

## Capítulo VIII

### Conclusiones y recomendaciones

#### 8.1 Conclusiones

La Cuenca del Tempisque es considerada estructuralmente por algunos investigadores como Dengo(1962), Kuijpers et al.,(1979 y 1980); Gursky, H.J.(1982); Morales(1983) y Gursky(1998 y 1991) como un sinclinal o graben, cuya estructura o megaestructura ha sido el resultado de una historia tectónica al parecer desde el Jurásico. Estas características de cuenca han sido propicias para la depositación de un espesor considerable de materiales erosionados de las formaciones geológicas adyacentes. Es por esto que se debe de tener en cuenta que la onda sísmica de un posible evento sísmico en el área puede resultar en la transformación de frecuencias y amplitudes que sean de alto riesgo para la infraestructura y la población.

Se determinó que gran parte del área de estudio está formada por depósitos aluviales que pueden representar una amenaza potencial a la amplificación sísmica según se ha determinado en experiencias de terremotos ocurridos, y por lo tanto representar un riesgo, debido a que son los lugares donde por lo general se ubica gran parte de las obras civiles como carreteras, puentes, casas de habitación, etc.

Las características sismotectónicas y sismológicas de la región le proporcionan una alta probabilidad de amenaza sísmica debida a sismos de subducción. Considerando lo anterior se debe tomar en cuenta desde el punto de vista de la ingeniería sísmica las características sismológicas fundamentales de los sismos originados por subducción como lo es el contenido frecuencial, el patrón de radiación de la energía y la distancia de la fuente al sitio de interés con posibilidades de amplificación sísmica. Sin embargo como se mencionó en el Capítulo III el escenario geológico donde ocurren estos sismos como lo es el aumento de la profundidad del plano de subducción desde la fosa hacia el interior del arco y con la variación lateral del plano de subducción que aumenta de profundidad en dirección sureste a noroeste paralelo al eje de la fosa de subducción es muy importante para evaluar la amenaza sísmica de la región. Según Morales & Montero (1984) a pesar de que estos sismos son los que alcanzan mayor magnitud y aportan la mayor cantidad de energía sísmica liberada, estos ocurren generalmente hacia el borde de la costa pacífica y el proceso de ruptura de fallamiento inverso favorece un patrón de radiación de la energía hacia el océano. En vista de lo anterior los resultados del programa parecen indicar que las mayores amplificaciones se dan en rangos de frecuencia similares a los contenidos en los movimientos de estrada utilizados, como bien lo mencionan Atakan y Figueroa (1993) que los registros sintéticos son muy dependientes del registro del movimiento introducido, por ejemplo, si comparamos las frecuencias predominantes dadas en los espectros de Fourier de las aceleraciones en los dos movimientos de entrada utilizados (Anexo 1) con los resultados de las frecuencias predominantes dadas en los espectros de Fourier de las aceleraciones en ambos sismos para los pozos analizados en los tres grupos de estudio (Anexo 2, pozo CN-73), notamos que existe buena correlación con los resultados de la respuesta espectral y las funciones de transferencia. Por otro lado es importante observar la similitud que existe en las funciones de transferencia obtenidas con ambos sismos, principalmente para las mayores amplitudes, a pesar

de que son sismos ocurridos en escenarios geológicos diferentes existe buena correlación en las frecuencias de máxima amplitud en ambos sismos utilizados, sin embargo los factores de amplificación son diferentes en cada sismo y por lo tanto los valores de amplificación dan resultados diferentes, así también como el pequeño desfase observado en ambas funciones de transferencia para la máxima amplitud en ambos sismos, que puede ser explicado por las diferencias en el nivel energético de cada sismo si comparamos los espectros de potencia de las aceleraciones en ambos sismos (Anexo 1). Si comparamos ambos espectros notamos que el nivel energético del sismo de Limón es 1.84 veces mayor que el sismo de Loma Prieta para la máxima amplitud. Los sismos de subducción registrados a larga distancia tienden a tener contenido de frecuencias bajas dependiendo de la distancia de la fuente al sitio donde es registrado. por lo tanto según los resultados del programa y el análisis de la información obtenida, el área de estudio puede estar amenazada en caso de movimientos sísmicos de subducción por oscilaciones del terreno blando en rangos de frecuencia intermedios-altos (0.45-10Hz).

Según los principios básicos del programa el análisis debe ser aplicado a perfiles geológicos ubicados en las partes centrales de las cuencas sedimentarias para evitar los efectos laterales como acuñamientos, interdigitaciones, etc., de los depósitos sedimentarios y las reflexiones y refracciones de las ondas sísmicas debido a las irregularidades de los límites inferiores de las cuencas. No se conoce con exactitud la forma de la cuenca del Tempisque, sin embargo se consideró importante el hecho de que los grupos de pozos de estudio analizados estén ubicados paralelo al rumbo general de lo que se considera el eje del valle sinclinal o graben de la cuenca del Tempisque en la Península de Nicoya, dónde se ubican los mayores espesores los cuales se supone minimizan los efectos laterales del valle sedimentario y las irregularidades del límite inferior de la cuenca.

Las diferencias obtenidas en los valores o rangos del período fundamental del suelo en los tres grupos de estudio y ubicados en tres áreas diferentes parecen estar dados por tres factores fundamentales: cambios en el espesor de los materiales considerados como suelo blando, generalmente disminuyen en sentido noroeste a sureste paralelo a lo que se considera el eje sinclinal o graben de la cuenca del Tempisque; la condición de roca sedimentaria en el basamento del suelo blando, predominante parcialmente en el área del segundo grupo y totalmente en el área del tercer grupo; y a posibles cambios geofísicos de las propiedades del suelo blando o los materiales sedimentarios, quizás dados por diferencias genéticas y diagénesis de los sedimentos derivados de las formaciones geológicas adyacentes. En el ámbito de las aceleraciones espectrales, la parte noroeste del área de estudio comprendida por las Hojas Carrillo Norte y Belén donde se ubica el primer grupo de estudio, los resultados del programa proporcionan valores de máxima amplitud en el rango de períodos dado entre 0.5-1.0 segundos, para un período fundamental de oscilación del suelo aproximado en 0.85 segundos según las correlaciones de los valores espectrales y las funciones de transferencia con ambos sismos. En esta área es donde se ubican los mayores espesores de suelo blando con valores entre los 35-60 metros de espesor. El segundo grupo de estudio ubicado al sureste de la Hoja Belén en la parte central de la región de estudio, los resultados proporcionan un rango de períodos de máxima amplitud similar al primer grupo dado entre 0.5-0.9 segundos, solo que existe cierta tendencia a períodos menores, para un período fundamental de oscilación aproximado en 0.6 segundos

correlacionando los valores espectrales. Sin embargo, las funciones de transferencia en ambos sismos correlacionan mejor los resultados en relación al primer grupo dando un valor aproximado en 0.7 segundos. En esta área donde se ubica el segundo grupo se presentan los espesores intermedios con valores entre los 30-50 metros de espesor. El tercer grupo de estudio ubicado en la parte central y sureste de la región comprendiendo las Hojas Tempisque, Talolinga y Matambú presenta valores de máxima amplitud en el rango de 0.12-0.3 segundos, presentándose dos períodos fundamentales de oscilación del suelo en 0.25 y 0.13 segundos según los datos espectrales. Para este grupo los períodos de mayor amplificación de las funciones de transferencia se correlacionan muy bien con los valores espectrales, dando valores de 0.2 y 0.14 segundos. También estos valores se correlacionan muy bien en ambos sismos utilizados, y se presentan como períodos importantes en las funciones de transferencia del segundo grupo, principalmente aquellos valores menores a 0.26 segundos. Es importante mencionar que estos períodos bajos se presentan también como períodos importantes en los dos movimientos de entrada utilizados, como se puede observar en la tabla 7.1 y las figuras 7.1 y 7.2. Sin embargo en este grupo se presentan los mayores factores de amplificación, tanto que se puede decir que sobrestiman los valores de amplificación, al menos para las amplitudes máximas. En el área de este grupo se presentan los espesores mínimos, menores a los 20 metros con excepción del pozo TAL-122 que es mayor a los 30 metros. El resultado general de que el período fundamental de oscilación del suelo disminuye con la disminución del espesor del suelo blando parecer ser una conclusión evidente de los resultados acorde con los estudios de Seed & Idriss (1982) (Cap IV-18, figs 4.9 y 4.10) y tomando en cuenta las características y los resultados del pozo TAL-122. Sin embargo este concepto no se puede generalizar como un resultado aplicable en cualquier región de estudio y de condiciones de sitio diferentes. A pesar de lo anterior los resultados permiten interpretar que el período fundamental de oscilación del suelo en la región de estudio disminuye de valores máximos cercanos a 1 segundo hasta valores mínimos de 0.12 segundos en dirección noroeste-sureste paralelo a lo que se considera el eje sinclinal o el graben de la cuenca del Tempisque. Una hipótesis para explicar las variaciones en el espesor de los rellenos aluviales y la presencia de roca sedimentaria aflorante y probablemente rocas ígneas del Complejo de Nicoya en la región del tercer grupo de pozos puede ser enfocado en suponer que el eje del supuesto valle sinclinal o bien del graben de la cuenca del Tempisque haya sido inmerso o basculado hacia el noroeste por efectos tectónicos, lo cual provocaría que se presenten mayores espesores de suelo blando en la región noroeste y los mínimos espesores en la región sureste así también como roca aflorante debido al levantamiento donde se ubica el tercer grupo de pozos estudiado.

Como se expuso en el apartado 7.5 los resultados son enfocados en determinar en que rangos de períodos o el valor aproximado del período de oscilación del terreno más que en obtener la magnitud del parámetro amplificado, dado que se determinó que en algunos casos el programa tiende a sobrestimar los valores de amplificación. Sin embargo, según los resultados del programa, las amplitudes máximas de las aceleraciones correlacionando tanto los valores espectrales como los factores de amplificación en los rangos de períodos de mayor amplificación dan valores menores y mayores a 1g (0.6-1.1g) para el caso del primer grupo pozos estudiados. Para el segundo grupo de pozos estudiados los valores son menores a 1g (0.5-0.9g). Para el tercer grupo de pozos estudiados son mayores a 1g (0.4-1.4g) para el caso del sismo de Limón y

menores a  $1g$  (0.3-0.55) para el caso del sismo de Loma Prieta. Los factores de amplificación para este tercer grupo tienden a sobrestimar los valores máximos de amplificación con valores de hasta  $2g$  considerando los espectros de respuesta de ambos sismos.

Las velocidades espectrales por lo general se correlacionan bien con los períodos de amplitud máxima de las aceleraciones, sin embargo por lo general se dan también a períodos mayores en relación con las aceleraciones espectrales de cada grupo, así para el primer grupo tenemos valores entre 1.3-2.2 segundos donde hay amplificación, para el segundo grupo valores entre 0.85-2.18 segundos. Para el tercer grupo de estudio la situación es diferente dado que las mayores amplitudes de la velocidad ocurren en valores de períodos muy similares con respecto a las aceleraciones.

En cuanto a las funciones de transferencia se observa que existe por lo general buena correlación en los períodos especificados en estas con los valores espectrales, principalmente en la máxima amplitud de las funciones de transferencia. Lo anterior se observa mejor en el caso del tercer grupo de estudio. Una interpretación de los resultados puede ser enfocado en suponer que los valores de períodos obtenidos con las funciones de transferencia comparados con los valores de períodos espectrales se obtienen en rangos de frecuencia o períodos que pueden ser aplicados mejor en el dominio de las aceleraciones en cada grupo de estudio, según lo expuesto en el Capítulo IV (apartado 4.2.2.1, pág IV-7) y en el Capítulo VII (apartado 7.3). Lo anterior se interpreta debido a que por lo general se observa que los períodos de amplificación en las funciones de transferencia principalmente para los segundos y terceros valores son menores que los valores espectrales en cada grupo de estudio. De tal forma que los valores de períodos mayores puedan ser aplicados en el dominio de las velocidades.

Debe ser claro en este tipo de trabajos la importancia de la determinación de las propiedades *in situ* desde el punto de vista geofísico de la geología superficial formada por los suelos y rocas para la evaluación de obras críticas. Sin embargo la metodología permite obtener una correlación con sitios de condiciones geológicas similares para una aproximación de los resultados.

La metodología aplicada para obtener los espectros de diseño permitió obtener rangos de período entre 0.5-1.0 segundos o mayores donde se propone que se pueden aplicar las curvas de diseño para la parte noroeste y central de la región de estudio. En la parte central y sureste se propone también que se pueden aplicar las curvas de diseño para rangos de períodos menores con valores entre 0.12-0.5 segundos. Por otra parte los espectros de diseño tienen la ventaja de correlacionar mejor los resultados espectrales tanto a nivel de grupos de estudio específicos como a nivel general. Estos permiten eliminar los valores sobrestimados de las aceleraciones espectrales que en algunos casos son sobrestimados por el programa. Los espectros de diseño recomendados toman en cuenta los períodos investigados, pero deben ser considerados con cuidado ya que el análisis del programa no considera la propagación de ondas superficiales y la directividad de las ondas.

Según los criterios de la FEMA (Federal Emergency Management Agency) los suelos en el área de estudio se pueden clasificar en cuatro tipos: B, C, D y E (roca, suelo muy denso y roca blanda,

suelo blando, suelo muy blando) respectivamente. Es importante mencionar que la clasificación anterior se hizo correlacionando criterios litológicos de las formaciones geológicas y propiedades geofísicas (velocidad de onda cortante, resistividad), que en algunos casos se infieren o son generalizados debido a la escala de trabajo, sumado el hecho de que no se hizo geofísica de campo y laboratorio.

La metodología y la investigación permite obtener una aproximación de las áreas con amenaza de amplificación sísmica y los principales factores involucrados. También identifica áreas donde se debe de tomar en consideración las características de las formaciones geológicas superficiales (suelos rocosos, firme, blando y muy blando) y ayuda a definir factores de amplificación dinámica para perfiles de suelo blando, también permite orientar recursos económicos y trabajo en estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos para el desarrollo de infraestructura civil.

## 8.2 Recomendaciones

Las condiciones de la geología superficial deben ser considerados como instrumento en la toma de decisiones en los proyectos de ordenamiento territorial, desarrollo de infraestructura civil, urbanismo, uso del terreno para actividades agropecuarias, canales de riego y explotación de los recursos naturales. Se considera necesario proseguir con investigaciones sobre el comportamiento sísmico de los suelos de la Península de Nicoya, donde existe infraestructura civil y población amenazada por eventos sísmicos.

Para obras críticas se recomienda geofísica de reflexión y refracción sísmica, como por ejemplo: geofísica de pozos *cross hole*, *downhole* y *borehole* para determinación *in situ* de la velocidad de la onda cortante y los módulos de deformación de suelos y rocas.

Realizar estudios o análisis de amplificación sísmica, no solo en los aluviones sino también en las rocas sedimentarias e ígneas del Complejo de Nicoya.

Los canales de riego por ser estructuras lineales deben someterse a un análisis de vulnerabilidad sísmica, para identificar las áreas más propensas a deslizamientos inducidos, fallas del suelo y rupturas donde puede filtrar el agua.