

**EFFECTOS SOBRE EL TERRENO DEBIDO A
SACUDIDAS SÍSMICAS**

José Morales Soto

*Instituto Andaluz de Geofísica y
Prevención de Desastres Sísmicos*

ESCALAS DE INTENSIDAD

Antecedentes

Durante el terremoto de Nápoles del 16 de Diciembre de 1857, Robert Mallet propuso un método de cuantificación de los efectos sobre el terreno de un gran terremoto. Este método incluía una representación detallada sobre un mapa y una tabulación de los efectos sentidos y daños a los edificios y a la superficie de la Tierra. Siguiendo este método, Mallet trazo líneas sobre un mapa, entre lugares de igual daño o de igual intensidad y pudo determinar el centro de la sacudida sísmica y de aquí identificó la fuente de las ondas sísmicas. A esas líneas que separaban zonas con diferente grado de daños Mallet las denominó como “líneas isosistas”. Asimismo, la distribución de estas líneas isosistas le dio a Mallet una idea de como los daños se atenuaban con la distancia proporcionando una idea del tamaño de terremoto.

Durante los años que siguieron al estudio de Mallet los sismólogos utilizaron la intensidad sísmica como el índice de aplicación más general para identificar el tamaño de un terremoto. La primera escala de intensidad fue desarrollada por Rossi-Forel en el año 1880. Esta escala tiene intervalos de I a X. En 1902 Mercalli introdujo una escala de intensidad más precisa que presentaba valores de I a XII. Una variación de ésta fue realizada por Wood y Nemann con el fin de adaptarla a las condiciones de edificación de California y es la que se conoce como escala de intensidad Mercalli Modificada. También se han desarrollado otras escalas de intensidad en otros países (Rusia, Japón) que han adaptado este tipo de medidas a la tipología de sus construcciones.

En la mayoría de los países de Europa, la escala de intensidad utilizada es la M.S.K. propuesta en 1964 por S.V. Medvedev, W. Sponheuer y V. Karnik en colaboración con un grupo de trabajo constituido por la XII Asamblea General de la U.G.G.I.. En España se utiliza como escala oficial y está incluida dentro de la actual norma sismorresistente.

La intensidad sísmica es pues un parámetro no instrumental que evalúa los efectos producidos, en un lugar determinado, sobre personas, edificios y el terreno. Las escalas de intensidad a pesar de haber evolucionado tratando de dar más importancia a los elementos objetivos que a los subjetivos, presentan algunos defectos que hay que tener presentes a la hora de realizar una evaluación de la intensidad. Así, por ejemplo, la diferencia entre dos grados consecutivos no es comparable a lo largo de toda la escala; esto es debido a que es una medida cualitativa y no cuantitativa. En sus grados altos no es lo suficientemente precisa para poder distinguir inequívocamente entre grandes terremotos, ya que un mismo criterio puede entrar en la definición de más de un grado de intensidad. Además de tener elementos subjetivos en su definición, su interpretación también es subjetiva y así, con la misma descripción de los efectos de un terremoto, puede llevar a dos personas a asignar grados diferentes.

La subjetividad en las escalas macrosísmicas y los problemas de su utilización, así como el hecho de que en algunos casos la intensidad sísmica sea un parámetro insustituible, ha dado lugar a que se busquen definiciones de intensidad basadas en registros instrumentales del movimiento del suelo que puedan suministrar información más precisa y útil a las personas que necesitan de este tipo de información.

Mapas de Isosistas

Cuando se realiza un estudio de las intensidades sísmicas debidas a la ocurrencia de un terremoto en una región determinada se envían cuestionarios relacionados con las descripciones consideradas en la escala de intensidad adoptada a un amplio grupo de habitantes de la región afectada, o bien se llama por teléfono a las zonas afectadas o se personan en el lugar técnicos que se dedican a realizar este tipo de estudios in situ.

Basándose en las respuestas de estos cuestionarios (datos macrosísmicos) bien sea enviados por correo, por teléfono o por los elaborados sobre el propio terreno, se puede dibujar un mapa en el que las áreas de igual intensidad están separadas por las llamadas *Líneas Isosistas*. Los mapas de isosistas resultantes

proporcionan información muy valiosa sobre la distribución de la sacudida del suelo fuera del foco sísmico así como la de identificar el efecto de la geología superficial en la intensidad de la sacudida.

La distribución de las líneas isosistas también indican la proporción en la que los efectos de la sacudida disminuyen con la distancia, proporcionándonos datos sobre las características atenuativas del medio de propagación en esa región. Por ejemplo, líneas isosistas muy estrechas suelen indicar un medio con una alta atenuación, mientras que líneas isosistas muy amplias indican que el medio es muy buen propagador de la energía y por tanto muy mal atenuador de la misma. No obstante, se ha de estudiar en detalle este último caso, pues terremotos con foco profundo dan líneas isosistas muy amplias aunque existen diferencias que pueden discriminar uno u otro caso.

Así, el estudio pormenorizado de la distribución de la intensidad en una región determinada para diferentes fuentes sísmicas puede ser de utilidad para estudios de evaluación de la peligrosidad sísmica, y además para el estudio de los fenómenos de amplificación y atenuación de las ondas sísmicas.

EFFECTOS SOBRE EL TERRENO

Entre los múltiples efectos y daños debidos a un terremoto, algunos de ellos pueden considerarse directamente asociados a las peculiaridades del terreno.

- 1.- Licuefacción.
- 2.- Movimientos de ladera.
- 3.- Grietas
- 4.- Variaciones en caudal de pozos y manantiales.
- 5.- Emanación de gases
- 6.- Aludes, etc..

Por lo limitado de esta este trabajo y por la importancia en la potencialidad de daños sólo se hará mayor énfasis en los dos primeros (licuefacción y movimientos de ladera).

LICUEFACCIÓN

Es una de las causas más típicamente identificadas después de la ocurencia de grandes terremotos.

La licuefacción se define como la transformación de un material granular sólido a un estado fluido denso como consecuencia de un aumento de la presión de poro y una pérdida de la resistencia al esfuerzo de cizalla, con lo cual las deformaciones y los desplazamientos se hacen más grandes.

Este fenómeno ha jugado un importante papel en los movimientos de masas producidos durante el terremoto de Alaska en 1964, o en el de Niigata en 1964, fallos en el terreno que dieron lugar al “vuelco” de edificios en el terremoto de Niigata de 1964.

Cuatro son los tipos de fallo en el terreno que resultan de la licuefacción.

- a. desprendimientos laterales
- b. fallos de flujo
- c. oscilaciones del terreno
- d. pérdida de la resistencia.

a. Incluye a los deslizamientos laterales de bloques superficiales de sedimentos como el resultado de la licuefacción en una capa superficial. Una vez que se produce la licuefacción y se ha transformado una capa superficial en una masa fluida como consecuencia de una sacudida, y si ésta tiene una suficiente duración se puede producir el movimiento de una masa de roca a través de pendientes que pueden oscilar entre $0,3^\circ$ y 3° . Los desplazamientos laterales pueden oscilar entre varios metros e incluso en algunas decenas de metros si las condiciones del suelo son lo suficientemente favorables para la licuefacción y si la sacudida tiene una duración suficiente.

b. Los fallos de flujo son quizás la forma más catastrófica que como consecuencia de la licuefacción casualmente se desarrolla en pendientes mayores de 3° . Este tipo de fallo en el terreno puede desplazar masas de materiales hasta decenas de kilómetros a velocidades muy elevadas (10-20 km/h). Los fallos de flujo pueden darse tanto en condiciones aéreas como subacuáticas y como ejemplo de esto, tenemos los daños ocurridos en Secrad y Valdez en Alaska, durante el terremoto de 1964.

c. Las oscilaciones del terreno se producen si la licuefacción a cierta profundidad y si la pendiente permite asimismo los deslizamientos laterales. Una vez producida la licuefacción en profundidad, las capas situadas por encima de la capa licuefactada se desacoplan y oscilan sobre este substrato licuefactado. Como resultado se producen oscilaciones en el terreno que a menudo se observan como ondas que se propagan. Acompañando a este fallo en el terreno se suelen producir eyecciones de arena, bolas de arena y la apertura y cierre de fisuras en el terreno.

d. La pérdida de resistencia ocurre cuando los suelos pierden la resistencia y se licúan. Se producen grandes deformaciones en el interior de la masa del suelo y pueden dar lugar a vuelcos y hundimientos de estructuras o edificios como consecuencia de que las cimentaciones se realizan sobre estos materiales susceptibles de licuefacción.

Los métodos de evaluación del potencial de licuefacción de una zona ante una sacudida sísmica suelen incorporar tanto mapas de susceptibilidad a la licuefacción como mapas de oportunidad a la licuefacción.

Los factores geológicos e hidrológicos que afectan a la susceptibilidad a la licuefacción son:

- Edad y tipo de los material sedimentarios.
- Grado de cohesión, granulometría, porcentaje de poros de los materiales sedimentarios.
- Profundidad de los acuíferos.

Los mapas de oportunidad a la licuefacción incorporan mapas de periodos de retorno para sacudidas sísmicas que pueden generar licuefacción en materiales susceptibles a este fenómeno. Evidentemente, este tipo de mapas estará fuertemente basada en los mapas de peligrosidad generados para una determinada región.

MOVIMIENTOS DE LADERA

La simultaneidad en la producción de deslizamientos y el registro de movimientos sísmicos ha sido comprobada en multitud de casos. La respuesta a tales movimientos sísmicos es la reactivación de fallas o fracturas, disminución de la resistencia al corte de los materiales, procesos de licuefacción, etc., que conducen fácilmente a los deslizamientos u a otros efectos secundarios, como son los tsunamis de tan negativas consecuencias.

El disparo de deslizamientos debido a sacudidas sísmicas pueden darse bien en condiciones subaéreas o en condiciones subacuáticas.

Movimientos de ladera subaéreos

Hasta trece tipos de movimientos de ladera han sido identificados mediante el estudio de datos de terremotos históricos en todo el mundo. Se pueden agrupar en cuatro grandes clases: Deslizamientos, Desprendimientos, Avalanchas y Flujos.

Deslizamientos

Se trata de movimientos gravitacionales de masas de roca o suelo que deslizan sobre una o varias superficies de rotura al superarse la resistencia al corte en esos planos. La velocidad de los deslizamientos puede ser muy variable, pero en general son procesos rápidos que pueden alcanzar inmensas proporciones. En ocasiones el material deslizado no alcanza un estado de equilibrio al pie de un talud y puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros, alcanzando velocidades altas y pudiendo dar lugar a un flujo si existe la presencia de agua y las propiedades del material presenta las características necesarias.

Tipos de deslizamientos

Deslizamientos traslacionales: La rotura ocurre en favor de planos de debilidad con dirección mas o menos paralela a la superficie del talud e inclinación menor o igual que la cara del talud (fig. 1).

Deslizamientos rotacionales: La rotura profunda o superficial ocurre a través de superficies curvas, que pueden ser o no circulares dependiendo de la uniformidad del material. Generalmente es un movimiento asociado a suelos cohesivos uniformes o a macizos rocosos muy fracturadas y sin estructura bien definida. (fig. 2).

Desprendimientos

Se definen como la caída de bloques de material de un talud, individualizada por planos de rotura con caída libre al menos en parte de su recorrido (fig. 3).

Avalanchas

Son movimientos muy rápidos de una masa de tierra que desciende de una ladera o cae de un escarpe (fig. 4). Las características típicas de las avalanchas son la distribución caótica de bloques de gran tamaño. Estas avalanchas pueden alcanzar velocidades de mas de 100 km/h debido a la importante disminución de la fricción que produce la presencia de aire entre los fragmentos.

Flujos

Los flujos son movimientos de masas más o menos rápidos, característicos de materiales sin cohesión. Principalmente tienen lugar en suelos muy susceptibles que sufren una considerable pérdida de la resistencia con el movimiento. Los materiales que están involucrados actúan, temporalmente como un fluido, sufriendo

una deformación continua y sin presentar superficies de rotura definidas. Los movimientos tipo flujo pueden involucrar a suelos (coladas de barro), derrubios (coladas de derrubios) o fragmentos de rocas (coladas de fragmentos de rocas). La diferencia entre estos últimos tipos y las avalanchas de derrubios o de fragmentos rocosos es la velocidad del proceso, más lento en los flujos y más rápido y súbito en las avalanchas.

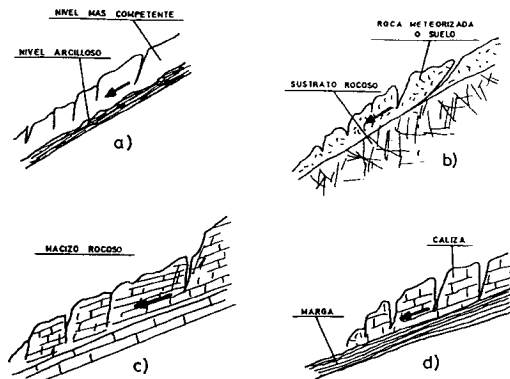


Figura 1. Deslizamientos translacionales en suelos macizos rocosos (Ferrer, 1987).

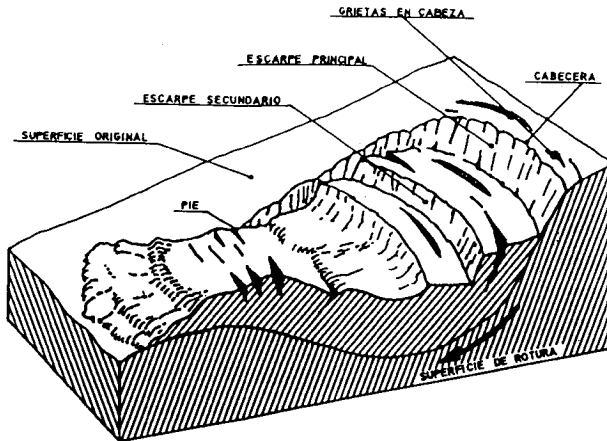


Figura 2. Esquema de deslizamientos rotacionales (Ferrer, 1987).

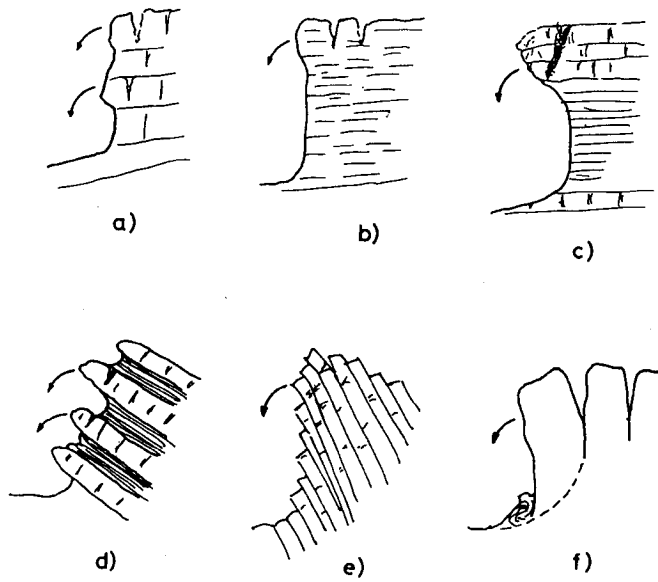


Figura 3. Diferentes tipos de desprendimientos en suelos y rocas (Ferrer, 1987).

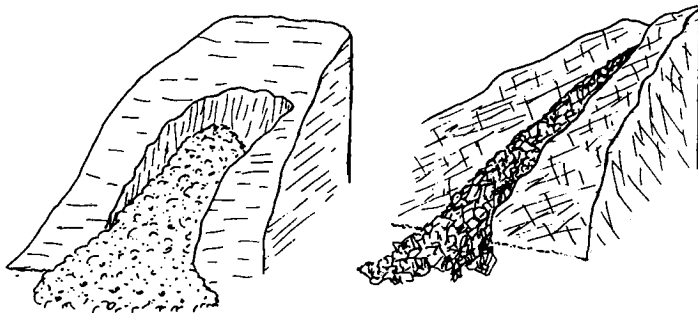


Figura 4. Avalanchas de derrubios y de fragmentos rocosos (Ferrer, 1987).

Movimientos de ladera subacuáticos

La importancia y el grado de potencialidad en la generación de daños de este tipo especial de deslizamientos ha quedado fuertemente reflejada en la literatura que describe los daños debidos a terremotos. Quizás uno de los ejemplos más lamentables que cabe señalar es el tsunami generado por un deslizamiento durante el terremoto de Alaska del año 1964.

Slump: Consisten en el desplazamiento de masas de sedimentos semiconsolidados que implican un cierto movimiento de rotación y un cierto grado de deformación. Suele ser muy abundantes en zonas de taludes continentales.

Debris flow: Se trata de movimientos de flujo que se desarrollan en régimen laminar y tienen lugar con pendientes superiores a 0.5 grados, la velocidad del frente aumenta con el incremento de la pendiente al mismo tiempo que se produce un adelgazamiento de la masa de flujo. Los materiales que afectan a esta clase de movimientos son de muy diversa granulometría y cuando predominan los de lodos y arcillas se habla de "mud flow".

Corrientes de turbidez: Los sedimentos no consolidados pueden incorporarse en mayor o menor medida a una corriente acuosa por el efecto mecánico de las mismas, sobre todo si se trata de limos y arenas. La carga de flujo de turbidez se mantiene por autosuspensión en un estado de equilibrio dinámico.

EJEMPLOS DE EFECTOS SOBRE EL TERRENO DEBIDO A LOS TERREMOTOS DEL 25-XII-1884 (TERREMOTO DE ALHAMA) Y DEL 1-XI-1755 (TERREMOTO DE LISBOA)

Terremoto de Alhama del 25-XII-1884

En la figura 5 se presentan los efectos más significativos sobre el terreno de este terremoto: licuefacción, grietas, deslizamientos, hundimientos, emanaciones de gases y alteraciones en el caudal de fuentes y manantiales.

Debido a las características geomorfológicas de la región afectada durante este terremoto hubo una gran cantidad de desprendimientos en los pueblos de Ízbor, Albuñuelas, Villanueva del Trabuco etc, en los Tajos de Alhama, Tajo Fuerte, Tajo Liso, El Vitrón, El Boquete de Zafarraya, etc, en las Sierras de Enmedio, Marchamonas, Tejada, Alhama, Almijara, Los Guájares etc.. Fueron numerosos los deslizamientos que se produjeron en las Sierras citadas y en los pueblos de Albuñuelas, Güevéjar, Periana etc..

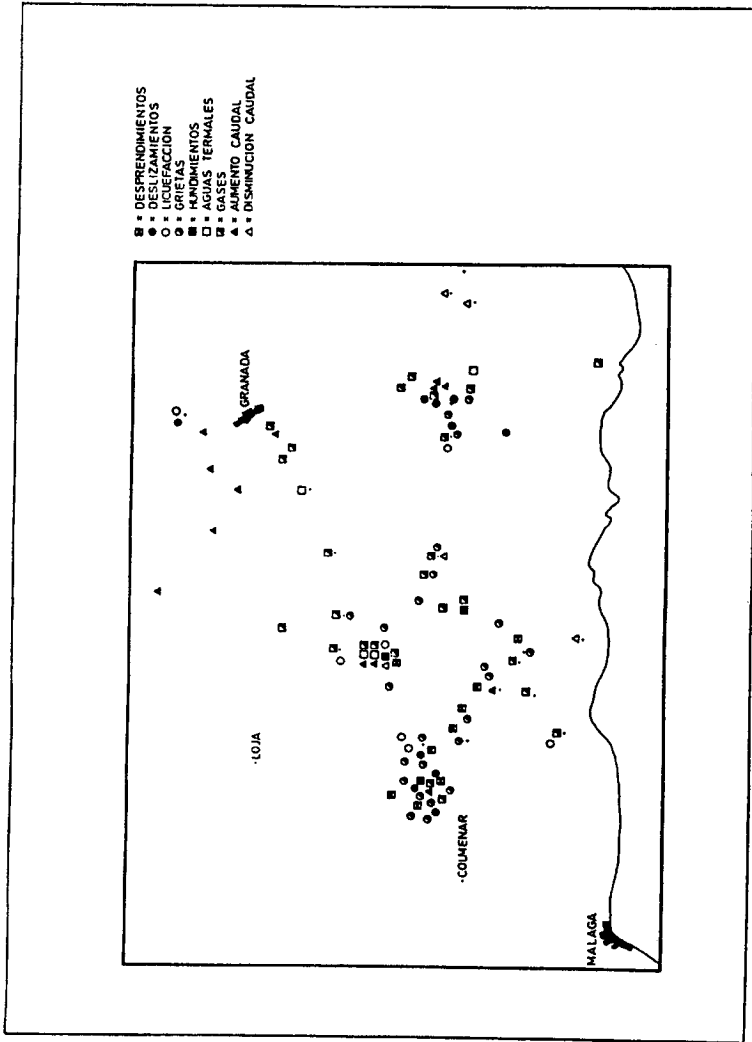


Figura 5. Efectos más significativos producidos por el terremoto de 1884 (Vidal, 1986)

Se formaron gran cantidad de grietas tanto en terrenos sedimentarios como en rocas (referidas sobre todo a las poblaciones con I=IX) pudiendo en algunas de ellas estar ligadas a sistemas de fracturas y otras simplemente al efecto vibratorio de la sacudida sobre el terreno.

Hubo licuefacción en Albuñuelas, Santa Cruz del Comercio, el rio Marchal, Zafarraya, Vélez Málaga y en el río Bermuza.

Terremoto de Lisboa del 1-XI-1755

Comparativamente con el terremoto del 1884 los fallos en el terreno fueron aparentemente menores. No obstante, se han descrito fallos en el terreno a distancias que oscilan 250-300 km para los terrenos que sufrieron licuefacción y hasta 600 Km para deslizamientos. Estas distancias son considerablemente más altas si se comparan con los valores citados con relación a la licuefacción para terremotos mundiales conocidos.

Centrándonos sólo en los efectos sobre el terreno más significativos y olvidándonos de aquellos referentes a desprendimientos de piedras y efectos sobre manantiales que se citan casi por todo el país, los efectos sobre el terreno más significativos se observaron en:

Licuefacción: Se localizaron en zonas de intensidades sufridas por el terremoto I=VIII en España. Se describieron licuefacciones en Sevilla, Ayamonte, Redondela, Bonares, Huelva, Gibraleón, Almonte y Niebla.

Deslizamientos: Se localizaron en Arcos de la Frontera (Cádiz) y en Güevéjar (Granada). En Arcos de la Frontera no se pudo discernir si el fallo en el terreno estuvo asociado a un fallo en el pie del talud por donde discurre el rio o a un deslizamiento propiamente dicho. En Güevéjar las descripciones son más precisas. Este deslizamiento se volvió a repetir en el terremoto de Alhama del 25-XII-1884.

FENÓMENOS DE AMPLIFICACIÓN DEBIDOS A LA GEOLOGÍA SUPERFICIAL

Las características del registro sísmico se pueden considerar como el resultado de un complejo sistema en el que se ven involucrados el tipo de mecanismo de la fuente, el medio de propagación, la geología superficial y la respuesta instrumental.

En los últimos años se ha producido una gran proliferación de trabajos que describían cómo las propiedades físicas de los materiales geológicos bajo el lugar de registro pueden modificar significativamente el nivel de amplitud y contenido espectral del movimiento del suelo registrado en ese lugar.

La distribución de daños en algunos terremotos se explica por el hecho de que la geología superficial amplifica el movimiento en un rango de periodos que coincide con el periodo de vibración de las estructuras dañadas.

Son muchos los ejemplos donde la geología superficial ha influido de manera notable en el nivel de la sacudida, amplificando ciertos rangos de frecuencias. En los casos de terremotos destructores los fenómenos de amplificación local han estado íntimamente relacionados al nivel de daños alcanzados en unas zonas con respecto a otras. Como ejemplos claros de esta relación amplificación-geología superficial, se puede destacar el terremoto de San Francisco de 1906, cuyos efectos fueron primeramente valorados por Wood (1908) quien observó la íntima relación que existía entre los daños y la geología superficial. Otro ejemplo claro de la relación entre la geología superficial-amplificación-nivel de daños se tiene en el terremoto de Caracas del 29 de Julio de 1967. En este terremoto se apreció que las zonas más afectadas estaban íntimamente ligadas con características de la geología en superficie (p.e. espesor del aluvial cuaternario). Dos de los últimos grandes terremotos destructores como el de Michoacan del 19 de Septiembre de 1985 y el de Loma Prieta del 17 de Octubre de 1989 han puesto de manifiesto de forma dramática la relación que existe entre amplificación debido a la geología superficial y el grado de destrozos, observándose como los materiales no consolidados fueron los responsables de importantes modificaciones en la amplitud y contenido espectral de la sacudida producida por dichos terremotos.

Factores geológicos que controlan la respuesta sísmica del sitio

El factor más importante que afecta a la amplificación del sitio es la velocidad de las ondas de cizalla en las capas más superficiales. La velocidad de S es un factor que se utiliza como índice de resistencia, densidad y compactación. Ha sido uno de los factores más estudiados en los últimos años, comprobándose que la variación en los valores de la respuesta estaba en muchos casos asociada a variaciones laterales de la velocidad de las ondas de cizalla en la superficie.

Una explicación de la asociación amplificación-velocidad de S fue expresada por Medvedev (1962) quien asoció los valores de amplificación del movimiento del terreno al contraste de impedancia entre las diferentes interfases.

Por ejemplo, la amplificación de un pico resonante es proporcional al contraste de impedancia, el cual es inversamente proporcional a la velocidad de cizalla en la superficie, asumiendo una velocidad de S constante en el basamento. Si la velocidad de la onda de cizalla varía en forma de gradiente tanto lateral como en profundidad, la resonancia desaparecerá. Así, zonas con altos contrastes de velocidades entre las interfases dan altos valores de amplificación para unos valores de periodos determinados, mientras que zonas con contrastes bajos de velocidades dan valores bajos de amplificación para periodos no muy bien determinados.

Rogers et al (1979, 1985) estudiaron la relación que tenían diferentes parámetros geológicos y geotécnicos con los valores de amplificación en Long Beach y Los Angeles para las bandas de corto, intermedio y largo periodo. Entre estos factores se encuentran la razón de porosidad, el espesor del Cuaternario, la edad de los materiales, el espesor del Holoceno, la profundidad del acuífero, la textura de los materiales, la profundidad del basamento, el grado de compactación y la velocidad de ondas de cizalla.

Casi todos estos parámetros están relacionados con la velocidad de las ondas de cizalla, por lo que una determinación de la estructura de velocidades de la onda S permite caracterizar en parte la característica dominante de la respuesta local en ese sitio.

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA LOCAL

El intento por acercarse a un conocimiento más detallado sobre cual va a ser el comportamiento sísmico de un lugar determinado como consecuencia de un terremoto ha dado lugar a diferentes técnicas o formas de evaluar la respuesta sísmica. Las técnicas de abordar el problema se pueden resumir en: razones espectrales de terremotos y/o explosiones, análisis espectral de microtemores, análisis de regresión y simulaciones numéricas.

Razones espectrales de terremotos y/o explosiones

Es sin duda el método más empleado para valorar los efectos de la geología superficial sobre el movimiento sísmico. Bajo condiciones de linealidad los efectos de la geología superficial pueden ser cuantificados a través de su función de transferencia; sea S_{ij} el espectro calculado de una señal de longitud T para la componente j en la estación i y S_{ji} el espectro para la misma componente en una estación de referencia. Si suponemos que los sistemas que modifican la

señal desde la fuente a cada estación de registro son lineales, invariantes y causales, la función de transferencia F_{ij} del sitio i respecto de la estación de referencia vendrá dada por la razón espectral para cada frecuencia (k/T).

Esta relación será válida para aquel rango de frecuencias en el que la relación señal/ruido sea favorable, ya que el ruido añadido es una fuente de no causalidad.

Supongamos que la función temporal $s(t)$ que se obtiene en un registro es el resultado de varios procesos lineales, causales e invariantes y pueden expresarse en general como:

$$s(t) = f(t) * p(t) * g(t) * r(t)$$

donde:

- $s(t)$ es la señal registrada en una estación
- $f(t)$ es la fuente del terremoto
- $p(t)$ es la propagación de las ondas a través del medio.
- $g(t)$ es la geología local
- $r(t)$ es la respuesta instrumental.

La señal es pues el resultado de la convolución de las funciones $f(t)$, $p(t)$, $g(t)$ y $r(t)$. Su transformación al dominio de la frecuencia vía transformada de Fourier, hace que $S(W)$ sea el resultado de multiplicar los espectros de las demás funciones:

$$S(w) = F(w) \cdot P(w) \cdot G(w) \cdot R(w)$$

Tomando registros simultáneos, bajo idénticas condiciones instrumentales en un lugar sedimentario y en un lugar rígido (tomado como referencia) y dividiendo el espectro obtenido en el primero (S_s) por el segundo (S_r), se puede obtener la función de transferencia del lugar $G(W)$ como:

$$\frac{S_s}{S_r} = \frac{F(w) \cdot P(w) \cdot G(w) \cdot R(w)}{F(w) \cdot P(w) \cdot R(w)} = G(w)$$

Análisis espectral de microtemores

Los microtemores representan vibraciones del terreno producidas por fenómenos naturales (frentes atmosféricos, reacciones geotérmicas, olas marinas etc) y/o fuentes artificiales (tráfico, maquinaria pesada, etc..).

Son dos, de forma general, las vías de utilizar los microtremores con el fin de evaluar la respuesta sísmica en un lugar determinado: métodos en los cuales se utilizan los espectros de los microtremores para determinar periodos dominantes o cambios en la amplitud espectral para periodos determinados y razones espectrales de microtremores de forma similar a la realizada con los terremotos y/o explosiones.

No obstante, los estudios de respuesta local utilizando microtremores con el fin de estudiar la respuesta local en un determinado lugar ha de realizarse con cuidado, ya que no siempre los microtremores dan una información directa y precisa de la respuesta del sitio. Así pues, este tipo de estudios han de ir acompañados de otros análisis como las razones espectrales de terremotos que verifiquen la igualdad entre ambos métodos.

Análisis de regresión

Este tipo de análisis al igual que en otros campos trata de aplicar técnicas estadísticas a datos reales con el fin de determinar el grado de correlación que existe entre una variable dependiente con una o más variables independientes.

Modelos numéricos para la simulación de la respuesta

Los modelos numéricos suponen un avance en la comprensión de las características de la respuesta local, pero su aplicación a una estructura real exige un conocimiento más detallado no sólo de la estructura de una región determinada, sino también de los valores de diferentes parámetros físicos en dicha región. La aplicación de los modelos numéricos no siempre resuelven de una forma adecuada la función de transferencia en un lugar o sitio determinado, y además, exige una fuerte infraestructura en modernos y rápidos medios de computación.

REFERENCIAS

FERRER, G.; (1987); "Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas". En Riesgos Geológicos. IGME (editor). 175-192. Madrid, 1987.

MENDVEDEV, J.V.; "Engineering Seismology". Moscow Academia Nauk. 260 pp.

ROGERS, A.M.; TINSLEY, J.C.; HAY, W.; KING, K.W.; (1979); "Evaluation of the relation between near surface geological units and ground response in the vicinity of Long Beach". Bull. Seism. Soc. Am., 69, 1603-1622.

ROGERS, A.M.; TINSLEY, J.C.; BORCHERDT, R.D.; (1985); "Predicting ground response". In Ziang, J.F. (editor). Evaluating earthquake science perspective. U.S. Geologic Survey Professional paper BG. O. pp 221-248.

VIDAL, F.; (1986); Sismotectónica de las Béticas Centrales y el Mar de Alborán". Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

APÉNDICE I

Efectos que definen los grados de intensidad MSK

- a) Los efectos sentidos por las personas y percibidos en su medio ambiente.
- b) Los daños producidos en las construcciones según sus diversos tipos.
- c) Los cambios advertidos en la naturaleza.

Tipos de construcciones

Tipo A: Con muros de mampostería en seco o con barro, de adobes, de tapial.

Tipo B: Con muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, entramados de madera.

Tipo C: Con estructura metálica o de hormigón armado.

Términos de cantidad.

Los términos de cantidad utilizados en la definición de los grados de intensidad corresponden aproximadamente a los siguientes porcentajes:

Algunos5%

Muchos.....50%

La mayoría.....75%

Clasificación de los daños en las construcciones

Clase 1- Daños ligeros: Fisuras en los revestimientos, caída de pequeños trozos de revestimiento.

Clase 2- Daños moderados: Fisuras en los muros, caída de grandes trozos de revestimiento, caída de tejas, caída de pretilas, grietas en las chimeneas e incluso derrumbamientos parciales en las mismas.

Clase 3- Daños graves: Grietas en los muros, caída de chimeneas de fábrica o de otros elementos exteriores.

Clase 4- Destrucción: Brechas en los muros resistentes, derrumbamiento parcial, pérdida de enlace entre distintas partes de la construcción, destrucción de tabiques y muros de cerramiento.

Clase 5- Colapso: Ruina completa de la construcción.

Descripción de los grados de intensidad MSK

Grado I: La sacudida no es percibida por los sentidos humanos, siendo detectada y registrada solamente por los sismógrafos.

Grado II: La sacudida es perceptible solamente por algunas personas en reposo, en particular en los pisos superiores de los edificios.

Grado III: La sacudida es percibida por algunas personas en el interior de los edificios y sólo en circunstancias muy favorables en el exterior de los mismos. La vibración percibida es semejante a la causada por el paso de un camión ligero. Observadores muy atentos pueden notar ligeros balanceos de objetos colgados, más acentuados en los pisos altos de los edificios.

Grado IV: El sismo es percibido por personas en el interior de los edificios y por algunas en el exterior. Algunas personas se despiertan, pero nadie se atemoriza. La vibración es comparable a la producida por el paso de un camión pesado con carga. Las ventanas, puertas y vajillas vibra. Los pisos y muros producen chasquidos. El mobiliario comienza a moverse. Los líquidos contenidos en recipientes abiertos se agitan ligeramente.

Grado V:

a) El sismo es percibido en el interior de los edificios por la mayoría de las personas y por muchas en el exterior. Muchas personas que duermen se despiertan y algunas huyen. Los animales se ponen nerviosos. Las construcciones se agitan con una vibración general. Los objetos colgados se balancean ampliamente. Los cuadros golpean sobre los muros o son lanzados fuera de su emplazamiento. En algunos casos los relojes de péndulo se paran. Los objetos ligeros se desplazan o vuelcan. Las puertas o ventanas abiertas baten con violencia. Se vierten en pequeña cantidad los líquidos contenidos en recipientes abiertos y llenos la vibración se siente en la construcción como la producida por un objeto pesado arrastrándose.

b) En las construcciones de tipo A son posibles ligeros daños (clase 1).

c) En ciertos casos modifica el caudal de los manantiales.

Grado VI:

a) Lo siente la mayoría de las personas, tanto dentro como fuera de los edificios. Muchas personas salen a la calle atemorizadas. Algunas personas llegan a perder el equilibrio. Los animales domésticos huyen de los establos. En algunas ocasiones, la vajilla y la cristalería se rompe, los libros caen de sus estantes, los cuadros se mueven y los objetos inestables vuelcan. Los muebles pesados pueden llegar a moverse. Las campanas pequeñas de torres y campanarios pueden sonar.

b) Se producen daños moderados (clase 2) en algunas construcciones del tipo A. Se producen daños ligeros (clase 1) en algunas construcciones de tipo B y en muchas del tipo A.

Grado VII:

a) La mayoría de las personas se aterroriza y corre a la calle. Muchas tienen dificultad para mantenerse en pie. Las vibraciones son sentidas por personas que conducen automóviles. Suenan las campanas grandes.

b) Muchas construcciones del tipo A sufren daños graves (clase 3) y algunas incluso destrucción (clase 4).

Muchas construcciones del tipo B sufren daños moderados (clase 2).

Algunas construcciones del tipo C experimentan daños ligeros (clase 1).

c) En algunos casos, se producen deslizamientos en las carreteras que transcurren sobre laderas con pendientes acusadas; se producen daños en las juntas de las canalizaciones y aparecen fisuras en muros de piedra.

Se aprecia oleaje en las lagunas y el agua se enturbia por remoción del fango. Cambia el nivel de agua de los pozos y el caudal de los manantiales. En algunos casos, vuelven a manar manantiales que estaban secos y se secan otros que manaban. En ciertos casos se producen derrames en taludes de arena o de grava.

Grado VIII:

a) Miedo y pánico general, incluso en las personas que conducen automóviles. En algunos casos se desgajan las ramas de los árboles. Los muebles, incluso los pesados, se desplazan o vuelcan. Las lámparas colgadas sufren daños parciales.

b) Muchas construcciones de tipo A sufren destrucción (clase 4) y algunos colapso (clase 5).

Muchas construcciones de tipo B sufren daños graves (clase 3) y algunas destrucción (clase 4).

Muchas construcciones de tipo C sufren daños moderados (clase 2) y algunas graves (clase 3).

En ocasiones, se produce la rotura de algunas juntas de canalizaciones. Las estatuas y monumentos se mueven y giran. Se derrumban muros de piedra.

c) Pequeños deslizamientos en las laderas de los barrancos y en las trincheras y terraplenes con pendientes pronunciadas. Grietas en el suelo de varios centímetros de ancho. Se enturbia el agua de los lagos. Aparecen nuevos manantiales. Vuelven a tener agua pozos secos y se secan pozos existentes. En muchos casos cambia el caudal y el nivel de agua de los manantiales y pozos.

Grado IX:

a) Pánico general. Daños considerables en el mobiliario. Los animales corren confundidamente y emiten sus sonidos peculiares.

b) Muchas construcciones del tipo A sufren colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo B sufren destrucción (clase 4) y algunas colapso (clase 5).

Muchas construcciones del tipo C sufren daños graves (clase 3) y algunas destrucción (clase 4).

Caen monumentos y columnas. Daños considerables en depósitos de líquidos. e rompen parcialmente las canalizaciones subterráneas. En algunos casos, los carriles del ferrocarril se curvan y las carreteras quedan fuera de servicio.

c) Se observa con frecuencia que se producen extrusiones de agua, arena y fango en los terrenos saturados. Se abren grietas en el terreno de hasta 10 centímetros de ancho y de más de 10 centímetros en las laderas y en las márgenes de los ríos. Aparecen además, numerosas grietas pequeñas en el suelo, desprendimientos de rocas y aludes. Muchos deslizamientos de tierras. Grandes olas en lagos y embalses. Se renuevan pozos secos y se secan otros existentes.

GRADO X:

b) La mayoría de las construcciones del tipo A sufren colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo B sufren colapso (clase 5). Muchas construcciones de tipo C sufren destrucción (clase 4) y algunos colapso (clase 5). Daños peligrosos en presas; daños serios en puentes. Los carriles de las vías férreas se desvían y a veces se ondulan. Las canalizaciones subterráneas son retorcidas o rotas. El pavimento de las calles y el asfalto forman grandes ondulaciones.

c) Grietas en el suelo de algunos decímetros de ancho que pueden llegar a un metro. Se producen anchas grietas paralelamente a los cursos de los ríos. Deslizamientos de tierras sueltas en las laderas con fuertes pendientes. En los ribazos de los ríos y en las laderas escarpadas se producen considerables deslizamientos. Desplazamientos de arenas y fangos en las zonas litorales. Cambio del nivel de agua en los pozos. El agua de canales y ríos es lanzado fuera de su cauce normal. Se forman nuevos lagos.

GRADO XI:

b) Daños importantes en construcciones, incluso en las bien realizadas, en puentes, presas y líneas de ferrocarril. Las carreteras importantes quedan fuera de servicio. Las canalizaciones subterráneas quedan destruidas.

c) El terreno queda considerablemente deformado tanto por desplazamientos de terrenos y caídas de rocas.

Para determinar la intensidad de las sacudidas sísmicas se precisan investigaciones especiales.

GRADO XII:

b) Prácticamente se destruyen o quedan gravemente dañadas todas las estructuras, incluso las subterráneas.

c) La topografía cambia. Grandes grietas en el terreno con importantes desplazamientos horizontales y verticales. Caída de rocas y hundimientos en los escarpes de los valles, producidas en vastas extensiones. Se cierran valles y se transforman en lagos. Aparecen cascadas y se desvían los ríos.