

RECURRENCIA DE TEMBLORES Y EVALUACION DEL PELIGRO SISMICO DEL
NOROESTE DEL VALLE CENTRAL, COSTA RICA

Geof. Luis Diego Morales
Profesor Asociado, Escuela Centroamericana de
Geología y Centro de Investigaciones Geofísicas,
U.C.R.

Geol. Guillermo Alvarado
Jefe, Sección de sismología e ingeniería sísmica,
Instituto Costarricense de Electricidad
(ICE).

Geof. Walter Montero
Profesor Asociado, Escuela Centroamericana de
Geología y Centro de Investigaciones Geofísicas,
U.C.R.

Ing. Alvaro Climent
Sección de sismología e ingeniería sísmica.
Instituto Costarricense de Electricidad,
(ICE).

RESUMEN

La región noroeste del Valle Central ha sido afectada por cinco temblores moderados ($5 < M \leq 6,5$), de foco superficial y de carácter destructivo, en los años de 1851 y 1888 (Frajanes); 1911, 1912 y 1955 (Bajos del Toro). El período de recurrencia de los terremotos ha sido de 23 ± 22 años. El patrón de isosistas obtenido para estos sismos está caracterizado por áreas mesosísmicas pequeñas, con intensidades máximas entre VII y VIII, y con una rápida atenuación de la sacudida con la distancia. El nivel de sismicidad para los últimos 31 años es muy bajo. Una red local de estaciones sismográficas portátiles, instalada en 1985, registró en promedio un micro temblor ($M < 3$) cada dos días, lo cual coincide con el presente período de quietud de la región. La sacudida del terreno, los deslizamientos y avalanchas de lodo, constituyen los principales peligros sísmicos.

ABSTRACT

The northwest region of the Valle Central has been affected by five moderate earthquakes ($5 < M \leq 6,5$), of shallow focus and typified as destructive, during the years 1851, 1888 (Frajanes), 1911, 1912 and 1955 (Bajos del Toro). The recurrence period of the earthquakes was of 23 ± 22 years. The isosists pattern correspondent for these earthquakes is characterized by small mesoseismal areas, with intensities ranging between VII and VIII, with a rapid attenuation of the shaking with the distance. The seismicity level for the last 31 years is very low. A portable seismographic local network in 1985, recorded an average of one microearthquake ($M < 3$) every two days, which is coincident with the present quiescence period in this region. The seismic shaking of the ground, the landslides and mud flows, represent the main earthquakes hazards.

INTRODUCCION

La region noroeste del Valle Central ha sido afectada en varias ocasiones por temblores dañinos de magnitud intermedia ($5 < M \leq 6,5$), y foco superficial ($h < 20$ km), como los de 1851 y 1888 en Fraijanes; 1911, 1912 y 1955 en Bajos del Toro, y una violenta sacudida con intensidades entre VII y VIII, causadas por el terremoto de Orotina (1924), (Montero, 1983). Enjambres de temblores han sido registrados en los alrededores del volcán Platanar (1980) y en la zona de Varablanca-Poasito-Fraijanes, en 1982 (Morales y Montero, 1984). Temblores de profundidad intermedia ($60 \text{ km} < h \leq 110 \text{ km}$), han sido localizados por la Red Sismológica Nacional (ICE-UCR) en esta región.

Dentro de las características geológicas de la región destacan alineamientos fotogeológicos de cierta importancia, un volcán activo (Poás) y estratovolcanes andesíticos jóvenes e inactivos, con laderas de fuerte pendiente en terrenos volcánicos inestables, y nacientes de numerosos ríos, que junto a las evidencias de la actividad sísmica pasada y reciente, conforman un cuadro de peligros o amenazas geológicas latentes, que aunado al desarrollo socio-económico de la región, aumentan la vulnerabilidad y por lo tanto el riesgo es aún mayor.

Las consideraciones anteriores, motivaron el desarrollo del presente trabajo, con una evaluación de la sismicidad histórica y las características geológicas más relevantes, y la instalación de una red de cuatro estaciones sísmográficas portátiles (Mayo a octubre, 1985) para conocer el estado de la sismicidad actual.

MARCO GEOLOGICO

Geomorfológicamente la región se caracteriza por la presencia de un amplio valle hacia el sur (Valle Central), separado por la Fila El Gorrión, de un angosto valle intermontano al norte (Bajos del Toro), a lo largo del cual corre el río del mismo nombre, limitado por los macizos volcánicos de Palmira-Viejo al oeste y Poás-Congo, al este, (Fig. 1). La presencia de conos volcánicos orientados N-S, sugieren la existencia de fracturas corticales profundas con dicha orientación (Alvarado, 1984),

La región está constituida por rocas volcánicas cuaternarias, incluyendo lavas, rocas piroclásticas y depósitos fluvio-volcánicos. Localmente se encuentran rocas alteradas hidrotermalmente a arcillas y con mineralizaciones de azufre. La morfología de la región es en general muy irregular, con serranías cuyas laderas son de fuerte pendiente, producto de los efectos volcánicos y erosivos, en una área muy fallada y deforestada, con materiales inestables. Los ríos aparentan seguir un control estructural y forman en su mayoría profundas gargantas, que descienden con fuertes pendientes hacia los valles.

La región está limitada por escarpes tectónicos de dirección E-O, al norte por el escarpe de falla de San Miguel-Venecia, y al sur por el escarpe de falla de Alajuela. Se observan fallamientos conspicuos NNO-SSE, como es el caso de las fallas Volcán Viejo, Porvenir, y alineamientos de conos volcánicos en dicha dirección. Otros sistemas de fallas forman patrones conjugados de rumbo NE-SO y NO-SE (Alvarado y Climent, 1985). Una falla significativa de rumbo general N-S, con ligera orientación sureste hacia su extremo sur (Valle

Central), es la falla Carbonera (Fig. 1) que podría estar relacionada con los focos sísmicos destructivos de la región, cuyos patrones de isosistas tienen generalmente su eje longitudinal en la dirección transversal a la sierra volcánica Central, lo cual sugiere la existencia de un fallamiento activo transversal a ella, como ha sido observado por Montero (1983), para estos temblores y el de Patillo (1952), en el flanco noroeste del Volcán Irazú.

DATOS Y METODOS DE ANALISIS

Sismicidad histórica

Se procedió a la recopilación de información en publicaciones y periódicos de la época, así como a entrevistas personales, para conocer los temblores más destructivos de la región y analizar los efectos producidos, para estimar las intensidades (Mercalli Modificada, MM), y construir luego los respectivos mapas de isosistas. Posteriormente, se determinaron los parámetros focales de los temblores destructivos (Tabla 1), utilizando relaciones empíricas, sobre todo en base a datos de intensidad y áreas mesosísmicas.

Estudio de microtemblores

Una red sismográfica portátil de cuatro estaciones, fue instalada en la región durante los meses de mayo a octubre, 1985. Los temblores con una diferencia menor a tres segundos en los tiempos de arribo de las ondas P y S, fueron localizados mediante el programa HYP0-78 (Lee y Lahr, 1971; revisado en 1978). El nivel de actividad de microtemblores por día fue determinado para las diferentes estaciones, usando los temblores con diferencias en los tiempos de arribo de las ondas P y S, menor o igual a dos segundos. Finalmente los epicentros fueron graficados para obtener el mapa de sismicidad local.

Unos pocos eventos de profundidad intermedia ($60 \text{ km} < h < 110 \text{ km}$), y de moderada o baja magnitud, han sido localizados en esta región, por la Red Sismológica Nacional (ICE-UCR). Secuencias sísmicas tipo enjambre, se han presentado durante 1980 (Volcán Platanar y sus alrededores), y 1982 Varablanca-Poasito-Fraijanes, (Morales y Montero, 1984).

CARACTERISTICAS DE LA SISMICIDAD Y SUS EFECTOS

En el estudio de la sismicidad histórica de la región noroeste del Valle Central, se ha podido determinar la ocurrencia de cinco sismos con características destructivas, cuyas intensidades (MM) son mayores o iguales a VII, con magnitudes moderadas ($5 < M \leq 6,5$) y de focos superficiales ($h < 20 \text{ km}$), con aceleraciones máximas entre 20 y 30% de la gravedad. En la tabla 1, se resumen los principales parámetros de la fuente de cada sismo.

Zona sísmica de Fraijanes:

Los temblores destructivos del siglo pasado (28-3-1851 y 30-12-1888) han sido ubicados en la zona de Fraijanes (Morales, 1985), afectando principalmente a los pueblos vecinos y a las ciudades de Alajuela, Heredia y San José. Aunque la distribución geográfica de los daños es similar, la magnitud de los daños fue considerablemente mayor en el evento de 1888. Según el resumen de la Memoria de Gobernación, reproducida en González (1910), (quien a su vez destaca el parecido entre los temblores), el daño en las viviendas y edifi-

cios de Alajuela, Heredia y San José, fue de 201 destruidas, 1226 inutilizadas y 6 desgracias personales.

En el informe presentado por Pittier (1889) al Gobierno, sobre el terremoto de 1888, destaca que le sorprende el poco cuidado con que se construyen las casas en las zonas rurales y en las ciudades e indica que le parece bueno que el Gobierno publique una serie de planos para casas pequeñas y baratas, adaptados a las condiciones del país. Por otra parte, se refiere a los grandes deslizamientos generados por este terremoto, los que alcanzaron proporciones asombrosas, favorecidas por la constitución volcánica y arcillosa del suelo.

De acuerdo con el estudio de intensidades e isosistas de estos temblores (Fig. 2), el área mesosísmica o de mayor concentración de daños es relativamente pequeña y aunque las intensidades decaen rápidamente con la distancia como es lo característico cuando los focos son superficiales, los efectos destructivos fueron todavía notorios en San José, sobre todo por la mala calidad de las construcciones.

Aunque existen alineamientos en la cuenca del río Poás; es difícil poder determinar si corresponden con fallas, y luego si hay relación con las fuentes sísmicas, que han generado estos terremotos. Sin embargo, por los efectos observados y descritos por Pittier (1889), González (1910) y Michaud (1911), y del análisis del fenómeno, resulta razonable suponer una fuente sísmica en la zona de Fraijanes, en donde más recientemente se generó un ejambre de temblores (del 5 al 9 de febrero de 1982), estos fueron sentidos en Fraijanes-Varablanca y Poasito con intensidad de IV y Magnitud 3.3.

Zona Sísmica de Bajos del Toro:

Los informes conocidos sobre la sismicidad histórica de la región, nos indican que los temblores destructivos de esta zona han ocurrido en el presente siglo (29-08-1911; 06-06-1912; 01-09-1955).

El terremoto de 1911, causó la caída de algunas casas, y la formación de muchas grietas y grandes deslizamientos en los alrededores de la población de Bajos del Toro. Varias casas fueron dañadas en Naranjo, Grecia y San Ramón (Alfaro et al., 1911).

La Fila El Gorrión, que es la divisoria de aguas entre el valle de Bajos del Toro al norte y el valle Central al sur, va a ser el escenario de la violenta sacudida del llamado terremoto de Sarchí (1912). El área más afectada por los deslizamientos se localizó en las nacientes de los ríos Anonos (hacia el norte) y Sarchí (hacia el sur), lo que originó represamiento en los ríos, dando origen poco después a grandes avalanchas de lodo que destruyeron, viviendas, caminos y puentes (Tristán et al., 1912).

Los sectores poblados más dañados fueron los de Grecia, Sarchí, Naranjo, San Pedro de Poás y otros pueblos vecinos. La mayor parte de las casas dañadas fueron de adobe, unas pocas de mampostería y de bahareque, las evidencias observadas indicaban que los daños se debieron a construcciones defectuosas y a la mala calidad de los materiales (Tristán et al., 1912).

El terremoto de 1955, afectó a la población de Bajos del Toro y sus alrededores, destruyó viviendas, la ermita, lecherías, y generó grandes desliza-

mientos que ocasionaron la muerte a diez personas (Miyamura, 1980). Daños muy serios fueron reportados en Grecia, San Juanillo y Naranjo. La figura 2, muestra las intensidades y el patrón de isosistas obtenido para estos temblores, caracterizados por una área mesosísmica pequeña y una atenuación de la intensidad con la distancia relativamente rápida, como es de esperarse en eventos de magnitud moderada y focos superficiales.

A pesar de la evidencia de dos fallas geológicas significativas, como son las de Volcán Viejo y Carbonera, además de otros rasgos volcano-tectónicos dominantes, no es posible determinar cual o cuáles son las fallas responsables de estos terremotos, una de cuyas características más notables, es la que han estado precedidos por temblores precursores varios días antes.

Para conocer el nivel de la sismicidad actual en el Valle de Bajos del Toro, una red conjunta (ICE-UCR) de cuatro estaciones sismográficas portátiles, fue instalada en la zona desde el 23 de Mayo hasta el 31 de octubre. Para efectos de la determinación de los parámetros focales de los micro-temblores, fueron utilizados los datos de las estaciones fijas, San Ramón (SRA) y Volcán Poás (VPS2), pertenecientes a la Red Sismológica Nacional (ICE-UCR). Los datos obtenidos, muestran un nivel de actividad sísmica muy bajo (0,6 micro temblores/día), con focos superficiales ($h < 5$ km). Esta baja actividad puede corresponder con un período de quietud sísmica de la región, cuyo período de recurrencia es de 23 ± 22 años. Sin embargo, la serie de tiempo es muy corta para que puedan establecerse mejores parámetros de recurrencia y es posible que las variaciones temporales de la sismicidad asociadas con el fallamiento puedan ser muy largas, con períodos de quietud entre 100 y 200 años para grandes temblores tal y como se ha observado en otras regiones (Allen, 1976). En general, nuestro país es geológicamente joven y por lo tanto tectónicamente activo, por lo que es posible encontrarse nuevas o viejas zonas sísmicas que aún no han sido puestas en evidencia, por un fuerte temblor. De ahí que conociendo el peligro y sus efectos, debemos reducir el riesgo, planificando el uso de la tierra, el desarrollo de infraestructura y recordando que un buen diseño y una mejor construcción pueden ser la diferencia, tal como fue indicado por Pittier (1889) y Tristán (1912) en su oportunidad.

EVALUACION DEL PELIGRO SISMICO Y CONCLUSIONES

La región noroeste del Valle Central (Fig. 1 y 2), ha sido afectada por cinco temblores moderados ($5 < M \leq 6,5$), de carácter destructivo, en los años de 1851 y 1888 (Fraijanes), 1911, 1912 y 1955 (Bajos del Toro). El período de recurrencia con que estos terremotos han sacudido la región es de 23 ± 22 años. Sin embargo, separando las series sísmicas, encontramos que para Fraijanes han transcurrido 98 años, sin que haya ocurrido otro evento importante, lo que aumenta el potencial sísmico de la zona. Mientras tanto, para Bajos del Toro, solo han transcurrido 31 años desde el último terremoto (1955), pero la zona ha tenido también eventos muy cercanos en el tiempo (1911; 1912), aunque no se conocen más datos de siglos atrás, por lo que debe observarse con cautela la evolución de la sismicidad de la región, recordando que los terremotos pasados estuvieron precedidos por temblores precursores varios días antes. No obstante, también en esta región se han presentado varios enjambres sísmicos en los últimos 6 años, sin ningún evento significativo.

El principal peligro sísmico de la región, lo constituye la violenta sacudida del suelo, generada por un foco superficial, que afecta una área res-

tringida, con intensidades (MM) de hasta VIII, con ondas de alta frecuencia que pueden alcanzar localmente, aceleraciones muy altas ($g/2$), (Bolt, 1978).

Como consecuencia de la sacudida del terreno, tenemos destrucción de viviendas y rupturas del suelo que en las áreas de fuerte pendiente o de taludes pronunciados, van a dar lugar a deslizamientos o derrumbes, que pueden represar ríos y originar posteriormente avalanchas de lodo, aumentando los efectos destructivos del temblor, con la posible interrupción de caminos / carreteras, y su impacto en las líneas vitales como ha sido descrito por Mora y Morales (1986).

Al superponer los diferentes patrones de isosistas (Fig. 2), e incluyendo las isosistas obtenidas para el Valle Central por Montero (1983), obtenemos que la región ha sido afectada por intensidades (MM), de VI a VIII, en al menos 6 ocasiones, o sea con una frecuencia de 1 vez cada 22,5 años.

Los patrones de isosistas muestran su eje longitudinal en la dirección transversal a la Sierra Volcánica, lo cual sugiere un posible fallamiento activo en la dirección NNO-SSE, transversal a la cadena volcánica, como ya a sido observado por Montero (1983).

El rango de variación de la aceleración en las áreas mesosísmicas, base en datos de intensidad y de acuerdo a la relación propuestas por Sauter (1979), oscila entre 20 y 30% de la gravedad.

AGRADECIMIENTOS

Un sincero reconocimiento al compañero Geólogo Ricardo Granados y a los profesionales y técnicos de las Oficinas de Geofísica y Geología Básica de Departamento de Geología del ICE, quienes colaboraron en los trabajos de campo, haciendo posible la obtención de valiosa información. Al personal de la Red Sismológica Nacional (ICE-UCR) por su espontánea colaboración en el suministro de datos sísmicos.

BIBLIOGRAFIA

- Alfaro, A.; Michaud, G.; y Biolley, P. 1911: Informe sobre el terremoto de Toro Amarillo, Grecia. Anales Centro Estudios Sismológicos, Tipografía Nacional, 35-41.
- Allen, C.R., 1976: Geological criteria for evaluating seismicity. In: Lomnitz y Rosenblueth, 1976. Seismic risk and engineering decisions, Elsevier, Amsterdam.
- Alvarado, G.E., 1984: Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. XII + 183 págs. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Univ. Costa Rica, San José.
- Bolt, B.A., 1978. Earthquakes, A Primer, Freeman, San Francisco.
- González, C., 1910: Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica 1608-1910. 200 págs. Tipografía de Avelino Alsina, San José, Costa Rica.
- Lee, W.H.K., and Lahr, J.C., 1975: HYPO 71 (revised 1978): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geol. Surv., Open file Report, 75-311.
- Michaud, G., 1911: Nota sobre el epicentro del terremoto del 30 de diciembre de 1888. Anales Centro Estudios Sismológicos, Tipografía Nacional, 9-15.
- Miyamura, S., 1980: Sismicidad de Costa Rica. 190 págs. Ed. Univ. Costa Rica, San José.
- Montero, W., 1983: Aspectos sismológicos y tectónicos del Valle Central de Costa Rica. En: el Sistema fluvial de Tárcoles, Costa Rica. Inst. Geogr. Nac./CONICIT, 75-90.
- Mora, S., y Morales, L.D., 1986: Los sismos como fuente generadora de deslizamientos y su influencia sobre la infraestructura y líneas vitales de Costa Rica. Enviado al IV Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-resistente, San José, Costa Rica.
- Morales, L.D., y Montero, W., 1984: Los temblores sentidos en Costa Rica durante: 1973-1983 y su relación con la sismicidad del país. Rev. Geol. Am. Central, 1:29-56.
- Morales, L.D., 1985: Las zonas sísmicas de Costa Rica y alrededores. Rev. Geol. Am. Central, 3:69-101.
- Pittier, H., 1889: Informe sobre el terremoto de 1888. En: González (1910): Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica, 1608-1910. 200 págs. Tipografía de Avelino Alsina, San José, Costa Rica.
- Sauter, F. 1979: Damage prediction for Earthquake Insurance, II U.S. Conference Earthquake Engineering, Stanford, Calif.

Tristán, J.F., Biolley, P., y Cots, C., 1912. The Sarchí Earthquake, Costa Rica. Seism. Soc. Am. Bull., 2:201-208.

Tabla 1*
Parámetros focales de los temblores destructivos

Fecha	Hora	Lat. N	Long W.	Prof. (h en Km)	Intensidad máxima (MM)	Magnitud $M = M_L = M_S$	Acelerac Rango de Variac. (% de g)
28-3-1851	13:15	10°8'	84°11,7'	15,5	VIII	5,8	20-30
30-12-1888	10:12	10°8'	84°11,7'	12,5	VIII	5,8	20-30
29-8-1911	04:06	10°14'	84°18'	12	VII	5,5	10-20
6-6-1912	06:40	10°11,5'	84°16,5'	17,5	VII	5,5	10-20
1-9-1955	17:33	10°14'	84°19'	12	VIII	5,8	20-30

* Basado en Morales (1985) y Alvarado y Climent (1986), el rango de variación de la aceleración ha sido estimado de acuerdo a la relación propuesta por Sauter (1979).

RESISTENCIA Y DUCTILIDAD EN SECCIONES PREESFORZADAS

DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Ing. Mauricio Nieto Echandi
Instituto Costarricense de
Electricidad

Dr. Juan A. Pastor Gómez
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivos evaluar analíticamente el uso de concreto de alta resistencia en la ductilidad y resistencia de secciones rectangulares preesforzadas.

Se desarrolló un programa de computadora que permite calcular diagramas de momento-curvatura a partir de relaciones constitutivas, de compatibilidad, y de equilibrio.

Se generan diagramas de momento-curvatura de distintas secciones considerando como variables la resistencia del concreto y la cuantía de acero. Los resultados se comparan con las especificaciones del Código ACI 318-83 respecto al uso del bloque rectangular y al límite de falla balanceada.

NOTACION

- A_p : área neta de acero de preesfuerzo
- b : ancho de la sección transversal de concreto
- c : posición última del eje neutro, medida desde la fibra extrema en compresión (borde superior, de la sección)
- CAR: concreto de alta resistencia
- d : profundidad del acero de preesfuerzo
- E_c : módulo elástico del concreto (carga estática)
- E_o : parámetro de la ecuación esfuerzo-deformación de Martínez-Modificada
- f_c : esfuerzo en el concreto (ecuación de Martínez-Modificada)

- f'_c : resistencia a la compresión del concreto a los 28 días
 f_{ps} : Esfuerzo en el acero en el estado último de la sección
 M : momento flexionante
 M_h : capacidad nominal a flexión (estado último)
M.R.: módulo de ruptura del concreto
 Z : parámetro de la curva esfuerzo-deformación del concreto de Martínez-Modificada
 β_1 : parámetro del bloque rectangular de esfuerzo del ACI 318-83
 ϵ : deformación
 ϵ_c : deformación en el concreto en la ecuación esfuerzo-deformación de Martínez-Modificada
 $\bar{\epsilon}_c$: deformación correspondiente a f' en la ecuación esfuerzo-deformación del concreto C_c de Martínez-Modificada
 ϵ_{cu} : deformación última del concreto a compresión
 $\epsilon_{0.85}$: deformación en la rama descendente de la curva esfuerzo-deformación de Martínez-Modificada que corresponde a un 85% del esfuerzo máximo
 ρ_p : cuantía de acero de preesfuerzo $\rho_p = \frac{A_p}{b d}$
 σ : esfuerzo
 ϕ : curvatura, $\phi = \epsilon_c / c$
 ϕ_u : curvatura última
 ϕ_u^* : curvatura correspondiente a un momento flexionante de un 95% del momento máximo que resiste la sección, para la rama descendente de un diagrama de momento-curvatura
 ϕ_y : curvatura correspondiente al instante en que fluye el acero
 ϕ_u / ϕ_y : índice de ductilidad
 ϕ_u^* / ϕ_y : índice de ductilidad modificado
 ω_p : índice de preesfuerzo, $\omega_p = \frac{\rho_p f_{ps}}{f'_c}$