste del cráter del Poás, b), al este del Poás y c) Volcán Viejo. El mayor sismo registrado durante este periodo fue de $M_p = 4,5$ el 14 de setiembre de 1992, en la segunda fuente.

La red de estaciones digitales portátiles instalada por el Área de Sismología y Vulcanología del ICE en la zona entre los años 2004 y 2006 registró cerca de 200 sismos locales. De ellos destacan dos enjambres: uno ocurrido en setiembre del 2004 en la zona de Río Cuarto-La Virgen y otro ocurrido en junio y julio del 2005 en el extremo sureste de la falla Ángel-Vara Blanca, donde se produjeron sismos de magnitud moderada; tres de los cuales fueron reportados sentidos en la población de Vara Blanca, cuyas magnitudes fueron entre 3,4 y 4,0.

De acuerdo con los estudios realizados en la Universidad de Costa Rica y en el ICE, de producirse un evento sísmico importante en la zona de Toro era de esperar que su magnitud fuera de 6 a 6,5 generando intensidades MM del orden de VIII en la zona epicentral, aunque no era posible predecir cuándo y dónde exactamente tendría lugar el mismo. Como resultado de la sacudida fuerte es posible que se presenten deslizamientos importantes en laderas inestables y avalanchas de lodo en los ríos que desaguan hacia el norte del macizo del Poás, como el río Toro y sus tributarios. Esto efectivamente sucedió con el Terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009 (Mw 6,2). Desde el punto de vista de amenaza sísmica el ICE diseñó sus proyectos tomando en cuenta los parámetros sísmicos más críticos por lo que las obras no sufrieron mayores daños de tipo estructural.

Las fallas alrededor de la zona son de longitudes entre 6 y 20 km, que cortan secuencias de edades menores a 300-100 ka, por lo que se pueden considerar potencialmente activas, en conjunto con aquellas que han mostrado actividad sísmica histórica. Las más importantes son las fallas San Miguel, Vara Blanca, Carbonera y Volcán Viejo-Aguas Zarcas.

Los graves efectos del terremoto de Cinchona están principalmente relacionados con las condiciones topográficas abruptas de la zona, la deforestación en zonas de pendientes fuertes a moderadas y las construcciones de viviendas y caminos ubicados en sitios de alta pendiente, subsuelo meteorizado y suelos inestables de mala calidad. También se presentan muchos casos de construcciones no apegadas a las recomendaciones del Código Sísmico de Costa Rica y al Código de Cimentaciones en una zona de alto riesgo como lo es la zona entre Varablanca y San Miguel de Sarapiquí.

Con respecto a la posible influencia del terremoto sobre la actividad en el volcán Poás, aunque no la podemos descartar, según los datos históricos que tenemos, en las ocasiones anteriores que han ocurrido terremotos en la zona, estos no han generado ningún efecto importante en la actividad de este volcán.

RECOMENDACIONES

Al menos siete terremotos dañinos han ocurrido históricamente en los alrededores del volcán Poás (1772, 1851, 1888, 1911, 1912, 1955 y 2009) todos con magnitudes entre 5,8 y 6,2. En relación con todos ellos, siempre se han reportado daños tales como deslizamientos y avalanchas de lodo con la consiguiente destrucción de viviendas, fincas, puentes y pérdidas en vidas humanas.

Los estudios de sismicidad realizados por el ICE en la zona del terremoto y alrededores, de 1985 al 2006, evidenciaban no solo lo anterior, sino que es una zona en la que se produce frecuentemente sismos de baja magnitud y, esporádicamente, algunos de ellos son sentidos por la población. Por ello, todo esto fue considerado en los diseños sismo-resistentes de las obras de los proyectos Toro y Cariblanco.

El período de actividad sísmica actual que se inició el 7 de enero con 40 eventos precursoros de magnitudes entre 2,5 y 4,6, tuvo un sismo principal de magnitud 6,2 (Mw) seguido por 272 réplicas con magnitud entre 2,5 y 4,5 del 8 al 11 de enero del 2009 (muchos otros más de magnitudes menores). La mayoría de estas 272 réplicas fueron originadas por la Falla Ángel-Vara Blanca.

Entre el 12 y el 13 de enero fueron sentidos fuertemente tres sismos originados en la región de Toro y 1a de Fraijanes-Carrizal. Igualmente el día 15 de enero se sintió una secuencia de 6 eventos originados en la región del volcán Cacho Negro (ubicados a unos 15 km al este de Cariblanco). Todos estos eventos ocurridos a partir del día 12 de enero, no son réplicas en el sentido estricto, pero sí asociadas a la alteración del campo de esfuerzos regional preexistente que dispara sismos en fallas aledañas a la que indujo el evento del 8 de enero.

Es de esperar que sismos menores sigan ocurriendo en la falla Ángel-Varablanca por un lapso que podría ir desde semanas a varios meses. La tendencia debe ser que la cantidad y la magnitud de los sismos disminuyan en el tiempo. Esto no descarta que vuelvan a haber sismos en otras zonas como parte de los procesos tectónicos del país.

Se han transmitido una serie de rumores verbales y por escrito, que hablan de que un sismo va a ocurrir en las próximas horas o días en un lugar X. Hasta el momento, ningún ente sismológico nacional (RSN: ICE-UCR, OVSICORI) o preventivo (CNE) ha emitido este comunicado y claramente no existen criterios para emitirlo. Lo único que se ha manifestado es que en el país existen un gran número de fallas potencialmente activas y que pueden romper en algún momento del presente siglo.

Todos sabemos que vivimos en un país tectónicamente activo caracterizado por la ocurrencia periódica de terremotos y sismos menores, por lo que la probabilidad de que tiemble fuerte en cualquier momento y lugar es un aspecto geológico intrínseco, que debe de manejarse como una condición propia de nuestra realidad nacional. Pese a que en los últimos 2 siglos casi 50 terremotos dañinos han afectado al territorio nacional, el estado actual de la Sismología no permite realizar una predicción (día, hora y lugar preciso) de un terremoto, a lo sumo pronósticos a mediano y largo plazo.

Los cañones fluviales de los ríos Toro y Sarapiquí y sus tributarios, siempre han presentado problemas de inestabilidad de laderas y de sus carreteras, por lo que este problema no es solo inherente a la presente crisis sísmica, sino que forma parte de procesos geológicos normales en una región tropical lluviosa con suelos volcánicos y laderas de fuerte pendientes. La prevención y el estar alerta por parte del personal ICE, lugareños y turistas, debe de ser una regla permanente.

El volcán Poás está bajo vigilancia por parte de diferentes grupos de vulcanólogos y sismólogos. Las evidencias históricas del comportamiento del volcán indican que en los pasados terremotos ocurridos cerca del volcán en los últimos 250 años, éste no manifestó ningún reactivar o erupción de importancia posterior a la ocurrencia de algún terremoto.

Referente a la tradición popular de las “venas volcánicas”, se puede decir que en gran parte no poseen fundamento científico cuando se les suelen atribuir su ubicación bajo catedrales, iglesias, pueblos, etc. Desde el punto de vista vulcanológico, las denominadas “venas volcánicas” corresponderían con lo que los expertos denominan “chimeneas o conductos eruptivos”, aquellos que alimentan las erupciones

volcánicas. Sin embargo, la distribución de estos diques de alimentación magmática suelen estar cerca de las cimas y flancos superiores de los volcanes, y su ubicación no puede establecerse a menos que la erosión de los ríos los exponga, en sistemas eruptivos extintos.

¿Cómo enfrentar esta situación por parte del personal del ICE, que labora en las zonas cercanas al área epicentral del Terremoto?

1. Los efectos debido a la inestabilidad de laderas en la zona es un elemento del cual se debe proteger a toda la población. El personal del ICE debe evitar en la medida de lo posible acercarse a laderas de fuerte pendiente. Ya hay especialistas del ICE en estos ramos que están haciendo las evaluaciones y recomendaciones del caso.
2. En todas las zonas de trabajo de los proyectos Toro 1, 2 y 3, así como Cariblanco se deberá de implementar, por parte de los coordinadores o responsables de actividad, planes de evacuación y definir las áreas más seguras a las cuales pueda trasladarse el personal en el caso que nuevos sismos severos pudieran presentarse en la zona. Estos planes son independientes de la presente crisis sísmica y deberán de instaurarse y ser una norma en todos los proyectos y obras institucionales.
3. Los ríos de la cuenca del Sarapiquí han recibido un gran aporte de sedimentos a causa de los deslizamientos, por lo que es de esperar que este material sea transferido a zonas bajas por efecto del transporte del agua. Por ello debe establecerse un sistema de vigilancia permanente que dé alertas sobre otras posibles avalanchas en los próximos días, semanas y meses (particularmente en la estación lluviosa), con especial cuidado cuando se presenten fuertes lluvias en las partes altas de la cuenca. Un sistema de alerta por medio de *walkie-talkie* es fácil de instalar y de bajo costo, siempre manteniendo al personal que realice esta labor debidamente protegida. De hecho, ya se ha implementado este sistema en el río Sarapiquí por parte de personal del ICE.
4. El apropiado comportamiento de las obras del ICE ante los sismos ha demostrado que el diseño y la construcción antisísmica fueron efectivos. Esto le brinda seguridad al personal que allí labora y le debe dar confianza.

Recomendación en general:

Costa Rica es un país geológicamente muy activo (deslizamientos, terremotos, erupciones, inundaciones, etc.) y debemos de convivir con esta condición. En la historia sísmica del país desde la Conquista han muerto menos de 500 personas por causa de los terremotos, cifra que se supera en un año y medio por los accidentes de tránsito en Costa Rica.

Alvarado et al. (1988) recalcularon el período de recurrencia para Toro-Fraijanes en $34,5 \pm 10,3$ años, es decir que debió de haber temblado antes del año 2000. Sin embargo, no contaron que se produciría la crisis sísmica de 1990-1991, como resultado del fallamiento superficial. Teniendo en cuenta dicha crisis y los estudios previos de Montero (1986), se puede recalcular en $30,6 \pm 10,6$ años, es decir que se podrá esperar un evento sísmico adverso entre el 2010 y el 2031. Puede ser que este correspondiera al ocurrido en el 2009. Por ello, basándose en los eventos corticales de 1990 y del 2009, se podría especular en la ocurrencia de un nuevo ciclo sísmico, que podría estar representado por el único evento que ya se dio en el 2009 o por dos o cuatro eventos separados entre unos meses (para uno gemelo) hasta 10 años.

Dado este potencial sísmico de la zona y en general en todo el país, para la prevención sísmica en general, se debe enfatizar siempre en:

- a) Construir adecuadamente las edificaciones, bajo la supervisión de un miembro del Colegio de Ingenieros y Arquitectos, siguiendo la normativa del Código Sísmico.**
- a) Utilizar materiales que cumplan con las especificaciones de diseño.**
- a) En lo posible evitar edificar en un terreno no susceptible a asentamientos, deslizamiento, licuefacción, crecidas o tsunami, o consultar a un Geólogo.**

Un sismo importante siempre causará daños y muertes cuantiosos. Luego, inmediatamente, de un terremoto, siempre habrá caos y desorden... es inevitable. La diferencia está en que la preparación de antemano y la calidad de la construcción hacen la diferencia, además de las previsiones que permiten realizar los escenarios y modelos de riesgo y que luego se llevan a la planificación "ex-ante" de las emergencias. Es muy recomendable para el país implementar precisamente lo que se ha pretendido comenzar a montar con el proyecto CAPRA del Banco Mundial. México DF, Bogotá, Manizales y otras ciudades ya tienen sistemas que permiten modelar dónde habrá la mayor cantidad de daños y, en función de los suelos y la hora, saber dónde habrá la mayor cantidad de muertos, las rutas que tendrán problemas de escombros y los obstáculos para los servicios de socorro para llevar a los heridos a los hospitales.

De todas maneras, el mejor seguro al que podría adherirse el país y específicamente la CNE es al de apoyar la investigación sismotectónica, la ingeniería sísmica, la geotecnia, el ordenamiento territorial y los preparativos para emergencias. Sin duda, la capacidad disponible de reacción y la eficiencia de los planes de emergencia, para este sismo fueron superados con creces. Qué pasará en el caso de un sismo de mayor intensidad y con epicentro en el Parque Central?

Referencias

- ALVARADO, G.E., 1988. Comentarios sobre las avalanchas en el río Toro, P.H. Toro II. -8 págs + 2 planos, Inf. Interno ICE, Departamento de Geología.
- ALVARADO, G.E., 2000. Los volcanes de Costa Rica: Su geología, historia y riqueza natural. -xv + 269 p.; EUNED (2^{da} edición); San José.
- ALVARADO, G.E. & CLIMENT, A., 1985. Informe sísmológico para la etapa de avance a la factibilidad (P.H. Toro II). -46 págs. + figuras, Anexo B., Departamento de Geología.
- ALVARADO, G.E. & SCHMINCKE H.-U., 1994. Stratigraphic and Sedimentological aspects of the rain-triggered lahars of the 1963-1965 Irazú eruption, Costa Rica. -Zbl. Geol. Paläont., I, 1993 (1/2): 513-530; Stuttgart.
- ALVARADO, G.E., MORALES, L.D., MONTERO, W. CLIMENT, A. & ROJAS W., 1988. Aspectos sísmológicos y morfotectónicos del extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 9: 75-98.
- ALVARADO, G.E. & SALANI, F.M., 2004: Tefroestratigrafía (40 000 – 2000 a.P.) en el sector Caribe de los volcanes Barva, Congo y Hule, Cordillera Central, Costa Rica. – Revista Geológica de América Central, 30: 59-72.
- ALVARADO, G.E. & SALANI, F.M., 2009: The 6100 B.P. violent phreatomagmatic eruption of Hule Maar, Costa Rica. – IAVCEI-CVS-IAS 3 IMC Conference, Malargüe, Argentina, 2 págs.
- ALVARADO, G.E., SOTO, G.J., ZÁRATE, E. & ZELEDÓN, R., 1989. Evaluación del riesgo volcánico del Poás sobre las obras del P.H. Toro. -44 págs. + figs., Dirección de Planificación Eléctrica, ICE.
- ALVARADO, G.E., MORA, R. & PERALDO, G., 2003. The June 2000 Arancibia Debris Avalanche and Blockslide, Costa Rica. -Landslide News, 14/15: 29-32.
- ARREDONDO, S.G. & SOTO, G.J., 2006: Edad de las lavas del Miembro Los Bambinos y sumario cronoestratigráfico de la Formación Barva, Costa Rica. – Revista Geológica de América Central, 34-35: 59-71.
- AVILÉS, F., 2009. P.H. Cariblanco. Dique de protección a casa de máquinas. Memoria de cálculo. -16 págs., Inf. Interno ICE.
- ALFARO, A., MICHAUD, G. & BIOLLEY, P. 1911: Informe sobre el terremoto de Toro Amarillo, Grecia. Anales del Centro de Estudios Sísmológicos de Costa Rica. -Tipografía Nacional, pp. 33-41.
- AMBROSEYS, N., 1995: Magnitudes of Central American earthquakes 1898-1930. -Geophys. J. Int., 121:545-556.
- ARIAS, O., 2004: Marco Geotectónico. En: Estudio Geológico-Geotécnico para la Factibilidad del P.H. Toro III. -Inf. Interno ICE. Vol. 1, pp. 23-25.
- ARROYO, I.G. & ALVARADO, G.E., 2002. Evaluación geotectónica de la falla San Miguel y alrededores, enfocada en los proyectos hidroeléctricos Cariblanco y Toro III. -Inf. Interno ICE, Área de Amenazas y Auscultación Sismo-volcánica. 25 pp. + plano.
- BARRANTES, J., 2006. Estimación de la amenaza de represamiento en el río Sarapiquí para el análisis de vulnerabilidad en la Casa de Máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Cariblanco. IX Seminario Nacional de Geotecnia, noviembre 2006 (documento digital).

- BARRANTES, J. & JARQUÍN, M.F., 2005. Amenaza de represamientos provocados por deslizamientos en las márgenes del río Sarapiquí en los alrededores de las obras del P.H. Cariblanco. -60 págs., Inf. Interno ICE, UEN Diseño.
- BARQUERO, R., 1995. Proyecto hidroeléctrico Laguna Hule. Estudio sismológico para la etapa de Factibilidad. -11 Págs., Inf. Interno ICE, OSV 95.09-ICE.
- BARQUERO, R., 2000. P.H. Toro III. Estudio sismológico etapa de Factibilidad. -10 págs., Inf. Interno ICE, Exploración Subterránea.
- BARQUERO, R. & CLIMENT, Á., 2002. P.H. Toro III: Estudio sismológico y de amenaza sísmica etapa de Factibilidad. -19 págs., Inf. Interno ICE, Exploración Subterránea.
- BARQUERO, R. & SOTO, G.J., 2003. Estudio de amenaza sísmica y volcánica para la subestación transformadora Cariblanco y su derivación a la línea alterna. -17 págs., Inf. Interno ICE, C.S. Exploración Subterránea.
- BARQUERO, R., BOSCHINI, I. & ALVARADO, G., 2007. Estudio sismo-tectónico para el P.H. Toro 3. -58 págs., Inf. Interno ICE.
- BARQUERO, R. & ALVARADO, G.E., 1992: Los enjambres sísmicos en el arco volcánico de Costa Rica. -Bol. Obs. Vulcanológico Arenal, No 4: 18-30.
- BARQUERO, R. & SOTO, G. 1992: Volcán Poás: Informe sismo-volcánico red portátil digital, periodo marzo-junio de 1991. -Inf. Interno ICE. 46 pp.
- BAUMGARTNER, P.O., MORA, C.R., BUTTERLIN, J., SIGAL, J., GLACON, G., AZÉMA, J. & BOURGOIS, J., 1984. Sedimentación y paleogeografía del Cretácico y Cenozoico del litoral pacífico de Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 1: 57-136.
- BERGOEING, J.P., BRENES, L.G. & MALAVASSI, E., 1983: Geomorfología del Pacífico Norte de Costa Rica (explicación del mapa geomorfológico 1:100 000).- 110 pp. MOPT-IGN-UCR, San José.
- BOMMER, J.J. & RODRÍGUEZ, C.E., 2002. Earthquake-induced landslides in Central América. -J. Eng. Geol., 63 (4): 89-220.
- BORGIA, A., BURR, J., MONTERO, W., ALVARADO, G.E. & MORALES, L.D., 1990: Fault-propagation faults induced by gravitational failure and slumping of the Central Costa Rica Volcanic Range: Implications for large terrestrial and Martian volcanic edifices. - J. Geophys. Res., 89 (95): 14 357 - 14 382.
- CARR, M.J., SAGINOR, I., ALVARADO, G.E., BOLGE, L.L., LINDSAY, F.N., MILIDAKIS, K., TURRIN, B.D., FEIGENSON, M.D. & SWISHER III, C.C., 2007: Element fluxes from the volcanic front of Nicaragua and Costa Rica. - Geochemistry Geophysics Geosystems, 8(6), 22 págs,
- CARR, M., SAGINOR, I., ALVARADO, G.E., BOLGE, L.L., LINDSAY, F.N., MILIDAKIS, K., TURRIN, B.D., FEIGENSON, M.D., SWISHER, C.C., 2007: element fluxes from volcanic front of Nicaragua and Costa Rica. - Rev. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. Vol. No. 8:6:1-22
- CARRILLO, E., ET AL., 2002. *MAMÍFEROS DE COSTA RICA*. EDITORIAL INBIO. HEREDIA.
- EL MENTOR COSTARRICENSE, 1846. *CAMINO AL NORTE*. P. 94.
- CHINCHILLA, M., 2000: Estudio Mineralógico, Físico-Químico y Clasificación de los Suelos del Proyecto Hidroeléctrico Cariblanco (Alajuela, Costa Rica). -154 págs., Tesis de Licenciatura en Ingeniería Agronómica. Universidad Nacional. Heredia.

CIGOLINI, C., KUDO, A.M., BROOKINS, D.G. & WARD, D., 1991: The petrology of Poás Volcano lavas: basalt-andesite relationship and their petrogenesis within the magmatic arc of Costa Rica. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 48: 367-384.

CHOW, V.T., 1959. *Open-Channel Hydraulics*. -680 págs. New York, McGraw-Hill.

CLIMENT, Á., 1991. Algunos comentarios sobre la amenaza sísmica del P.H. Toro. -11 págs., Inf. Interno ICE, Depto. Geología.

CLIMENT, Á., ALVARADO, G.E. & BOSCHINI, I., 2006. P.H. Toro 3: Estudio de Amenaza Sísmica. -22 págs., Inf. Interno ICE.

CLIMENT, A. & ARROYO, I., 2002: P.H. Boruca, Estudio de Amenaza Sísmica. -Inf. Interno ICE. C.S. Exploración Subterránea, PySA. 27 pp + figs.

CLIMENT, A., BARQUERO, R., & ALVARADO, G., 2002: Estimación de la Amenaza Sísmica del P.H. Cariblanco. -Inf. Interno ICE. 11 pp.

CLIMENT, A., BARRANTES, J.M. Y PIEDRA, R., 2009. Registro de aceleraciones ICE, durante la ocurrencia del Terremoto del 8 de enero 2009. Informe Interno ICE. 7 pp.

CRONIN, S.J., NEALL, V.E., LECOINTRE, J.A. & PALMER, A.S., 1999. Dynamic interactions between lahars and stream flow: a case study from Ruapehu volcano, New Zealand. –*Geol. Soc. Amer. Bull.*, 111: 28-38.

DENYER, P. MONTERO, W. & ALVARADO, G.E., 2003. Atlas tectónico de Costa Rica. -81 págs. Ed. Univ. Costa Rica, San José.

DEVOLI, G., DE BLASIO, F.V., ELVERHØI, A. & HØEG, K., 2009. Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and Their Run-out Distance. -*Geotech. Geol. Eng.*, 27: 23-42.

ELLEN, S. D. & FLEMING, R.W., 1987. Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California. -En: J.E. Costa & G. F. Wieczorek (eds): *Debris flows/avalanches: Process, recognition, and mitigation*. *Geol. Soc. Amer. Review in Eng. Geology*, VII: 31-40.

FERNÁNDEZ, A. más 19 co-autores (1997). Mapa Geológico de Costa Rica (1: 750 000). Ministerio del Ambiente y Energía.

FERNÁNDEZ, R., 2002. *COSTA RICA EN EL SIGLO XIX: ANTOLOGÍA DE VIAJEROS*. EDITORIAL UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA. SAN JOSÉ.

GANS, P.B., MACMILLAN, I., ALVARADO, G., PÉREZ, W. & SIGARÁN, C., 2002: Neogene Evolution of the Costa Rican Arc. – Abstract, Geological Society of America 2002 Annual Meeting, Denver, October 2002.

GANS, P.B., ALVARADO, G., PÉREZ, W., MACMILLAN, I., & CALVERT, A., 2003: Neogene Evolution of the Costa Rican Arc and Development of the Cordillera Central. – Abstract, Geological Society of America, Cordilleran Section, 99th Annual, April 2003.

GARITA, F., 1997. *TOPONIMIA DE LA PROVINCIA DE HEREDIA*. EDITORIAL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. SAN JOSÉ.

GÓMEZ, C., 1974. *LOS GOBIERNOS CONSTITUCIONALES DE DON JUAN MORA FERNÁNDEZ 1825-1833*. UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. SAN JOSÉ.

GONZÁLEZ, P., 1976. *RUTA SARAPIQUÍ: HISTORIA SOCIOPOLÍTICA DE UN CAMINO*. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOCIALES. UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. SAN JOSÉ.

- HALL, C., 1984. *COSTA RICA: UNA INTERPRETACIÓN GEOGRÁFICA CON PERSPECTIVA HISTÓRICA*. EDITORIAL COSTA RICA. SAN JOSÉ.
- HILJE, L., 2009. *CINCHONA, DOLOR Y MEMORIA*. INFORMA-TICO, 16-I-2009. 3 p.
- KEEFER, D. & WILSON, R., 1989. Predicting earthquakes-induced landslides with emphasis on arid and semiarid environments. -Publ. Inland Geol. Soc., 2: 118-149.
- LAPORTE, G., 2009. Taludes y Sismos. Comportamiento dinámico de taludes durante el sismo de Cinchona y sus implicaciones al diseño geotécnico. -Bol. Geotécnico Notisuelos, 10: 6-7.
- LAPORTE, M., BARQUERO, R. & CLIMENT, A., 1995: Estudio de Amenaza Sísmica para los P.H. Peñas Blancas, Laguna Hule y el P.G. Miravalles III. -Informe Interno ICE. OSV.95.17. 56 pp.
- LIN, J. AND R.S. STEIN (2004), Stress triggering in thrust and subduction earthquakes, and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults, J. Geophys. Res., 109, B02303, doi : 10.1029/2004JB002607.
- LÓPEZ, A; 1999. Neo-and paleostress partitioning in the SW corner of the Caribbean plate and its fault reactivation potential. Ph.D dissertation, Tübingen Universität, 294 págs.
- LÓPEZ, A; MARSHALL, J.S; CHINCHILLA, A.L; SAK, P.B; CHIESA, S; MESCHEDE, M; ALVARADO, G.E; VILLEGAS, A; CALDERÓN, M; GAZEL. E; BARQUERO, R. 2008. Costa Rica Stress Map: the Sigma Project. Poster IX Congreso Geológico de América Central y 3rd World Stress Map conference, GFZ, Potsdam, 2008.
- MALAVASSI, E., 1991: Magma sources and crustal processes at the terminous of the Central American Volcanic Front. – xxii + 435 págs. Universidad de Santa Cruz, California [Tesis de PhD].
- MARR, W., 2004. *VIAJE A CENTROAMÉRICA*. EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. SAN JOSÉ.
- MARR, W. ET AL., 1999. *VIAJEROS POR EL SARAPIQUÍ: 1853-1859*. MUSEO HISTÓRICO CULTURAL JUAN SANTAMARÍA. ALAJUELA.
- MATUMOTO, T., OHTAKE., M., LATHAM, G. & UMAÑA, J. 1977: Crustal structure in Southern Costa Rica: San José Costa Rica, Instituto Costarricense de Electricidad, Dpto. de Geología, -Inf. Interno. 18 pp.
- MELÉNDEZ, C., 1989. *CARTOGRAFÍA HISTÓRICA DE COSTA RICA: SIGLOS XVI-XIX*. JUNTA DE PROTECCIÓN SOCIAL DE SAN JOSÉ Y COMISIÓN NACIONAL DEL QUINTO CENTENARIO DEL DESCUBRIMIENTO DE AMÉRICA. SAN JOSÉ.
- MIYAMURA, S., 1980: Sismicidad de Costa Rica. -Ed. Universidad de Costa Rica. 190 pp.
- MONTERO, W., 1994: Neotectonics and related stress distribution in a subduction-collisional zone: Costa Rica.- En:SEYFRIED, H. & HELLMANN, W. (eds.): Profil, 7: 125-141, Universität Stuttgart, Alemania.
- MONTERO, W., 2001: Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la microplaca de Panamá.- Rev. Geol. Amér. Central 24: 29-56.
- MONTERO, W., DENYER, P., BARQUERO, R., ALVARADO, G.E., COWAN, H., MACHETTE, M.N., HALLER, K.M. & DART, R.L., 1998: Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Costa Rica and its Offshore Regions.- 63 págs. (+1 mapa). U.S. Geol. Survey, International Lithosphere Program, Major Active Faults of the World, Colorado [Inf. preliminar 98-481].
- MOLINA, C., 2005. *Y LAS MULAS NO DURMIERON ... LOS ARRIEROS EN COSTA RICA. SIGLOS XVI AL XIX*. EDITORIAL UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA. SAN JOSÉ.

- MORA, S. & MORALES, L.D., 1986. Los sismos como fuente generadora de deslizamientos y su influencia sobre la infraestructura y líneas vitales de Costa Rica. –Memoria 4º Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, San José, pp. 201-214.
- MORA, R. & MORALES, L.D., 1992. La susceptibilidad a la inestabilidad de laderas en la zona norte de Alajuela y el terremoto de Fraijanes de 1888. Efectos y previsión. -Rev. Geográf. Amér. Central, 25-26: 311-322.
- MORA, S. & MORA, R., 1994. Los deslizamientos causados por el terremoto de Limón: Factores de control y comparación con otros eventos en Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, vol. Especial Terremoto de Limón, 139-152 pp.
- MORALES, L.D. 1985: Las zonas sísmicas de Costa Rica y alrededores. -Rev. Geol. Amér. Central. 3:69-101
- LAPORTE, M., BARQUERO, R. & CLIMENT, A., 1995: Estudio de Amenaza Sísmica para los P.H. Peñas Blancas, Laguna Hule y el P.G. Miravalles III. -Informe Interno ICE. OSV.95.17. 56 pp.
- MOYA, A., SCHMIDT, V., ROJAS, V., SEGURA, C., CORDERO, E. Y SANOU, O., 2009. Informe preliminar del registro de aceleraciones del sismo del 08 de enero del 2009. LIS-IINI-UCR. 6 pp.
- NOSTRO, C, R.S. STEIN, M. COCO, M.E. BELARDINELLI & W. MARZOCCHI, 1998: Two-way coupling between Vesuvius eruptions and southern Apennine earthquakes (Italy) by elastic stress transfer. J.G.R., 103, pp. 24.487-24.504.
- OBREGÓN, C., 1968. *LA ADMINISTRACIÓN DEL DOCTOR CASTRO 1847-1849*. SEGUNDO TOMO: POLÍTICA EXTERNA. TESIS DE LICENCIATURA. UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. SAN JOSÉ.
- OKADA, Y; 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. BSSA, 82, 1018-1040.
- PENNING-ROWELL, E.C., TUNSTALL, S.M., TAPSELL, S.M. & PARKER, D.J., 2000. The Benefits of Flood Warning: Red but Elusive, and Politically Significant. -J. Inst. Water and Environm. Man., 14: 7-14.
- PERALDO, G. & MONTERO, W. 1999: Sismología histórica de América Central. -Ed. IPGH. 347 pp.
- PÉREZ, W., ALVARADO, G.E. & GANS, P.B., 2006: The 322 ka Tiribí Tuff: Stratigraphy, geochronology and mechanisms of deposition of the largest and most recent ignimbrite in the Valle Central, Costa Rica. – Bulletin of Volcanology, 69: 25-40.
- PIERSON, T.C., 1995. Flow characteristics of large eruption-triggered debris flows at snow-clad volcanoes: constraints for debris-flow models. -J. Volcanol. Geotherm. Res., 66: 283-294.
- PIERSON, T.C., JANDA, R.J., THOURET, J.C. & BORRERO, C.A., 1990. Perturbation and meeting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow, and deposition of lahars. -J. Volcanol. Geotherm. Res., 41: 17-66.
- PROSSER, J. & CARR, M., 1987. Poás volcano, Costa Rica: Geology of the summit region and spatial and temporal variations among the most recent lavas. J. Volcanol. Geotherm. Res., 33: 131-146.
- RED SISMOLÓGICA NACIONAL: -Bol. De la Red Sismológica Nacional.
- RODRÍGUEZ, C.E., 2002. Earthquake-induced landslide. -En: J. Bundschuh & G.E. Alvarado (eds.): Central America: Geology, Resources and Hazards. Taylor & Francis, Londres, 2: 1217-1255.

- ROJAS, L., 1993: Estudio geológico-geotécnico de reconocimiento de un sector del Proyecto Hidroeléctrico Laguna Hule.- 42 págs. (+ 2 apén. y 3 mapas). Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- SANDOVAL, L.F. & 11 co-autores (1982). Mapa Geológico de Costa Rica (1: 200 000). -Ed. Dirección de Geología, Minas y Petróleo, Min. De Industria, Energía y Minas.
- SAPPER, K. 1925: Los volcanes de la América Central. (Libro del mes: 46 pp.). Halle (Saale), Max Niemeyer Verlag, 144 pp.
- SCOTT, K.M., 1988a. Origins, behavior, and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in the Toutle-Cowlitz River system. -74 págs. U.S. Geological Surv. Prof. Paper 1447-A.
- SCOTT, K.M., 1988b. Origins, behavior, and sedimentology of prehistoric catastrophic lahars at Mount St. Helens, Washington. -En: Clifton, H.E. (ed.): Sedimentology consequences of convulsive geologic events: Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 229: 23-36.
- SIMONS, D.B. & RICHARDSON, E.V., 1963. Resistance to flow in alluvial channels. -59 págs., U.S. Geol. Surv. Professional Paper 422J.
- SMITH, G.A. & Fritz, W.J., 1989. Volcanic influences on terrestrial sedimentation. -Geology, 17: 375-376.
- SOTO, G.J., 1999: Geología regional de la hoja Poás (1:50 000).- En: ALVARADO, G.E. MADRIGAL, L.A.. (eds.): Estudio geológico-geotécnico de avance de factibilidad del P.H. Laguna Hule.- 113 págs. (+ anexo). – Inf. Interno, Centros Servicio Diseño y Exploración Subterránea, ICE.
- SOTO, G.J. & ARREDONDO, S.G., 2007: Chronostratigraphic summary of Barva Formation (Costa Rica). – Abstract volume, Workshop to Integrate Subduction Factory and Seismogenic Zone Studies in Central America, junio 18-22, 2007, Heredia, Costa Rica, p. 103 (en cibernsio <http://www.nsf-margins.org/CostaRica2007/index.html>).
- SOTO, G.J., 1990. Consideraciones volcanológicas y tectónicas preliminares del área de Laguna Hule. – Sección de Sismología e Ingeniería Sísmica, ICE, 14 págs.
- SOTO, G.J., 1994: Volcanología Física. – En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (comps.): Atlas Geológico Gran Área Metropolitana. – Editorial Tecnológica de Costa Rica: 131-146.
- SOTO, G.J., 1999: Geología regional de la Hoja Poás. – En: ALVARADO, G.E. & MADRIGAL, L.A. (eds.): Estudio geológico-geotécnico de avance a la factibilidad del P.H. Laguna Hule. –Informe interno Instituto Costarricense de Electricidad, San José, págs. 15-45 + mapa geológico escala 1:50 000.
- SOTO, G.J., PÉREZ, W. & ARREDONDO, S.G., 2008: ¿Cuán extensa y voluminosa es la Formación Tiribí, Costa Rica? Nuevos hallazgos y reinterpretaciones. – Memoria: Programa y Resúmenes, IX Congreso Geológico de América Central y VI Congreso Geológico Nacional, 2-4 de julio del 2008, San José, Costa Rica, p. 184-185.
- TODA, S., R.S. STEIN, K. RICHARDS-DINGER AND S. BOZKUT, 2005: Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquakes stress transfer, J. Geophys. Res., B05S16, doi : 10.29/2004JB003415.
- TOURNON, J., 1984: Magmatismes du Mesozoique a l'actuel en Amérique Centrale: l'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andésites. – Mémoire des Sciences de Terre, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 84-49, 335 págs
- ISTÁN, J.P., BIOLEY, P. & COTS, C. 1912: The Sarchí Earthquake, Costa Rica. -Bull. Seismol. Soc. Amer. V.2:201-208.
- VON FRANTIUIZ, A., 1861. Beiträge zur Kenntniss der Vulkane Costa Ricas. Petermann's Geographische Mittheilungen. Helt IX y Helt X, Gotha: Justus Perthes, 381-385 pp.

VON FRANTZIUS, A., 1999. *LA RIBERA DERECHA DEL RÍO SAN JUAN: UNA PARTE CASI DESCONOCIDA DE COSTA RICA*. MUSEO HISTÓRICO CULTURAL JUAN SANTAMARÍA. ALAJUELA.

WIELAND, M. & MUELLER, R., 2009. Dam safety, emergency action plans and water alarm systems. -Int. Water & Dam Construction, Enero, www.waterpowermagazine.com, 34-38.

WILFORD, D.J. & SCHWAB, J.W., 1982. Soil mass movements in the Rennell Sound area, Queen Charlotte Islands, British Columbia. -En: Proceeding of the Canadian Hydrology Symposium, 521-541.

ZOBIN, V.M., PLASCENCIA, I., REYES, G. & NAVARRO, C., 2008. The characteristics of seismic signals produced by lahars and pyroclastic flows: Volcán de Colima, México. -J. Volcanol. Geotherm. Res., 179: 157-167. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.11.001.
