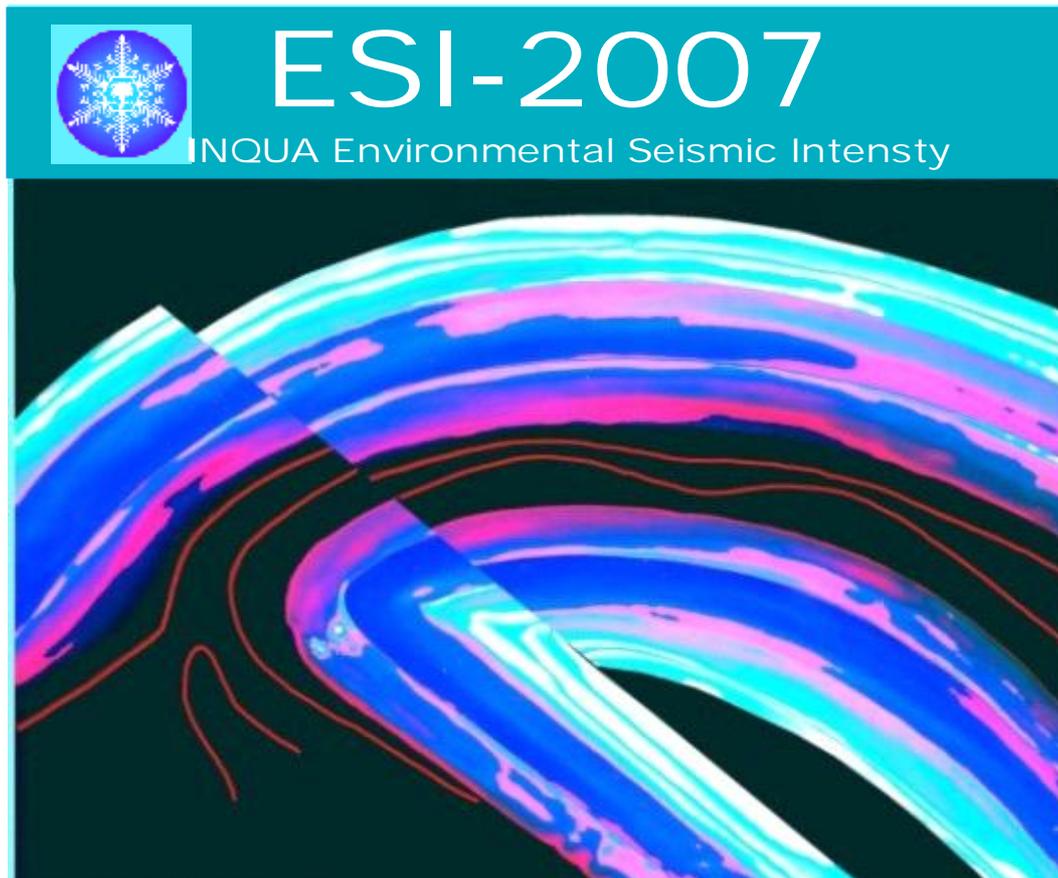




INQUA ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE 2007

ESI 2007 (Versión en Español)



ESCALA MEDIO-AMBIENTAL DE INTENSIDAD SÍSMICA ESI-2007 INQUA. Basada en los efectos ambientales y geológicos de los terremotos (Versión en Español, 2010)

Traducida del Trabajo Original por El Grupo de Trabajo Español de AEQUA, 2010



Trabajo Original:

Guerrieri, L. & Vittori, E. (Eds.) 2007 – Intensity Scale ESI2007.
Mem. Descr. Carta Geologica d'Italia, 74.
Servizio Geológico d'Italia – Dipartimento Difensa del Suolo.
APAT, Roma, Italia

Editores: L. Guerrieri & E. Vittori

Autores: A.M. Michetti, F. Audemard, T. Azuma, J. Clague, V. Comerci, E. Esposito, L. Guerrieri, A. Gürpınar, J. McCalpin, B. Mohammadioun, N.A. Mörner, Y. Ota, S. Porfido, E. Roghozin, L. Serva, R. Tatevossian, E. Vittori

Colaboradores: R. Amit, G. Besana, K. Chunga, A. Fokaefs, L.E. Franco, C. P. Lalinde Pulido, E. Khagan, N. Lin Yunong, S. Marco, A. Nelson, I. Papanikolau, G. Papathanassiou, S. Pavlides, K. Reicherter, A. Salomon, P.G. Silva, J. Zamudio.



Traducción:

P.G. Silva, M.A. Rodríguez Pascua, R. Pérez-López, J. Lario, J.L. Giner Robles, T. Bardají.
Grupo Español de Trabajo de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario,
AEQUA. Madrid (España), 2010.



PREFACE

In 1999, during the 15th INQUA (International Union for Quaternary Research) Congress in Durban (August 3 – 11, 1999), the Subcommittee on Paleoseismicity promoted the compilation of a new scale of macroseismic intensity based only on environmental effects. A Working Group including geologists, seismologists and engineers compiled a first version of the scale, that was presented at the 16th INQUA Congress in Reno (July 23 – 30, 2003), and updated one year later at the 32nd International Geological Congress in Florence (Michetti et al., 2004). To this end, the INQUA TERPRO (Commission on Terrestrial Processes) approved a specific project (*INQUA Scale Project*, 2004 - 2007) with the aim of **A**) testing the scale for a trial period of 4 years, coincident with the intercongress cycle, **B**) review the first version through its application to case studies worldwide, and **C**) submit the revised version so as to be ratified during the 17th INQUA Congress in Cairns (July 28 – August 3, 2007). The Seismic Scale was eventually ratified by the INQUA Executive Committee during the aforementioned INQUA Congress in August 2007.

This document describes the revised version of the scale, which is formally named INQUA Environmental Seismic intensity scale - IES 2007. The IES 2007 scale is composed by:

- a) the Definition of intensity degrees on the basis of Earthquake Environmental Effects, i.e. the scale itself, which follows the same basic structure of the widely used twelve degrees macroseismic scales (see Michetti et al., 2004);
- b) the Guidelines, which aim at better clarifying i) the background of the scale and the scientific concepts that support the introduction of such a new macroseismic scale; ii) the procedure to use the scale alone or integrated with damage-based, traditional scales; iii) how the scale is organized; iv) the descriptions of diagnostic features required for intensity assessment, and the meaning of idioms, colors, and fonts.



ESCALA DE INTENSIDAD SÍSMICA INQUA ESI-2007 (Environmental Seismic Intensity) basada en los efectos ambientales y geológicos de los terremotos.

DEFINICIONES DE LOS GRADOS DE INTENSIDAD

I a III. EFECTOS NO PERCEPTIBLES EN EL AMBIENTE que puedan ser usados como diagnósticos

IV – AMPLIAMENTE OBSERVADO: Primeros efectos inequívocos sobre el Ambiente

Efectos primarios ausentes.

Efectos secundarios:

- a) En raras ocasiones suceden pequeñas variaciones locales del nivel de agua en pozos y/o en el caudal de manantiales y fuentes. En muy raras ocasiones ocurren pequeñas variaciones de las propiedades físicas - químicas del agua y de la turbidez del agua en los lagos, manantiales, fuentes y pozos, especialmente dentro de grandes acuíferos kársticos que son los más propensos a este fenómeno.
- b) En cuencas cerradas (lagos e incluso mares) se pueden formar pequeños seiches centimétricos que comúnmente solo son detectados por los mareógrafos, aunque excepcionalmente pueden ser vistos. Característicos en el campo lejano de fuertes terremotos. Oleaje anómalo es percibido por todo el mundo en pequeñas embarcaciones, por algunas personas en barcos y por la mayoría en la costa. El agua de piscinas y estanques se agita y algunas veces puede desbordarse.
- c) Ocasionalmente, muy pocos casos de grietas muy finas (mm) en zonas donde la litología (ej. depósitos aluviales poco compactados, suelos saturados) y/o morfología (laderas escarpadas o cimas de colinas) son más propensos a este fenómeno.
- d) Excepcionalmente pueden ocurrir caídas de rocas, y pequeños deslizamientos existentes pueden reactivarse. Fundamentalmente en laderas donde el equilibrio es ya muy inestable (ej. laderas o cuevas, escarpadas y cortadas, desarrolladas sobre suelos saturados o material coluvial poco compactado, así como en cortes y taludes artificiales de caminos, carreteras, ferrocarriles y canteras o areneros a cielo abierto).
- e) Las ramas de los árboles pueden verse sacudidas.

V – FUERTE: Efectos marginales sobre el Ambiente (*Los efectos naturales afectan marginalmente al terreno y solo en ocasiones excepcionales dejan evidencia en el registro geológico -procesos de liquefacción- y en ningún caso afectan al registro geomorfológico permanente del paisaje afectado*).

Efectos primarios ausentes.

Efectos secundarios:

- a) En raras ocasiones ocurren variaciones apreciables en el nivel de agua en pozos y/o caudal en manantiales y fuentes, así como pequeñas variaciones en las propiedades físico-químicas y turbidez del agua de lagos, manantiales, fuentes y pozos.
- b) En cuencas cerradas (lagos e incluso mares) se pueden formar pequeños seiches decimétricos que comúnmente pueden ser observados. Característicos en el campo lejano de fuertes terremotos. Oleaje anómalo de pocas decenas de centímetros es percibido por todo el mundo en todo tipo de embarcaciones y en la costa. Piscinas y estanques comúnmente se desbordan.
- c) Localmente se desarrollan finas grietas de anchura milimétrica, y longitud decimétrica a métrica, en zonas donde la litología (ej. depósitos aluviales poco compactados, suelos saturados) y/o morfología (laderas o escarpes de colinas) son más propensos a este fenómeno.



- d) En raras ocasiones ocurren caídas de rocas, deslizamientos rotacionales y flujos de tierras, a pequeña escala (muy locales), especialmente a lo largo de pendientes donde el equilibrio es inestable (ej. laderas o cuestas escarpadas sobre materiales sedimentarios poco compactados o suelos saturados, así como en cortes y taludes artificiales de caminos, carreteras, ferrocarriles y canteras o areneros a cielo abierto). Ocasionalmente se pueden generar pequeños deslizamientos submarinos que dan lugar a oleajes anómalos transitorios en zonas litorales.
- e) Las ramas de los árboles y arbustos se sacuden ligeramente y en muy raros casos pueden caer ramas muertas o frutos.
- f) Extremadamente raros casos de licuefacción (volcanes de arena) de pequeño tamaño (cm) en áreas propensas a este tipo de fenómeno (llanuras costeras y fondos aluviales recientes arenosos con nivel freático muy somero).

VI – LIGERAMENTE DAÑINO: Efectos moderados sobre el Ambiente *(Los efectos naturales pueden dejar alguna traza significativa en el terreno, pero por lo general con un grado de supervivencia en el paisaje muy corto, de semanas o pocos meses. El registro geológico de procesos de licuefacción y deslizamientos comienza a ser significativo)*

Efectos primarios ausentes.

Efectos secundarios:

- a) Registro común de variaciones significativas en el nivel de agua en pozos y/o caudal en manantiales y fuentes, así como pequeñas variaciones en las propiedades físico-químicas y turbidez del agua de lagos, manantiales, fuentes y pozos.
- b) Oleaje anómalo de varias decenas de centímetros producen inundaciones limitadas en zonas de costa y ribera. Piscinas, estanques y pequeñas lagunas comúnmente se desbordan.
- c) *Ocasionalmente se observan **fracturas** de anchura milí a centimétrica y longitud métrica en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. Especialmente a lo largo de pendientes escarpadas y márgenes (orillas) de ríos, donde pueden alcanzar de 1 a 2 cm de anchura. Algunas agrietamientos milimétricos pueden desarrollarse en carreteras pavimentadas (asfaltos / empedrados).*
- d) Ocasionalmente pueden ocurrir caídas de rocas y deslizamientos de hasta ca. 10^3 m^3 , especialmente donde el equilibrio es inestable y existen fuertes pendientes. (ej. Laderas o cuestas escarpadas sobre materiales sedimentarios poco compactados, suelos saturados, o rocas fracturadas / meteorizadas). Ocasionalmente pueden suceder eventos de deslizamientos submarinos o subacuáticos en zonas costeras y lagos generando oleaje anómalo que por lo general solo es detectado por registros instrumentales.
- e) Las ramas de árboles y arbustos son sacudidas visiblemente. Algunas pocas ramas inestables y copas de árboles pueden romperse y caer, dependiendo de la especie y del estado de madurez de los frutos.
- f) *En raras ocasiones pueden ocurrir casos de licuefacción (volcanes de arena), pequeños en tamaño (cm), en áreas propensas a este tipo de fenómeno como llanuras costeras y fondos aluviales recientes con nivel freático muy somero.*

VII – DAÑINO: Efectos apreciables sobre el Ambiente *(Los efectos naturales pueden dejar trazas significativas en el terreno, pero por lo general con un grado de supervivencia en el registro geomorfológico muy corto, de meses o pocos años, muy excepcionalmente permanentes. El registro geológico de procesos de licuefacción, deslizamientos comienza a ser bastante significativo en áreas propicias)*

Efectos primarios: *Muy raramente observados, casi exclusivamente en zonas volcánicas.*

*Pueden generarse **rupturas superficiales de falla limitadas**, con longitud de decenas a centenares de metros y desplazamiento (offset) centimétrico, esencialmente asociadas a **terremotos tectó-volcánicos** muy superficiales.*

Efectos secundarios: *El área afectada es generalmente inferior o del orden de 10 km^2 .*

- a) Localmente se registran variaciones significativas en el nivel de agua en pozos y/o caudal de manantiales y fuentes. Raramente, pequeños manantiales o fuentes pueden temporalmente secarse, y/o aparecer otros nuevos. Comúnmente se producen variaciones apreciables en las propiedades físico-químicas y turbidez del agua de lagos, manantiales, fuentes y pozos.
- b) Olas anómalas, incluso de más de un metro de altura producen inundaciones limitadas en zonas de costa y ribera, dañando y arrastrando objetos de distintas dimensiones. Se producen desbordamientos en lagunas, estanques e incluso ríos.



- c) *Fracturas de hasta 5 - 10 centímetros de ancho y centenares de metros de longitud son comúnmente observadas en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. Raramente también se observan fracturas de hasta 1 centímetro de ancho en materiales arenosos secos y suelos arcillosos. Son comunes las grietas centimétricas en caminos pavimentados (asfalto o empedrados).*
- d) *Comúnmente ocurren deslizamientos aislados y dispersos en áreas especialmente propensas donde el equilibrio es inestable (ej. laderas o cuestas de alta pendiente sobre materiales sedimentarios poco compactados, suelos saturados o rocas fracturadas / meteorizadas). Caída de rocas apreciable en desfiladeros y gargantas escarpadas o acantilados costeros. Su tamaño es a veces considerable ($10^3 - 10^5 \text{ m}^3$). En materiales arenosos secos, areno-arcillosos y suelos arcillosos los volúmenes son normalmente hasta 100 m^3 . Rupturas, derrumbes y caídas (rocas) pueden afectar las orillas de los ríos y terraplenes o taludes artificiales (ej. cortes de caminos, canteras, etc.) desarrollados en materiales sedimentarios poco compactados o rocas fracturadas/meteorizadas. Se pueden generar deslizamientos submarinos o subacuáticos significativos que provocan oleajes anómalos en zonas costeras de mares y lagos observados por la mayoría de las personas en embarcaciones y puertos.*
- e) *En zonas boscosas los árboles y arbustos son sacudidos vigorosamente. Muchas ramas y copas de árboles rompen y caen.*
- f) *Raros casos de licuefacción (volcanes de arena) de hasta 50 cm de diámetro pueden desarrollarse en áreas propensas a este tipo de fenómeno como (llanuras costeras y fondos aluviales recientes con nivel freático muy somero).*
- g) *En zonas secas o semiáridas, pueden levantarse nubes de polvo en el área epicentral.*
- h) *Piedras e incluso pequeños cantos y troncos de árboles pueden ser arrojados al aire dejando huellas de caída en suelos blandos.*

VIII – MUY DAÑINO: Efectos considerables sobre el Ambiente *(Los efectos naturales dejan trazas significativas y en algunas ocasiones permanentes en el terreno. El registro geomorfológico comienza a ser algo significativo y el registro geológico de rupturas de falla –excepcionalmente- procesos de licuefacción y deslizamientos ya toma un cuerpo notable).*

Efectos primarios: *Raramente observados.*

Las rupturas de falla pueden alcanzar hasta varios centenares de metros de longitud, con desplazamientos (offset) de pocos centímetros (< 5 cm), particularmente durante terremotos muy superficiales, como ocurre en eventos tectó-volcánicos. Subsistencia o elevación tectónica de la superficie del terreno puede presentar valores máximos de orden centimétrico.

Efectos secundarios: *El área afectada es generalmente inferior o del orden de 100 km^2 .*

- a) *Los manantiales y fuentes pueden cambiar, generalmente de forma temporal, tanto su caudal y/o posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pequeñas pueden incluso secarse. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas y, más comúnmente la temperatura, cambia en manantiales y/o pozos. El agua de lagos, ríos y manantiales frecuentemente puede volverse turbia, incluso ligeramente fangosa. Localmente se pueden producir emisiones de gases normalmente sulfurosos.*
- b) *Olas anómalas de entre 1-2 m de altura producen inundaciones en zonas de costa y ribera, dañando y arrastrando objetos de distintas dimensiones. Se producen desbordamientos violentos en lagunas, estanques y ríos. Erosión y acumulación de restos flotantes en las playas, donde los arbustos e incluso árboles débilmente enraizados pueden ser arrancados y arrastrados hacia el interior.*
- c) *Fracturas de hasta 50 centímetros de anchura y centenares de metros de longitud son comúnmente observadas en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. En raros casos pueden desarrollarse fracturas de hasta 1 cm de anchura en rocas competentes o firmes. Son comunes grietas decimétricas y pequeñas ondulaciones de presión en caminos y zonas pavimentadas (asfalto o empedrados).*
- d) *Deslizamientos pequeños a moderados ($10^3 - 10^5 \text{ m}^3$) pueden ocurrir extensamente en áreas propensas. Raramente pueden también ocurrir en laderas de poca pendiente donde el equilibrio es inestable (ej. pendientes o laderas sobre materiales sedimentarios poco compactados, suelos saturados o rocas fracturadas / meteorizadas). Caída de rocas en desfiladeros escarpados y acantilados costeros. Su tamaño es a veces grande ($10^5 - 10^6 \text{ m}^3$). Algunos deslizamientos pueden ocasionalmente obturar valles estrechos causando lagos temporales e incluso permanentes. Rupturas, derrumbes y caídas (rocas) pueden afectar las márgenes (orillas) de los ríos, los terraplenes y taludes artificiales (p.ej. cortes de caminos, canteras, etc.) desarrollados en materiales sedimentarios poco compactados o rocas fracturadas/meteorizadas. Es común la generación de deslizamientos submarinos en zonas costeras.*



- e) *Los árboles se sacuden fuertemente. Muchas ramas se rompen y caen. Más raramente, troncos en equilibrio pueden desenraizarse y caer, especialmente en laderas con fuerte pendiente.*
- f) *Los Procesos de Licuefacción pueden ser frecuentes en el área epicentral, dependiendo de las condiciones locales. Los efectos más característicos son volcanes de arenas de hasta ca. 1 m de diámetro; chorros de agua (Water fountains) pueden ser visibles en aguas tranquilas de lagos someros (lagoones, salinas, zonas pantanosas); extensiones laterales y asentamientos locales (subsistencia hasta aprox. 30 cm) con agrietamientos paralelos a los cuerpos de agua (márgenes de ríos, lagos, canales y líneas de costa).*
- g) *En zonas secas o semiáridas, pueden levantarse nubes de polvo en el área epicentral.*
- h) *Piedras e incluso pequeños cantos y troncos de árboles pueden ser arrojados al aire dejando huellas de caída en suelos blandos.*

IX – DESTRUCTIVO: Los efectos en el ambiente son generalizados, constituyendo una fuente de peligrosidad considerable, y empiezan a ser importantes para la determinación de la intensidad. *(Los efectos naturales dejan trazas considerables y permanentes en el terreno. El registro geomorfológico de este tipo de eventos comienza a ser un dato muy significativo, mientras que en el registro geológico, rupturas de falla, procesos de licuefacción, deslizamiento y excepcionalmente tsunamis es una pauta común).*

Efectos primarios: *Comúnmente observados.*

Las rupturas de falla pueden alcanzar una longitud de unos pocos kilómetros, con desplazamientos (offset) de algunas decenas de centímetros (10 – 20 cm). Subsistencia o elevación tectónica de la superficie del terreno con valores máximos de orden decímetro.

Efectos secundarios: *El área afectada es generalmente inferior o del orden de 1000 km².*

- a) *Los manantiales y fuentes pueden cambiar, generalmente de forma temporal, tanto su caudal y/o posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pueden incluso secarse. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas y, más comúnmente la temperatura, cambia en manantiales y/o pozos. El agua de lagos, ríos y manantiales frecuentemente puede volverse **muy turbia, incluso ligeramente fangosa**. Localmente se pueden producir emisiones de gases normalmente sulfurosos y, ocasionalmente tanto la hierba como los arbustos alrededor de estos puntos de emisión pueden arder.*
- b) *Se producen **Olas anómalas** de **varios metros** de altura en cuerpos de agua y cursos fluviales. En zonas de llanura de inundación los cauces de agua pueden incluso variar sus cursos, fundamentalmente ocasionado por procesos de subsistencia. Pueden aparecer y/o desaparecer pequeñas lagunas. Dependiendo de la topografía de la línea de costa y el fondo marino, pueden producirse **tsunamis peligrosos de algunos metros de runup** provocando la inundación de zonas extensas a lo largo del litoral. Erosión generalizada de las zonas de playa, donde los arbustos e incluso árboles pueden ser arrancados y arrastrados hacia el interior.*
- c) *Fracturas de hasta 100 centímetros de anchura y centenares de metros de longitud son comúnmente observadas en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. En rocas competentes o firmes pueden desarrollarse fracturas de hasta 10 cm de anchura. En caminos y zonas pavimentadas (asfalto o empedrados) es común el desarrollo de grietas decimétricas significativas, así como pequeñas ondulaciones de presión.*
- d) *Deslizamientos extensos y frecuentes en áreas propensas, incluso en laderas de poca pendiente en condiciones de equilibrio inestable (ej. pendientes o laderas escarpadas sobre materiales sedimentarios poco compactados, suelos saturados o rocas fracturadas / meteorizadas). Caída de rocas en desfiladeros escarpados y acantilados costeros. Su tamaño es frecuentemente grande (**10⁵ m³**) y a veces muy grande (**10⁶ m³**). Algunos deslizamientos pueden ocasionalmente obturar valles estrechos, causando lagos temporales e incluso permanentes. Las orillas de los ríos, así como terraplenes y taludes artificiales (ej. cortes de caminos, canteras, etc.) frecuentemente colapsan. Son frecuentes grandes deslizamientos submarinos o subacuáticos en zonas costeras y lagos.*
- e) *Los árboles se sacuden vigorosamente. Las ramas y troncos de árboles de pequeño diámetro, frecuentemente se rompen y caen. Algunos árboles situados en laderas de fuerte pendiente pueden ser desenraizados y colapsar.*



- f) *Los Procesos de Licuefacción y eyección de agua son frecuente. Los efectos más típicos son: Volcanes de arena de hasta 3 m de diámetro; chorros de agua (Water fountains) pueden ser visibles en aguas tranquilas de lagos someros (lagoones, salinas, zonas pantanosas); extensiones laterales y asentamientos locales (subsistencia hasta ca. 30 cm), con agrietamientos paralelos a los cuerpos de agua (márgenes de ríos, lagos, canales y líneas de costa).*
- g) *En zonas secas o semiáridas, pueden levantarse nubes de polvo en el área epicentral.*
- h) *Pequeños cantos y troncos de árboles pueden ser arrojados al aire desplazándose varios metros (dependiendo de la pendiente del terreno) dejando huellas de caída en suelos blandos.*

X – MUY DESTRUCTIVO. Los Efectos Ambientales se convierten en una de las fuentes de peligrosidad dominantes y son esenciales para la evaluación de la intensidad. *(Los efectos Ambientales son dominantes sobre otro tipo de criterios en la evaluación de los daños, son relevantes en el registro geomorfológico y fundamentales en el geológico, incluyendo el registro de tsunamis).*

Efectos primarios: Comienzan a ser importantes.

Las rupturas de falla se convierten en un fenómeno característico. Pueden alcanzar una longitud de decenas de kilómetros, con desplazamientos (offset) decimétricos hasta unos pocos metros (ca. 1 - 2 m). Desarrollo de micrograbens y depresiones tectónicas alargadas en terremotos con hipocentros muy superficiales. En el caso de eventos tectó-volcánicos la longitud de las rupturas puede ser muy inferior. Puede ocurrir subsidencia o elevación tectónica del terreno con valores máximos de unos pocos metros.

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 5000 km².

- a) *Los manantiales y fuentes cambian significativamente tanto su caudal como su posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pueden secarse incluso permanentemente. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas de manantiales y/o pozos y, más comúnmente la temperatura en fuentes termales, sufren fuertes variaciones. El agua de manantiales, ríos e incluso grandes lagos a menudo se vuelve muy fangosa. Las emisiones de gases, normalmente sulfurosos, son comúnmente observadas. La hierba y los arbustos en el entorno de estos puntos de emisión pueden arder.*
- b) *Se producen **Olas anómalas de varios metros de altura** incluso en grandes lagos y ríos. En zonas de llanura de inundación los cauces de agua pueden sufrir significativos cambios de curso temporales e incluso permanentes, debido a la generalización de procesos de subsidencia. Pueden aparecer y/o desaparecer lagunas de entidad. Dependiendo de la topografía de la línea de costa y el fondo marino, pueden producirse **tsunamis de hasta 5 m de runup** provocando la inundación generalizada de zonas costeras bajas de hasta miles de metros de penetración tierra adentro. Pequeños bloques pueden ser arrastrados hacia el interior. Erosión significativa generalizada de las zonas costeras bajas que producen significativos cambios la geometría de la línea de costa. La mayoría de la vegetación litoral (arbustos y árboles) es mayoritariamente arrasada y arrastrada hacia el interior.*
- c) *Son frecuentes grandes grietas en el terreno con aberturas de hasta más de 1 m de anchura, principalmente en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. En rocas competentes pueden alcanzar varios decímetros de anchura. Se desarrollan grietas anchas en caminos pavimentados (asfalto o empedrados), acompañadas por significativas ondulaciones de presión. En suelos enlosados y bordillos de aceras pueden desarrollarse estructuras de tipo pop-up de altura centimétrica y de extensión métrica a decamétrica.*
- d) *Grandes deslizamientos y caídas de rocas ($> 10^5 - 10^6 m^3$) son frecuentes, prácticamente con independencia del estado del equilibrio y pendiente de las laderas, causando lagos de obturación temporales o permanentes. Las márgenes de los ríos, terraplenes, taludes y excavaciones artificiales típicamente colapsan. Levees, terraplenes y represas de tierra pueden incluso sufrir serios daños*
- e) *Los árboles se sacuden fuertemente. Muchas ramas y troncos de árboles se rompen y caen. Algunos árboles pueden ser desarraigados y colapsar incluso en laderas de poca pendiente.*
- f) *Los Procesos de Licuefacción, eyección de agua y compactación del suelo pueden cambiar el aspecto de extensas zonas, aplanando la topografía de llanuras costeras y llanuras de inundación fluviales y aluviales; volcanes de arenas de hasta aproximadamente 6 m de diámetro. Los procesos de subsidencia $> 1m$ produciendo grandes y largas grietas debido a extensiones laterales son comunes a lo largo de márgenes de ríos, lagos, y canales. Grandes deslizamientos submarinos o subacuáticos son frecuentes en zonas costeras y lagos.*



- g) En zonas secas o semiáridas, pueden levantarse nubes de polvo en el área epicentral.
- h) Cantos y bloques (de hasta 2-3 metros de diámetro) pueden ser arrojados al aire desplazándose centenares de metros incluso en zonas de suave pendiente, dejando trazas y huellas de caída en suelos blandos.

XI – DEVASTADOR. Los Efectos Ambientales se hacen totalmente esenciales para evaluar la intensidad debido a la saturación de los daños estructurales en edificaciones (Los efectos Ambientales llegan a ser esenciales para evaluaciones de Intensidad dada la casi total saturación de otro tipo de criterios para estimar los niveles de daños)

Efectos primarios: Dominantes.

Las **rupturas de falla primarias** pueden extenderse desde varias decenas de kilómetros hasta unos 100 km, acompañadas por desplazamientos de varios metros (> 2m). Es patente el desarrollo de fosas tectónicas, depresiones alargadas y lomas de presión. Las líneas de drenaje pueden desplazarse ostensiblemente. Puede ocurrir subsidencia o elevación tectónica del terreno con valores de muchos metros.

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 10.000 km².

- a) Los manantiales y fuentes cambian significativamente tanto su caudal como su posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pueden secarse incluso permanentemente. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas de manantiales y/o pozos y, más comúnmente la temperatura en fuentes termales, sufren fuertes variaciones. El agua de manantiales, ríos e incluso grandes lagos a menudo se vuelve muy fangosa. Las emisiones de gases, normalmente sulfurosos, son comúnmente observadas. La hierba y los arbustos en el entorno de estos puntos de emisión pueden arder.
- b) Se producen **Olas anómalas de varios metros de altura** incluso en grandes lagos y ríos. En zonas de llanura de inundación los cauces de agua pueden sufrir significativos cambios de curso temporales e incluso permanentes, debido a la generalización de procesos de subsidencia y desplomes de los márgenes. Pueden aparecer y/o desaparecer lagunas de entidad. Dependiendo de la topografía de la línea de costa y el fondo marino, pueden producirse **tsunamis de hasta 15 m de runup** provocando la inundación y devastación de vastas zonas costeras bajas con penetraciones kilométricas tierra adentro. Incluso bloques de diámetro métrico pueden ser arrastrados hacia el interior a lo largo de grandes distancias. Erosión importante generalizada de las zonas costeras bajas que producen cambios muy notorios en la geometría de la línea de costa. La vegetación litoral (arbustos y árboles) es arrasada y arrastrada hacia el interior.
- c) Son muy frecuentes grandes grietas en el terreno con aberturas de varios metros de anchura, principalmente en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados. En rocas competentes pueden alcanzar hasta 1 m de anchura. Grietas muy anchas se desarrollan en caminos pavimentados (asfalto o empedrados), acompañadas por grandes ondulaciones de presión. En suelos enlosados y bordillos de aceras pueden desarrollarse estructuras de tipo pop-up de altura centimétrica y de extensión métrica a decamétrica.
- d) Grandes deslizamientos y caídas de rocas (> 10⁵ - 10⁶ m³) son frecuentes, independientemente del estado de equilibrio y pendiente de las laderas, causando lagos de obturación temporales o permanentes. Las márgenes (orillas) de los ríos, terraplenes, taludes y excavaciones artificiales típicamente colapsan. Terraplenes y represas de tierra pueden incluso incurrir en serios daños. Deslizamientos considerables pueden tener lugar hasta 200-300 kilómetros de distancia epicentral. Grandes deslizamientos submarinos o subacuáticos son frecuentes en zonas costeras y lagos.
- e) *Los árboles se sacuden violentamente. Muchas ramas se rompen y caen. Incluso árboles enteros pueden desenraizarse del terreno y caer peligrosamente.*
- f) Los Procesos de Licuefacción cambian el aspecto de extensas zonas, aplanando la topografía de llanuras costeras y llanuras de inundación fluviales y aluviales, acompañadas por procesos de subsidencia generalizados que pueden exceder varios metros. Los volcanes de arena de gran tamaño son numerosos; grandes y largas grietas debido a extensiones laterales afectan severamente a las márgenes de ríos, lagos y canales.
- g) En áreas secas, se levantan grandes nubes de polvo.
- h) *Grandes bloques, incluso de varios metros de diámetro pueden ser arrojados al aire desplazándose cientos de metros, incluso en laderas de poca pendiente, dejando impresiones o huellas características en suelos blandos o poco consolidados.*



XII – COMPLETAMENTE DEVASTADOR. Efectos Ambientales son el único criterio para determinar la intensidad (Los efectos Ambientales son ahora la única herramienta disponible para evaluar la intensidad, los demás criterios para estimar el nivel de daños se encuentran saturados por el colapso generalizado de todo tipo de construcciones)

Efectos primarios: Dominantes.

Las rupturas de falla se extienden como mínimo varios centenares de kilómetro, acompañadas por desplazamientos de hasta decenas de metros. Es patente el desarrollo de grandes fosas tectónicas, depresiones alargadas y lomas de presión. Las líneas de drenaje pueden desplazarse ostensiblemente. Los cambios en el paisaje y en la geomorfología inducidos por estas rupturas primarias pueden alcanzar tamaños y extensiones extraordinarios (ejemplos típicos son la elevación y/o subsidencia de líneas costa de hasta varios metros, la aparición o desaparición de la vista de elementos paisajísticos significativos, los ríos cambian de curso, formación de cascadas, y formación o desaparición de lagos).

Efectos secundarios: El área afectada es generalmente inferior o del orden de 50.000 km².

- a) Los manantiales y fuentes cambian significativamente tanto su caudal como su posición altimétrica (sobrepresión). Algunas manantiales y fuentes pueden secarse incluso permanentemente. Las variaciones en el nivel del agua en los pozos son comunes y significativas. Las propiedades físico-químicas de manantiales y/o pozos y, más comúnmente la temperatura en fuentes termales, sufren fuertes variaciones. El agua de manantiales, ríos e incluso grandes lagos a menudo se vuelve muy fangosa. Las emisiones de gases, normalmente sulfurosos, son comúnmente observadas. La hierba y los arbustos en el entorno de estos puntos de emisión pueden arder.
- b) Desarrollo de **Olas gigantes** en lagos y ríos que causan importantes inundaciones en las zonas de ribera. En zonas de llanura de inundación los cauces de agua pueden sufrir significativos cambios de curso permanentes, e incluso invertirse el sentido de la corriente, debido a la generalización de procesos de subsidencia y desplomes de los márgenes. Pueden aparecer y/o desaparecer lagos de extensión significativa. Dependiendo de la topografía de la línea de costa y el fondo marino, pueden producirse **tsunamis de varias decenas de metros de runup** provocando la inundación y devastación de vastas zonas costeras bajas con penetraciones de varios kilómetros tierra adentro. Grandes bloques pueden ser arrastrados hacia el interior a lo largo de grandes distancias. Erosión devastadora y generalizada de las zonas costeras bajas que producen cambios muy notorios en la geometría de la línea de costa. La vegetación litoral (arbustos y árboles) es arrasada y arrastrada hacia el interior.
- c) Grandes grietas en el terreno con aberturas de varios metros de anchura son muy frecuentes, de hasta más de 1 metro en el sustrato rocoso competente, y de hasta más de 10 metros en depósitos aluviales poco compactados y/o suelos saturados, donde pueden extenderse a lo largo de varios kilómetros de longitud. En suelos enlosados y bordillos de aceras pueden desarrollarse estructuras de tipo pop-up de altura centimétrica y de extensión métrica a decamétrica.
- d) Grandes deslizamientos y caídas de rocas (> 10⁵ - 10⁶ m³) son frecuentes, independientemente del estado de equilibrio y pendiente de las laderas, causando muchos lagos de obturación temporales o permanentes. Las márgenes (orillas) de los ríos, terraplenes, taludes y excavaciones artificiales típicamente colapsan. Terraplenes y represas de tierra pueden incluso incurrir en serios daños. Deslizamientos considerables pueden tener lugar en hasta 200-300 kilómetros de distancia epicentral. Grandes deslizamientos submarinos o subacuáticos son frecuentes en zonas costeras y lagos.
- e) Los árboles se sacuden violentamente. Muchas ramas se rompen y caen. Incluso árboles enteros pueden desenraizarse del terreno y caer peligrosamente.
- f) Los Procesos de Licuefacción cambian el aspecto de extensas zonas, aplanando la topografía de llanuras costeras y llanuras de inundación fluviales y aluviales, acompañadas por procesos de subsidencia generalizados que pueden exceder varios metros. Los volcanes de arena de gran tamaño son muy numerosos; grandes y largas grietas debido a extensiones laterales afectan severamente a las márgenes de ríos, lagos y canales.
- g) En áreas secas, se levantan grandes nubes de polvo.
- h) Bloques de grandes dimensiones pueden ser arrojados al aire desplazándose cientos de metros, incluso en laderas de poca pendiente, dejando impresiones o huellas características en suelos blandos o poco consolidados.



Esto es una contribución del Grupo de trabajo Español de la Subcomisión de Paleosismología y Tectónica Activa de INQUA. Asociación Española para el Estudio del Cuaternario (AEQUA, 2010).



1. LINEAS GUIA DE LA ESCALA ESI-2007

1.1. INTRODUCCIÓN

Los doce grados de intensidad introducidos en las escalas macrosísmicas desde principios del Siglo XX se encuentran fundamentalmente basados en tres tipos de efectos: a) como es percibido por los seres humanos, b) efectos y daños sobre edificaciones y construcciones, y c) efectos sobre el terreno y alteraciones del medio natural (Fig. 1).

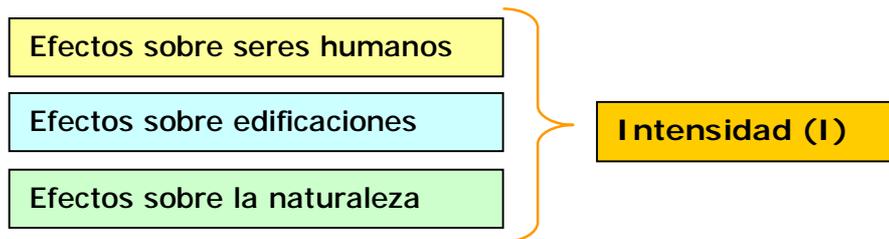


Fig. 1 – De acuerdo con la definición original de intensidad sísmica en escalas de doce grados, i.e., Escala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), Escalas Mercalli Modificadas (MM-31 y MM-56) y la Escala Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK-64), la evaluación de intensidades se encuentra basada en sus efectos sobre las personas, edificaciones y la naturaleza.

Cuando las primeras propuestas de escalas de intensidades fueron propuestas, los diferentes autores siguieron intuitivamente la idea de incluir diferentes efectos sobre diferentes tipos de “receptores” con el fin de poder objetivizar las observaciones lo máximo posible. Aun sin dar una definición o estructuración formal de este tipo de propuesta metodológica De Rossi, Mercalli, Cancani, Omori, Sieger y sus colegas incorporaron a las escalas macrosísmicas estos tres tipos de efectos (humanos, edificaciones y la naturaleza). De esta forma los efectos producidos por los terremotos sobre la superficie terrestre han sido objeto de un notable seguimiento y escrutinio durante el pasado siglo. En la actualidad se reconoce que los efectos sobre la superficie terrestre son resultado del efecto acumulativo de la dinámica de la fuente sísmica (vibraciones generadas durante el desplazamiento y deformaciones finitas), de la propagación de las ondas sísmicas superficiales (aceleración del terreno) y por último, y localmente, del efecto sitio (amplificaciones). Por lo tanto, de acuerdo con esta primaria y valiosa aproximación metodológica, la Intensidad sísmica puede ser definida como una clasificación de efectos que permite medir la severidad de la sacudida sísmica en todo el rango de frecuencias incluidas las deformaciones estáticas y los efectos de la vibración del terreno.

Sin embargo, en las primeras versiones de doce grados (Davison, 1921) los efectos sobre el medio natural se encontraban escasamente documentados y cuantificados. Su presencia en la escala estaba prácticamente condicionada por las numerosas referencias a la aparición o desarrollo de agrietamientos, deslizamientos, modificaciones y alteraciones del terreno contenidas en las distintas fuentes históricas.

Posteriormente, durante la segunda mitad del siglo XX, este tipo de efectos fueron progresivamente perdiendo peso en la literatura científica y en la práctica de la investigación sismológica, muy probablemente como consecuencia de la propia complejidad intrínseca y variabilidad de tales procesos naturales, que en la mayoría de los casos requieren para su estudio conocimientos geológicos generales y específicos. Por el contrario, los otros dos tipos de efectos (humanos y edificaciones) incrementaron progresivamente su cuantificación y análisis durante este mismo periodo debido a su aparentemente más fácil análisis (i.e. Espinosa et al., 1976a; 1976b; Grünthal, 1998), resultando de hecho en ser los dos únicos tipos de efectos utilizados para la asignación de intensidades en las nuevas Escalas Macrosísmicas Europeas (EMS).

Estudios más recientes (Dengler y McPherson, 1993; Serva, 1994; Dowrick, 1996; Esposito et al., 1997; Hancock et al., 2002; Michetti et al., 2004) ofrecen evidencias sustanciales sobre el potencial informativo de los efectos cosísmicos para el establecimiento del tamaño de los terremotos y campos de intensidades, complementando de hecho las escalas clásicas basadas fundamentalmente en los niveles de daños sobre edificaciones y construcciones humanas. En este sentido, el surgimiento de la paleosismología como una nueva e independiente disciplina científica permite en la actualidad una cuantificación detallada de los efectos de los



terremotos sobre la naturaleza sin precedentes. Por lo tanto, hoy día, ya es posible incorporar características diagnósticas de los efectos naturales de los terremotos para la asignación de intensidades. Este, constituye el objetivo primordial de la escala ESI-2007. Su uso, junto con las escalas macrosísmicas convencionales (ver apartado 2) ofrece una imagen más completa de diferentes escenarios sísmicos ya que únicamente los efectos de los terremotos sobre el terreno permiten comparar la intensidad macrosísmica para diferentes escalas temporales y localizaciones geográficas. En cuanto a las escalas temporales los efectos sobre el terreno pueden ser comparables para diferentes ventanas temporales, ya se trate de eventos de tipo instrumental (recientes), históricos o paleosísmicos ampliando nuestro conocimiento a escalas temporales no recogidas en los catálogos sísmicos convencionales. Respecto a la localización geográfica, los efectos sobre el terreno son independientes de las condiciones socio-económicas, desarrollo urbanístico y tipos de edificaciones, presentes en diferentes zonas del planeta. Este último hecho es fundamental para poder asignar intensidades en zonas despobladas o escasamente pobladas, así como comparar eventos sísmicos en zonas densamente urbanizadas con otras de características más rurales.

1.2. EFECTOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS DE LOS TERREMOTOS.

Los efectos de los terremotos sobre el terreno y sobre la naturaleza en general, han de considerarse como cualquier fenómeno de carácter cosísmico que perturbe el medio natural en cualquier aspecto. Es decir se refiere a los efectos sobre la **superficie del terreno** (los más importantes), **cuerpos de agua** ya sean estos **subterráneos** (acuíferos y sistemas kársticos) o **superficiales** (ríos, lagos, embalses, y zonas litorales de mares y océanos), y sobre la **cobertura vegetal arbórea** existente. Todos ellos pueden clasificarse en dos grandes categorías: Efectos primarios y Efectos secundarios.

Los **efectos primarios de los terremotos**, se refieren a la expresión en superficie de la fuente tectónica sismogénica, incluyendo rupturas de falla superficiales, fenómenos de elevación y subsidencia tectónica, abombamientos y basculamientos del terreno. Por lo general se encuentran generalmente asociados a terremotos corticales, de carácter superficial, a partir de un cierto umbral de intensidad. La magnitud de este tipo de deformaciones se encuentra directamente condicionada por el tamaño, y por tanto la energía liberada, de los terremotos. Este tipo de efectos, no sufren (en principio) ningún tipo de saturación, ya que por ejemplo solo se saturarían a partir de intensidad XII. Esto constituye una ventaja evidente sobre otro tipo de criterios, como los seres humanos que se saturan a partir de intensidades IX-X, o los efectos sobre las construcciones que dependiendo de las zonas afectadas pueden saturarse incluso a partir de intensidades VIII-IX. Por ejemplo es difícil distinguir entre el Miedo y Pánico general (VIII) y el Pánico generalizado (IX) que describe la escala MSK, o de la dificultad para mantenerse en pie (VIII) o algunas personas pueden ser lanzadas al suelo (IX) de las escalas EMS.

Los **efectos secundarios de los terremotos** hacen referencia a los efectos producidos por la sacudida sísmica inducida generalmente por la propagación de los trenes de ondas superficiales. Su presencia se observa comúnmente asociada a un determinado rango de intensidades en relación a sacudidas moderadas a intensas del terreno. Para cada uno de los tipos de efectos secundarios la escala ESI-2007 describe las características diagnósticas en cuando a dimensiones para cada rango de intensidad. Muchas veces es únicamente posible asignar un valor mínimo de intensidad, ya que los efectos secundarios si que sufren de saturación dependiendo del contexto geológico, geomorfológico y/o tipo de terreno. Por el contrario, el área total afectada por los efectos secundarios no adolece de saturación y puede usarse como una criterio independiente para la evaluación de la Intensidad epicentral I_0 como veremos en el apartado 3.2.

1.3. EL UMBRAL PARA LAS RUPTURAS SUPERFICIALES DE FALLA EN ZONAS VOLCÁNICAS.

La profundidad del foco sísmico y el contexto geomorfológico donde se produce un terremoto influye largamente en el tipo, características y dimensiones de los efectos cosísmicos registrados. Dos terremotos corticales, que liberen la misma energía, pero que posean diferente profundidad focal y/o afecten a diferentes contexto geomorfológicos pueden producir un espectro muy diferente de efectos secundarios y, en consecuencia, dar lugar a valores de intensidades locales muy diferentes. Este es particularmente el caso de áreas volcánicas activas, donde los terremotos de origen tectónico poseen generalmente bajas magnitudes (energía) y son muy superficiales, generalmente entre 1 y 4 km, pero pueden dar lugar a efectos primarios (p.ej. Azzaro, 1999). Para tener este hecho en cuenta, el umbral para el desarrollo de rupturas de falla superficiales en áreas volcánicamente activas puede rebajarse hasta intensidad VII, mientras que para los terremotos convencionales (5-15 km) situados en otros tipos de contextos geológicos la intensidad mínima requerida suele situarse en los VIII grados.



2. COMO UTILIZAR LA ESCALA DE INTESIDADES ESI-2007.

En aquellas ocasiones que los efectos ambientales de los terremotos se encuentren bien documentados es posible utilizar la escala ESI-2007 para realizar una evaluación independiente de la intensidad sísmica epicentral o local asociada a un terremoto. Siguiendo una metodología muy concreta (Fig. 2) la intensidad sísmica se puede evaluar independientemente o conjuntamente con otras escalas clásicas basadas en los niveles de daños sobre las edificaciones, dando lugar a campos de intensidades “híbridos”.

El uso de la escala ESI-2007 como herramienta independiente (Caso A; Fig.2) únicamente se recomienda cuando los efectos sobre los seres humanos y/o sobre las edificaciones sean inexistentes, o muy escasos (áreas despobladas, entornos rurales débilmente poblados) o sufran saturación (lo normal por encima de intensidad X). Es decir, normalmente hacen referencia a terremotos fuertes que afecten zonas muy despobladas, o zonas pobladas donde el nivel de daños haya llegado a la destrucción casi total de las edificaciones existentes.

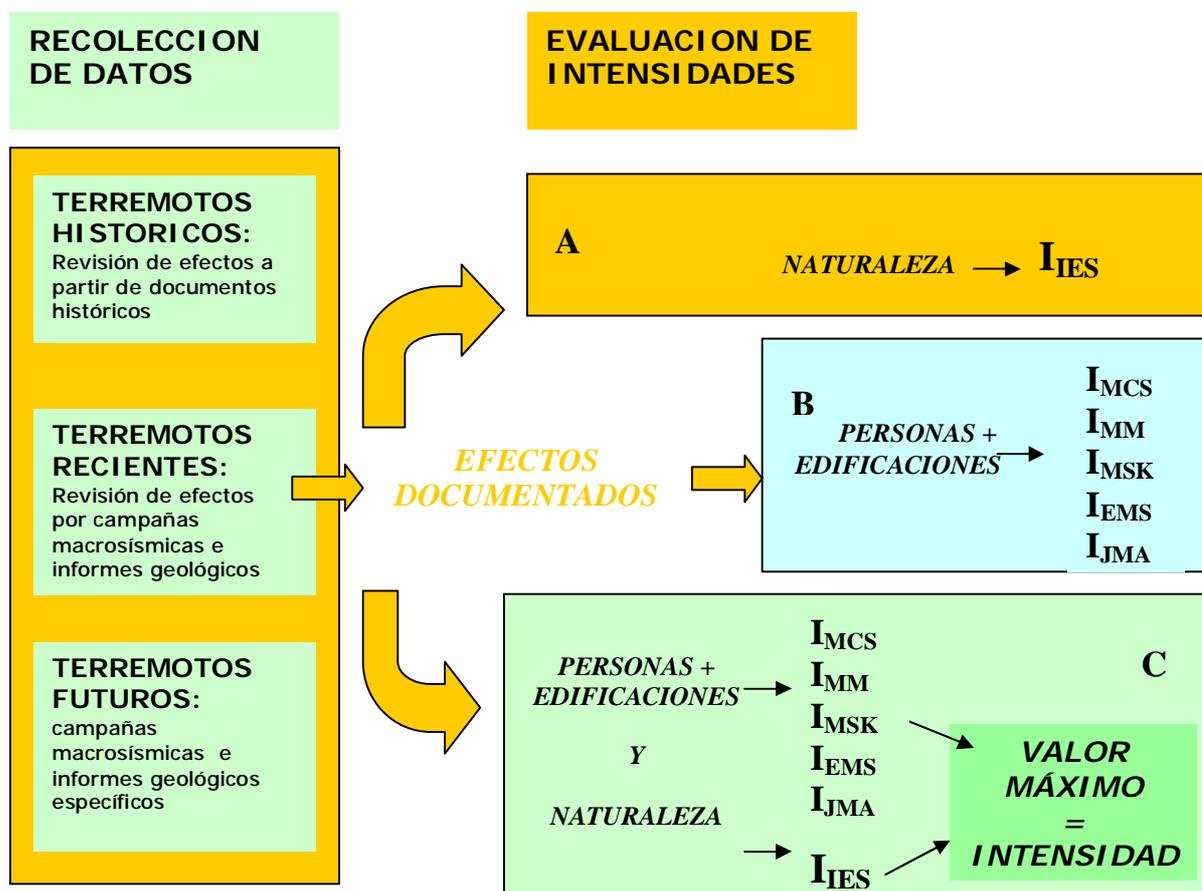


Fig. 2 – Esquema lógico para el uso de la Escala ESI 2007 sola o en conjunto con las escalas macro sísmicas tradicionales, basadas en los niveles de daños. Se consideran tan solo aquellas escalas macro sísmicas de uso común a nivel global, no obstante cualquier escala puede integrarse en este esquema siguiendo una metodología similar (consultar apartado. 2.2).

Como resultado del procesamiento de datos procedente de múltiples terremotos a nivel mundial, la escala ESI-2007 únicamente puede definir intensidades con un nivel de confianza aceptable a partir de intensidad VII, cuando los efectos sobre el terreno comienzan generalmente a ser diagnósticos. Este nivel de confianza incrementa con el aumento del grado de intensidad de la sacudida sísmica y, en particular cuando los efectos primarios comienzan a ser relevantes convirtiéndose en deformaciones permanentes del terreno (Intensidad ≥ VIII). Así la resolución de



esta escala macrosísmica es progresivamente mayor cuanto mayor es la intensidad sísmica que se analiza (VIII < IX < X < XI < XII).

Obviamente cuando los efectos sobre la naturaleza no existan, sean muy escasos, o no se encuentren debidamente documentados, la asignación de intensidades debe basarse en las escalas macrosísmicas convencionales (Caso B; Fig. 2).

Cuando los efectos se encuentren documentados tanto para seres humanos, edificaciones como la naturaleza (Caso C; Fig. 2) permitiéndonos evaluar dos tipos de intensidades independientemente (clásica y ESI-2007) el valor máximo de la intensidad debe de corresponder con el valor máximo resultante de la aplicación de las dos escalas. Obviamente una valoración por parte de expertos constituye una componente esencial en este proceso de comparación de intensidades mediante la utilización de diferentes tipos de receptores.

El procedimiento descrito para el último caso (Caso C) permite el establecimiento de un campo híbrido de intensidades locales resultante de las escalas clásicas y la ESI-2007. Este constituye el mejor de los escenarios posibles, dado que se tendrá en cuenta: 1) los efectos generados por el terremoto; 2) la definición original de la Intensidad sísmica; y 3) permite la comparación de los eventos sísmicos en escalas cronológicas y geográficas muy amplias.

2.1. PROCEDIMIENTO PARA EL USO DE LA ESCALA ESI-2007 COMO HERRAMIENTA SÍSMICA INDEPENDIENTE.

Como ya se ha descrito la Escala ESI-2007 constituye una herramienta igualmente válida para el establecimiento de la intensidad epicentral y/o local de un terremoto.

2.1.1. Intensidad Epicentral (I_0).

La intensidad Epicentral queda definida como la intensidad de la sacudida sísmica en el epicentro del terremoto. Es decir cual sería la intensidad sísmica alcanzada en el hipotético caso de que una población se situara justo en el epicentro sísmico. Se han utilizado diferentes métodos para asignar intensidades epicentrales. Prostpischi (1985) la define como “*el valor de la isosista cerrada de más alto grado de intensidad que al menos posea tres puntos de información diferentes*”.

I_0	EFECTOS PRIMARIOS		EFECTOS SECUNDARIOS
	LONGITUD DE LA RUPTURA SUPERFICIAL	MÁXIMO DESPLAZAMIENTO O DEFORMACIÓN	AREA TOTAL AFECTADA
IV	-	-	-
V	-	-	-
VI	-	-	-
VII	(*)	(*)	10 km ²
VIII	Cientos de metros	Centimétrico	100 km ²
IX	1 - 10 km	5 - 40 cm	1000 km ²
X	10 - 60 km	40 - 300 cm	5000 km ²
XI	60 - 150 km	300 - 700 cm	10000 km ²
XII	> 150 km	> 700 cm	> 50000 km ²

(*) Rupturas de falla de decenas a algunas centenas de metros de longitud y desplazamiento centimétrico, pueden desarrollarse asociadas a terremotos muy superficiales, generalmente ocurridos en zonas volcánicamente activas.

Tabla. 1 – Rango de los parámetros de rupturas de falla (efectos primarios) y extensión areal típica del registro de los efectos secundarios para cada uno de los grados de intensidad ESI-2007.

Los parámetros de las rupturas superficiales de falla así como el área total afectada por efectos secundarios tales como licuefacción y deslizamientos, son dos criterios independientes que pueden utilizarse para la asignación de intensidades epicentrales a partir de intensidad VII.

Los parámetros de rupturas superficiales: Los rangos descritos en la Tabla 1 están basados en el análisis de las dimensiones de rupturas superficiales de falla e intensidades asociadas para algo más de 400 terremotos corticales



superficiales, listados en la base de datos SURFIN (SURface Faulting and INTensity database) desarrollada por el INQUA Scale Project (2007). El uso de esta simple tabla (Tabla 1) para la asignación de intensidades requiere una especial atención cuando las dimensiones de las rupturas superficiales se encuentran próximas a los límites establecidos para dos grados de intensidades consecutivos. En estos casos se recomienda utilizar la distribución areal de los efectos secundarios como criterio diagnóstico principal con el fin de evitar evaluaciones subjetivas.

El área total afectada por efectos secundarios: La escala ESI-2007 utiliza este criterio como diagnóstico para la determinación de intensidades epicentrales a partir de Intensidad VII. Incluso en estos casos, para cada uno de los grados de intensidades listados en la Tabla 1 solo se considera el orden de magnitud del área total afectada, y el valor seleccionado tiene que ser consistente con los efectos primarios registrados. La definición de área total afectada no incluye efectos aislados que ocasionalmente se sitúan en campo lejano distantes de la zona epicentral. Por lo general, la ocurrencia de este tipo de fenómenos aislados en campo lejano está relacionada con las condiciones geológicas y/o geomorfológicas peculiares del sitio afectado. Obviamente, solo un examen realizado por profesionales puede establecer cuáles y que tipo de efectos deben de ser incluidos o excluidos al definir el área total afectada por los efectos secundarios de un terremoto en concreto.

2.1.2. Intensidad Local (I_L).

La intensidad Local puede establecerse esencialmente a partir de la descripción de los efectos secundarios ocurridos en una localidad determinada. Sin embargo, incluso la expresión y dimensiones de los efectos primarios, en términos de máximo desplazamiento asociado a un segmento de falla en particular puede utilizarse para esta evaluación. La evaluación de la Intensidad Local puede realizarse según dos maneras diferentes:

- Localidad-Sitio: Este tipo de aproximación se recomienda cuando las descripciones de los efectos sobre el terreno no han sido analizadas de una manera homogénea a lo largo de toda la zona afectada, lo cual se encuentra comúnmente relacionada con los terremotos históricos, de los cuales tenemos documentación puntual de efectos y localidades concretas. La principal ventaja de este tipo de aproximación es que permite su comparación con intensidades locales procedentes de las escalas macrosísmicas tradicionales.

De acuerdo con este tipo de aproximación, un *Sitio* puede ser definido como cualquier lugar donde un único efecto ambiental cosísmico haya tenido lugar. La descripción de un efecto cosísmico ha de ser realizada a este nivel.

Una *Localidad* puede incluir diferentes sitios y representa un segundo nivel de generalización de datos, en base a los cuales puede ser asignada una intensidad. Así una localidad puede referirse a cualquier lugar habitado, inhabitado o natural. La localidad debe de ser lo suficientemente pequeña para permanecer separada de otras zonas cercanas con intensidades significativamente diferentes, pero lo suficientemente grande como para incluir diferentes sitios de la misma intensidad que permita una asignación de intensidad representativa. Consecuentemente, una localidad debe de ser definida por expertos.

- Análisis en Malla Regular: En el caso de investigaciones de campo muy sistemáticas sobre el área afectada por un terremoto, esta nos puede proporcionar datos suficientes para establecer una distribución homogénea de efectos ambientales cosísmicos. Esta situación es todavía infrecuente para el estudio de terremotos modernos, pero sería lo deseable para futuros terremotos. Se recomienda dividir el territorio en una malla regular, cuyo tamaño de celda dependerá del área afectada a investigar. Así será posible asignar un valor de intensidad a cada una de las celdas en que quede subdividido el territorio. La distribución de intensidades resultante permite definir un mapa de isosistas sobre el mallado. En cualquier caso, la utilización de este nuevo método dará lugar a una difícil comparación e integración de los datos con los mapas de isosistas estándar procedentes de escalas macrosísmicas convencionales.

2.2. CORRELACIÓN ENTRE LA ESI-2007 Y LAS ESCALAS MACROSÍSMICAS TRADICIONALES. .

En principio, la correlación entre escalas de intensidades, grado por grado, debería de rechazarse dado que cada escala particular clasifica los “efectos” de diferente forma. Así, para la comparación de dos terremotos es recomendable utilizar la misma escala macrosísmica, incluso si es necesaria reclasificar la totalidad de los efectos registrados. Por ejemplo, en la escala MSK-64 se usa para la clasificación de intensidades el concepto de “daño típico” y los “tipos de edificaciones”, dando como resultado una escala de intervalos de intensidades constantes. Las escalas MCS y la Mercalli Modificada (MM) se encuentran basadas en los “efectos máximos”, resultando ser



escalas de Orden. Como consecuencia, es mucho más fácil alcanzar la intensidad VIII en la Escala Mercalli original que aplicando la MSK-64.

Con todo ello, los doce grados clásicos en que se subdividen las escalas macrosísmicas, a pesar de incluir efectos ambientales cosísmicos, no son capaces de diferenciar intensidades por encima del grado IX, saturándose. Esto es debido a dos razones fundamentales: (a) no diferencian entre efectos primarios y secundarios; (b) No usan una aproximación cuantitativa a los efectos sobre la naturaleza. Por lo tanto, es esperable que cuando tratemos con terremotos de gran tamaño la aplicación de la Escala ESI-2007 puede resultar en valores de intensidades diferentes y más significativas físicamente hablando, que aquellos procedentes de otras escalas. Es exactamente esta la razón por la que es necesario el desarrollo de este tipo de escalas relacionadas con los efectos ambientales y geológicos de los terremotos.

En la práctica, muy a menudo la investigación macrosísmica se encuentra obligada a la comparación de intensidades procedentes de diferentes escalas. Este hecho ha provocado la aparición y el uso de tablas de conversión, como las propuestas por Krinitzsky & Chang (1978), Reiter (1990) y Panza (2004). Por otro lado, la aplicación de tales tipos de tablas de conversión a provocada frecuentemente la introducción de numerosas incertidumbres adicionales, como es el caso del uso de “medios grados” o “fracciones de grados” que no hacen más sino que confundir las lecturas macrosísmicas convencionales.

MCS, MM-31, MM-56, MSK, EMS, Escala CHINA	IES 2007	JMA
I	n.a.	0
II	n.a.	1
III	n.a.	2
IV	IV	3
V	V	4
VI	VI	5 inferior
VII	VII	
VIII	VIII	5 Superior
IX	IX	6 Inferior
X	X	6 Superior
XI	XI	7
XII	XII	

Tab. 2 – Tabla de Correlación entre la ESI-2007 y otras escalas macrosísmicas convencionales de doce grados y la Escala Japonesa JMA (modificado de Krinitzsky and Chang, 1977; Reiter, 1990; Hancox et al., 2002); “n.a.” significa “no aplicable”.

Para evitar estos inconvenientes la correlación entre las mas importantes escalas macrosísmicas tiene que ser simplificada y basarse en relaciones uno por uno. Como ya se advierte en el trabajo de Michetti et al. (2004), debido a los niveles de incertidumbre inherentes a la propia estructura de las escalas macrosísmicas, los procesos de conversión y reclasificación (los cuales no pueden ser evitados) deben de considerar los doce grados de las escalas como completamente equivalentes. Esto incluye también la Escala Macrosísmica China, que fue originalmente diseñada para ser consistente con la Escala MMS (Xie, 1957; Wang, 2004). En cualquier caso, la correlación con la Escala Japonesa JMA dividida en siete grados, así como con otras escalas existentes no divididas en doce grados, requiere inevitablemente una reagrupación de algunos grados de intensidad (Tabla 2).



3. ESTRUCTURA DE LA ESCALA DE INTESIDADES ESI-2007.

La Escala ESI-2007 ha sido desarrollada para ser consistente con la Escala Macrosísmica Mercalli Modificada (MM-31, Wood & Neumann, 1931; MM-56, Richter, 1958) y la Escala MSK-64 (Escala de Medvedev-Sponheuer-Karnik), dado que estas son las dos escalas de mayor aplicación a nivel mundial e incluyen referencias explícitas a los efectos ambientales de los terremotos.

En general, esta nueva escala ha sido cuidadosamente diseñada con el fin de guardar la consistencia interna de las escalas originales de doce grados, como se discute con mayor profundidad en Michetti et al. (2004). Existe un gran esfuerzo y compromiso científico a nivel mundial relacionado con la determinación de la peligrosidad sísmica usando la intensidad como “parámetro básico”. Cada “nueva palabra” en este campo de investigación no tendría por que resultar en cambios muy dramáticos. Los miembros del Grupo de Trabajo de INQUA somos conscientes que las escalas macrosísmicas tradicionales de doce grados se encuentran fundamentalmente basadas en los efectos sobre las personas (grados II-V), los efectos sobre las edificaciones e infraestructuras (grados VI-IX) y los efectos sobre la naturaleza o el terreno (grados X-XII). La Escala ESI-2007 es por tanto especialmente útil para la evaluación de intensidades en el rango de sus valores más altos, pero como se mencionó anteriormente, para evitar confusiones se ha mantenido la numeración clásica.

3.1. PRINCIPALES GRUPOS DEGRADOS DE INTENSIDAD.

La Escala ESI-2007, comienza allí donde los efectos ambientales cosísmicos comienzan a ser regularmente observados en condiciones favorables, dígase a partir de la intensidad IV. La escala es lineal y funciona sin ambigüedades hasta el grado de intensidad XII. En la primera versión de la escala, las intensidades I, II y III también fueron definidas utilizando los efectos ambientales asociados (Michetti et al., 2004). Es importante resaltar que algunos de los efectos en la naturaleza, especialmente los relacionados con masas de agua y fenómenos hidrogeológicos (Montgomery & Manga, 2003 y referencias incluidas), así como las deformaciones tectónicas primarias detectadas instrumentalmente (Amoroso & Crescentini, 1999), han sido observadas para niveles de intensidades muy bajos. Quizá, nuevos datos, permitirán en un futuro la revisión de la escala para poder incluir efectos ambientales adecuados para definir intensidades en el rango de I a III. Sin embargo, transcurridos cuatro años desde el comienzo de la aplicación de la escala a través del “INQUA Scale Project” parece claro que, con el conocimiento acumulado hasta la fecha, los efectos sobre el medio natural en este rango de intensidades no es diagnóstico.

Comparando la ESI-2007 con otras escalas macrosísmicas de doce grados pueden identificarse tres grandes grupos de intensidades:

- I) I-III: No existen efectos ambientales o geológicos que puedan ser utilizados como diagnósticos
- II) IV-IX: Los efectos ambientales son fácilmente observables a partir de intensidad IV, y a menudo estos son permanentes y diagnósticos a partir de intensidad VII. Sin embargo, estos efectos son menos adecuados para asignar intensidades que los efectos sobre las personas y las edificaciones usados por otras escalas. Su uso es por tanto especialmente recomendado para zonas escasamente pobladas.
- III) X-XII: Los efectos sobre las personas, edificaciones e infraestructuras se saturan, mientras que los efectos sobre la naturaleza comienzan a ser dominantes. De hecho, algunos tipos de efectos ambientales cosísmicos no sufren saturación a estos altos niveles de intensidades, siendo las herramientas más efectivas y apropiadas para evaluar la intensidad de un terremoto.

3.2. NOMBRE Y DESCRIPCIÓN.

El Nombre de la escala refleja la fuerza del terremoto correspondiente y el papel de los efectos ambientales en su evaluación.



En la descripción, se reporta en primer lugar las características, escala y tamaño de los efectos primarios asociados a cada uno de los niveles de intensidad. Los efectos secundarios se describen: i) en términos de su distribución areal total para la evaluación de intensidad epicentral a partir de intensidad VII; ii) agrupados en distal categorías (consultar el apartado 2 y Tabla 3) ordenados por su grado inicial de ocurrencia.

Los textos en *cursiva (itálica)* han sido utilizados para resaltar aquellos efectos que pueden ser usados como diagnósticos para un nivel de intensidad determinado.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS EFECTOS AMBIENTALES DE LOS TERREMOTOS..

Es posible agrupar las características de los efectos ambientales de los terremotos (EEE) de dos formas diferentes

- La Ficha de EEE, diseñada para ser usada durante la fase inicial de emergencia tras un terremoto (Anexo I).
- La Base de Datos EEE, diseñada para ser usada para la revisión de los informes históricos de terremotos y como archivo final.

Ambos documentos pueden descargarse desde la siguiente página web:

http://www.apat.gov.it/site/en-GB/Projects/INQUA_Scale/Documents/

La estructura de las fichas y Base de Datos EEET es similar, de manera que se pueden migrar datos de una a otra sin dificultad.

EFECTOS PRIMARIOS	Efectos ambientales	Rango Diagnóstico de Intensidad	
	RUPTURAS SUPERFICIALES DE FALLA	VIII (*)	XII
EFECTOS SECUNDARIOS	A ANOMALIAS HIDROLÓGICAS	IV	X
	B OLEAJE ANOMALO/TSUMAMIS	IV	XII
	C GRIETAS Y FISURAS	IV	X
	D DESLIZAMIENTOS	IV	X
	E SACUDIMIENTO DE ÁRBOLES	IV	XI
	F LICUEFACCION	V	X
	G NUBES DE POLVO	VIII	VIII
	H MOVIMIENTO DE ROCAS	IX	XII

(*) para intensidad VII rupturas superficiales de falla muy limitadas de decenas a centenas de metros de longitud y desplazamiento centimétrico pueden tener lugar esencialmente en áreas volcánicas asociadas a eventos tecto-volcánicos muy superficiales.

Tabla 3 – Rango diagnóstico de intensidad para cada uno de los efectos ambientales considerados por la esi-2007.

3.3.1. Efectos Primarios.

Las dimensiones o escala de los efectos primarios se expresan en términos de dos diferentes parámetros: i) La longitud de ruptura total (SRL); y ii) Desplazamiento máximo (MD). Su presencia se encuentra normalmente asociada a un valor de intensidad mínima (VIII), excepto en el caso de terremotos muy superficiales en zonas volcánicas. La cantidad de deformación superficial (elevación o subsidencia tectónica) también es considerada en la escala.



3.3.2. Efectos Secundarios.

Los efectos secundarios se clasifican en ocho grandes categorías para esta escala (Tabla 3). Mientras algunas descripciones son consideradas diagnósticas (*Cursiva – Itálica*), otras son susceptibles de ser cambiadas después de su implementación en la base de datos que correlaciona las anomalías características de algunos efectos secundarios para distintos niveles de intensidad.

En cualquier caso, la evaluación de un valor razonable para el área total afectada por efectos secundarios se recomienda la descripción y cartografía del conjunto de efectos secundarios catalogados, incluyendo aquellos todavía no incorporados en las descripciones de los diferentes grados de intensidad de la escala (p.ej. Colapsos kársticos).

A. Anomalías Hidrológicas.

Las anomalías hidrológicas comienzan a ser evidentes a partir de intensidad III, pero se saturan (su escala no incrementa) a partir de intensidad X. Pueden ser divididas en dos grupos:

- *Efectos sobre las superficie de masas de agua: 1) Desbordamientos; 2) Variaciones de caudal; 3) turbidez de los ríos*
- *Efectos en las aguas subterráneas: 1) Secado de manantiales y fuentes; 2) Aparición de nuevas fuentes o manantiales; 3) Cambios de temperatura en las aguas; 4) Anomalías geoquímicas; 5) Turbidez de fuentes y manantiales.*
- *Información complementaria de utilidad puede ser: 1) la cantidad y tasas en la variación de la temperatura y caudales; 2) la presencia de elementos químicos anómalos; 3) el rango temporal de duración de la anomalía; 4) el retraso de la aparición de la anomalía respecto a la hora origen del terremoto.*

B. Oleaje anómalo y tsunamis

En esta categoría se incluyen: seiches en cuencas cerradas, desbordamientos de agua de estanques, lagos y presas, así como el desarrollo de tsunamis. En el caso de los tsunamis, más que el tamaño propiamente dicho de la ola, se consideran sus efectos sobre el litoral (especialmente el runup, erosión litoral y cambios en la morfología de la línea de costa), sin olvidarse de aquellos efectos sobre las personas, edificaciones y estructuras que son tomados como diagnósticos de la intensidad sufrida.

Los efectos pueden incluso aparecer a partir de intensidad IV, pero son más diagnósticos para intensidades en el rango de IX a XII. La definición del grado de intensidad es más ventajosa que aquellas propuesta para las intensidades de tsunami por Papadopoulos & Imamura (2001) y para la mayor parte de descripciones de este tipo de efectos planteadas a nivel global (p.ej. Lander et al., 2003).

C. Agrietamientos y fisuración del terreno

Los agrietamientos del terreno son observables a partir de intensidad IV, pero se saturan (su tamaño no se incrementa) a partir de intensidad X.

Parámetros diagnosticos para este tipo de efectos son la litología (suelos o roca), dirección y buzamiento, anchura máxima y densidad.

D. Deslizamientos del terreno

Los movimientos de ladera, incluyendo aquellos que se producen en ambientes subacuáticos, se agrupan en: 1) Caída de rocas; 2) Caída de debris; 3) Cabeceos; 4) Deslizamientos de rocas; 5) deslizamientos de debris; 6) Avalanchas; 7) Deslizamientos de suelos; 8) Debris flows; 9) flujos de tierra; 10) Flujos de barro; 11) Movimientos lentos del terreno; 12) Flujos de tierra lentos; 13) Flujos de barro lentos; 14) expansiones laterales del terreno; 15) Sackungs; y 16) Movimientos complejos que agrupan dos o más tipos de los descritos.



Estos procesos son observables a partir de intensidad IV, pero se saturan (su tamaño no incrementa) a partir de intensidad X.

El volumen total de terreno movilizado es un parámetro diagnóstico para la evaluación de la intensidad. Este se puede estimar de forma general a partir del área deslizada cuando el espesor de la masa movilizada puede ser razonablemente estimado. Las incertidumbres introducidas por este procedimiento no resultan significativas para la evaluación final de la intensidad.

Complementariamente otros datos de interés son: 1) dimensiones máximas de los bloques movilizados; 2) densidad; 3) cantidad de desplazamiento; 4) humedad del terreno; 5) tiempo de retardo respecto a la hora origen del terremoto.

E. Agitamiento de árboles y vegetación.

El agitamiento de árboles ha sido observado a partir de intensidades mínimas de IV. Es importante el registro y documentación de rotura de ramajes y las características geomorfológicas del área afectada (llanura, ladera). La definición de los grados de intensidad básicamente se ajusta a la propuesta por Dengler & McPherson (1993).

F. Procesos de Llicuefacción del terreno

Los procesos de licuefacción comúnmente ocurren a partir de intensidad V. Los parámetros diagnósticos para esta categoría son el diámetro de los volcanes de arena y la litología del sustrato. Su saturación tiene lugar a partir de intensidad X. Otros datos de utilidad serían la forma, tiempo de retardo, la profundidad del nivel freático, y la ocurrencia de eyecciones de agua y arena.

G. Nubes de polvo

Las nubes de polvo se desarrollan a partir de intensidad VIII, típicamente en zonas áridas.

H. Desplazamiento y movimientos de rocas

El desplazamiento de cantos y rocas se ha observado a partir de intensidad IX. Las dimensiones de las rocas y bloques movilizados, así como su traza sobre los suelos son considerados como elementos diagnósticos para la asignación de intensidades.



Esto es una contribución del *Grupo de trabajo Español* de la *Subcomisión de Paleosismología y Tectónica Activa de INQUA. Asociación Española para el Estudio del Cuaternario* (AEQUA, 2010).



Referencias Bibliográficas

- Amoruso A. & Crescentini L. (1999) - Coseismic and aseismic strain offsets recorded by the Gran Sasso Strainmeter. *Phys.Chem. Earth (A)*, 24, 2, 101-104.
- Azzaro R. (1999) - Earthquake surface faulting at Mount Etna Volcano (Sicily) and implications for active tectonics. *Journal of Geodynamics*, 28 (2-3), 193 – 213.
- Davison, C. (1921). *On scales of seismic intensity and on the construction of isoseismal lines*. *Bull. Seis. Soc.Am.*, 11, 95-129.
- Dengler L. & McPherson R. (1993) - The 17 August 1991 Honeydew earthquake north coast California: a case for revising the Modified Mercalli Scale in sparsely populated areas. *Bull. Seis. Soc. Am.* 83, 4 1081-1094.
- Dowrick D. J. (1996) - The Modified Mercalli earthquake intensity scale- Revisions arising from recent studies of New Zealand earthquakes. *Bull. Of new Zeal. Nat. Soc. For earthquake Engineering*, vol 29, n.2, 92-106.
- Espinosa, A. F., R. Husid, S. T. Algermissen, & J. de las Casas (1976a) - The Lima earthquake of October 3, 1974, intensity distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67, 1429–1440.
- Espinosa, A. F., R. Husid, & A. Quesada (1976b) - Intensity distribution and source parameters from field observations of the February 4, 1976, Guatemalan earthquake. In “The Guatemalan Earthquake of February 4, 1976, a Preliminary Report”, A. F. Espinosa, ed., U.S. Geological Survey Professional Paper 1002, 52–66 .
- Esposito E., Porfido S., Mastrolorenzo G., Nikonov A.A. & Serva L., (1997) - Brief review and preliminary proposal for the use of ground effects in the macroseismic intensity assesment. *Proc. 30th International Geological Congress, Beijing, China*, vol 5. *Contemporary lithospheric motion seismic geology, the Netherlands, VSP ed.*, ISBN: 90-6764-269-X, 233-243.
- Grunthal G. (1998) - European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). *European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scales. Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 15, Luxembourg, 99 pp.
- Hancox G.T., Perrin N.D. & Dellow G.D. (2002) – Recent studies of historical earthquake-induced landsliding, ground damage, and MM intensity in New Zealand. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 35 (2), 59-95, ISSN 1174-9857.
- INQUA Scale Project (2007) – Available online at http://www.apat.gov.it/site/en-GB/Projects/INQUA_Scale
- Krinitzsky, E.L. & Chang, F.K. (1988). Intensity-related earthquake ground motions. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 25, 425-435.
- Lander J.F., Whiteside L.S. & Lockridge P.A. (2003) *Two Decades of Global Tsunamis 1982-2002. The International Journal of The Tsunami Society (21) 1*, NOAA - NGDC, Boulder, Colorado USA, 73 pp.
- Michetti A. M., E. Esposito, Gürpınar, J. Mohammadioun, B. Mohammadioun, A., S. Porfido, E. Rogozhin, L. Serva, R. Tatevossian, E. Vittori, F. Audemard, V. Comerci, S. Marco, J. McCalpin & N.A. Mörmner. (2004) - The INQUA Scale. An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. *Special paper APAT, Mem. Descr. Carta geol. d'Italia , Vol LXXVII. (E. Vittori & V. Comerci eds.)*, 115 pp.
- Montgomery D.R. & Manga M. (2003). *Streamflow and Water Well Responses to Earthquakes*. *Science*, 300, 27 June 2003, 2047-2049.
- Panza G.F. (2004) - Correlation among intensity scales. Downloadable from http://www.apat.gov.it/site/en-GB/Projects/INQUA_Scale/Documents/, 15 p., Trieste.
- Papadopoulos, G.A. & F. Imamura (2001) - Proposal for a new tsunami intensity scale. *Proc. Internat. Tsunami Conference, Seattle , 7 – 9 August 2001*, 569 – 577.
- Postpischl D. (1985) *Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980*. CNR-PFG 114-. 2B: 238 pp.
- Reiter L. (1990) - *Earthquake Hazard Analysis. Issues and insights*. Columbia University Press, New York, 254 pp.
- Richter C.F. (1958) – *Elementary Seismology*, 768 p., W H Freeman & Co, San Francisco.



Serva L. (1994) - *Ground effects in intensity scales*. *Terra Nova* 6, 414-416.

Wang J. (2004) - *Historical earthquake investigation and research in China*. *Annals of Geophysics*, 47 (2/3), 831-838.

Xie Y. (1957) - *A new scale of seismic intensity adapted to the conditions in Chinese territories*. *Acta Geophysica Sinica*, 6-1, 35-47. (in Chinese).



Esto es una contribución del **Grupo de trabajo Español** de la **Subcomisión de Paleosismología y Tectónica Activa** de **INQUA**. **Asociación Española para el Estudio del Cuaternario** (AEQUA, 2010).



Catalogación de los efectos geológicos y ambientales de los terremotos en España en la Escala ESI-2007 y su aplicación a los estudios paleosismológicos.

Catalogue of the geological and environmental effects of earthquakes in Spain in the ESI-2007 Macroseismic Scale and their application to paleoseismological analyses.

P.G. Silva¹, M.A. Rodríguez-Pascua², R. Pérez-López³, T. Bardají⁴, J. Lario⁵, P. Alfaro⁶, J.J. Martínez-Díaz⁷, K. Reicherter⁸, J. Giménez⁹, J. Giner³, J.M. Azañón¹⁰, J.L. Goy¹, C. Zazo¹¹

1. Dpto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca. Hornos Caleros, 50. 05003-Ávila. pgsilva@usal.es
2. Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas, 23, 28003-Madrid. ma.rodriguez@igme.es
3. Universidad San Pablo-CEU. 4. Dpto. Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Alcalá de Henares, 28871-Alcalá de Henares, Madrid.
5. Dpto. Ciencias Analíticas, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Educación a distancia (UNED), 28040-Madrid. 6. Universidad de Alicante. 7. Universidad Complutense. 8. Institut für Neotektonik und Georisiken, RWTH Aachen University, Lochnerstr. 4-20, 52056 Aachen (Alemania). 9. Dirección General Recursos Hídricos de Mallorca. 10. Dpto. Geología, Universidad de Granada. 11. Dpto. Geología Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC). José Gutiérrez Abascal, 2. 28004-Madrid.

Resumen: Este trabajo resume la contribución del grupo de trabajo español sobre efectos geológicos y ambientales de los terremotos en la elaboración de la escala macrosísmica ESI-2007 promovida por la subcomisión de paleosismología de INQUA. En la actualidad se ha clasificado un total de 20 eventos sísmicos, 7 instrumentales y 13 históricos. Dos de estos últimos se encuentran tan solo evidenciados por su registro geológico o arqueológico (Tobarra y Baelo Claudia), mientras que el resto se encuentra convenientemente catalogados en los catálogos existentes. Se han catalogado un total de 103 efectos geológicos para los eventos mencionados, de los cuales 36 se han implementado en la base de datos EEE de INQUA. Los datos recogidos en el presente catálogo cubren intensidades desde VI a X de la escala convencional MSK, con magnitudes asociadas entre 4,3 y 6,7. En los eventos analizados las intensidades ESI-07 estimadas provisionalmente resultan similares a las MSK y se sitúan entre uno o dos grados por encima de las intensidades EMS correspondientes.

Palabras clave: Terremotos, Efectos Geológicos, Intensidad Sísmica, España.

Abstract: This work summarizes the contribution of the Spanish working group on the Earthquake Environmental Effects (EEE) for their implementation in the ESI-2007 macroseismic Intensity Scale promoted by the INQUA Subcommission on Paleoseismology. At present the Spanish working group has classified a total amount of 20 seismic events, 7 of them instrumental earthquakes and the other 13 historical ones. Two of the historical ones are only evidenced by geological, geomorphologic (Tobarra, Albacele) and archaeological data (Baelo Claudia, Bolonia Bay, Cádiz), the rest are well documented in historical sources and existing seismic catalogues. From the bulk 103 site locality effects cataloged a total of 32 EEE files have been completed, which have been already implemented in the EEE INQUA data-base. The Spanish data cover intensity degrees from V to X of the conventional MSK Scale, with associated magnitudes (Ms) from 4.3 to 6.7. The analyzed events result in estimated ESI-07 intensities similar to that of the MSK conventional scale, but one or two degrees higher than those resulting from the EMS scale estimations.

Key words: Earthquakes, Geological Effects, Seismic Intensity, Spain.

*Artículo publicado En la Revista Científica Española Geotemas Vol. 10. 1063-1066
VII Congreso Geológico de España, Las Palmas de Gran Canaria, 2008.*



actualidad. Lo que supone una importante y creciente base de datos que ha catalogarse adecuadamente e incorporarse necesariamente a los análisis de peligrosidad sísmica en España.

CALIDAD DE LA INFORMACION (<i>Qg</i>)	EFFECTOS DOCUMENTADOS	EVENTOS ANALIZADOS
INSTRUMENTALES (I) (1950 AD -Actualidad) VI-VII MSK	5 completados 11 en progreso	Albuñuelas, 1956 Mula, 1999 La Paca, 2005
EVENTOS CALIDAD A (1800 – 1950 AD) IX-X MSK	20 completados 12 en progreso	Torreveja, 1829 Arenas Rey, 1884 Dalias, 1824
EVENTOS CALIDAD B (1800 - Actualidad). Datos aislados pero bien documentados-VIII MSK	4 completados 8 en progreso	P. Mallorca, 1851 Huércal, 1864
EVENTOS CALIDAD C (1300 – 1800 AD)	0 completados 25 en progreso	Tavernes, 1396 Carmona, 1504
EVENTOS CALIDAD (g) (< 1100 AD)	1 completado 5 en progreso	Baelo C., 395 Tobarra, 1100
TOTAL (Datos): 103	32	71

TABLA I. Resumen de los datos analizados para diferentes eventos sísmicos en España. En los eventos analizados solo se muestran aquellos de los que se poseen más datos.

LA ESCALA ESI-2007: ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY.

Los datos sobre los que se ha construido la ESI-2007 indican que los efectos geológicos de los terremotos comienzan siendo patentes a partir de intensidad VI-VII, pero tan solo son relevantes a partir de intensidad IX y solo imprimen cambios permanentes en el paisaje a partir de intensidad X. La ESI-2007 clasifica los terremotos en tres grandes grupos de intensidades: A) IV-VII (efectos observables); B) VIII-X (efectos permanentes y diagnósticos), y C) XI-XII (efectos característicos) en grado creciente según los efectos geológicos y ambientales que se producen en ellos. Los efectos cosísmicos que se consideran se pueden dividir en primarios y secundarios. Los primarios atienden evidentemente a las rupturas superficiales de falla (en sus diferentes ordenes) y son características de tipo lineal que pueden extenderse hasta decenas (grupo B) y centenas de kilómetros (grupo C). Los efectos cosísmicos secundarios son los más numerosos y pueden separarse en dos grandes subgrupos, con y sin registros geológicos y/o geomorfológicos, es decir permanentes o transitorios. Dentro de los permanentes se consideran por orden de importancia, deslizamientos, liquefacción y agrietamientos del terreno. El área máxima en la cual han podido observarse los dos primeros se utiliza como diagnóstica para proceder a la asignación de la Intensidad máxima macrosísmica del paleoevento y/o sismo histórico. Dentro de los efectos secundarios no permanentes se consideran, anomalías hidrológicas (cambios de nivel de pozos, caudal de las fuentes, aparición y desaparición de manantiales, cambios de propiedades físico-químicas, enturbiamiento y temperatura del agua, etc...), oleaje, cambios de flujo y/o de curso de los ríos, vibración de árboles, generación de nubes de polvo, y salto de rocas. Los efectos de los tsunamis están en proceso de catalogación para su inclusión dentro de la nueva escala de intensidades, no obstante su clasificación es bastante más problemática y su registro bastante más difícil de cuantificar adecuadamente.

Cada uno de los grupos de intensidades establecido posee un diferente grado de registro geológico y geomorfológico. Así el grupo A posee tan solo un registro geológico excepcional de los efectos primarios y los efectos secundarios solo como paleosismitas. El grupo B posee un registro geológico frecuente y geomorfológico excepcional y/o difícil de reconocer. El grupo C posee un registro geológico y geomorfológico característico que en muchas ocasiones da lugar a verdaderos paisajes sísmicos. Por último, hay que señalar que la ESI-2007 no se ha planteado como una escala macrosísmica que sustituya a las ya existentes, sino que se complementa con ellas en el caso de que se registren alguno de los efectos geológicos o ambientales mencionados anteriormente, sean bien los únicos o no en producirse durante un terremoto determinado en una zona específica.

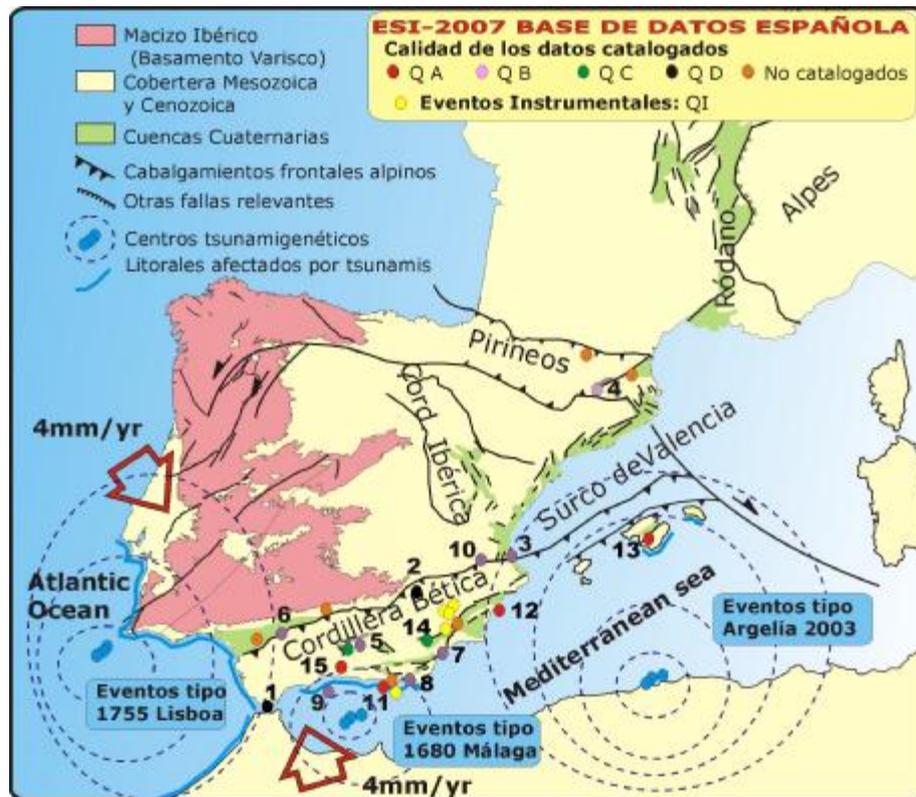


FIGURA 2: Eventos sísmicos analizados en España. 1 (Baelo Claudia, 260-395 AD); 2 (Tobarra, 1100 AD); 3 (Tavernes, 1392 AD); 4 (Queralbs, 1428 AD); 5 (Atarfe, 1431 AD); 6 (Carmona, 1504 AD); 7 (Vera, 1522 AD); 8 (Alhama de Almería, 1522 AD); 9 (Málaga, 1680 AD); 10 (Estubeny, 1748 AD); 11 (Dalias-Berja, 1824 AD); 12 (Torre Vieja, 1829); 13 (Palma de Mallorca, 1851); 14 (Huércal-Overa, 1863); 15 (Arenas del Rey, 1884). Los eventos instrumentales corresponden a los de Lorca (1973); Adra (1993-1994); Mula (1999), Bullas (2002) y La Paca (2005)

EFFECTOS GEOLÓGICOS DE LOS TERREMOTOS EN ESPAÑA: REGISTRO y CATALOGACIÓN.

Los terremotos históricos de mayor tamaño registrados en la Península Ibérica poseen intensidades de X MSK o IX-X EMS, lo que contrasta con la relativamente moderada magnitud estimada para tales eventos, que normalmente se encuentra entre 6,5 y 6,9. Similares niveles de magnitud se están obteniendo recientemente a partir de los datos sismológicos procedentes de fallas activas cuaternarias en las Cadenas Costeras Catalanas y Cordillera Bética. Esta aparente discordancia de datos de magnitudes e intensidades se debe fundamentalmente a que gran cantidad de los efectos geológicos producidos durante los terremotos históricos en España se encuentran relacionados con efectos cósmicos secundarios. Estos poseen un grado de preservación local (Deslizamientos rotacionales y escarpes de falla, Arenas del Rey, 1884: X MSK), o prácticamente nulo (licuefacción, Torre Vieja, 1829: X MSK), pero indudablemente han afectado a su catalogación en las diferentes escalas macrosísmicas. Los datos recopilados indican que los efectos geológicos tienen un efecto relevante a corto plazo (transitorio) en áreas entre 500-350 km² (Isosistas \geq IX MSK), pero los efectos más espectaculares se concentran habitualmente en áreas inferiores a los 250 km², que se reducen a unos 50 km² cuando la intensidad del evento ha sido \leq VIII MSK.

Por otro lado, los eventos instrumentales (> 1950 AD) de mayor tamaño registrados en la Península poseen magnitudes entre 4,8 y 5,0 mb e intensidades máximas de VI-VII MSK. En casi todos los casos las áreas macrosísmicas poseen una extensión alrededor de los 80-100 km², pero los efectos geológicos relevantes apenas llegan a afectar a áreas de 10 km². En casi todos los casos estos efectos geológicos están relacionados con pequeños deslizamientos locales (en áreas inestables), desplazamientos de bloques y caída de rocas (Bullas, 2002 y La Paca, 2005), grietas de anchura milimétrica y extensión decamétrica sobre terrenos cuaternarios poco compactados, y fundamentalmente cambios hidrológicos (químicos y variación de niveles o caudales) en fuentes y pozos. A pesar de su nulo potencial de preservación y su ocurrencia local estos efectos introducen cambios en su catalogación según distintas escalas de VI-VII MSK, VI-V EMS o VI ESI. Indudablemente la intensidad no es un parámetro directamente ligado al tamaño real de la fuente sísmica que la genera, sino más bien la intensidad esta relacionada



con la respuesta del terreno a la sacudida sísmica, dependiendo así de la geología y topografía de cada zona en concreto, como sugieren las escalas MSK y ESI.

Así pues lo que sabemos de los grandes terremotos históricos en España, es que en su mayor parte, los efectos secundarios tales como deslizamientos (Carmona, 1504, Vera, 1518, Güévejar, 1755 y 1884) y liquefacción extensiva (Torre Vieja, 1829) catapultaron a estos terremotos a la intensidad X MSK. No obstante, el obviar los efectos geológicos de estos terremotos para la evaluación de la peligrosidad sísmica de estas zonas, no parece lo más adecuado ya que precisamente fueron los efectos secundarios los que amplificaron ó Magnificaron los daños que se encuentran tras su catalogación.

TIPO DE EFECTO GEOLÓGICO ANALIZADO	ESTUDIADOS	EN ESTUDIO
RUPTURAS SUPERFICIALES	2	3
AGRIETAMIENTOS y FISURAS	1	18
GRANDES DESLIZAMIENTOS	3	3
CAIDA DE ROCAS	1	22
LICUEFACCIÓN y SUBSIDENCIA	12	9
CAMBIOS EN MANANTIALES y POZOS	10	17
CAMBIOS DEL NIVEL DEL MAR y TSUNAMIS	1	3
OTROS	2	6

TABLA II. Resumen de los diferentes tipos de efectos geológicos de los terremotos analizados y catalogados para diferentes eventos sísmicos en España.

Un resumen del estado actual del catálogo se presenta en la Tabla I. En ella se muestra el nuevo índice implementado (Q_g) referente a la calidad de los datos geológicos a partir de los cuales se ha procedido a la evaluación de las intensidades ESI-2007.

Hasta la fecha se han catalogado un total de 20 terremotos, 5 instrumentales y 15 históricos, dos de ellos solamente evidenciados por datos geológicos, geomorfológicos (Tobarra, Albacete) y arqueológicos (*Baelo Claudia*, Bolonia, Cádiz). En total el catálogo previo recoge un total de 103 observaciones en diferentes localidades con efectos geológicos de diferente índole. De todas ellas se ha procedido a la catalogación de un total de 32 observaciones que han sido documentadas bien sobre el terreno o bien atendiendo a descripciones realizadas en informes científicos de la época y/o en trabajos de investigación científicos recientes. De cada una de ellas se ha realizado una ficha detallada, cuyos datos han sido implementados en la base de datos EEE de la Escala ESI-2007 de INQUA. En la actualidad, se encuentran en proceso de revisión y catalogación nuevos terremotos como los de Lorquí- Ceutí (1991), Jacarilla (1952), y la serie sísmica de Adra (1993-1994).

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2005-04655/BTE (USAL), CGL2005-01336/BTE (CSIC), y CGL2006-05001/BTE (IGME).

REFERENCIAS

- Martínez Solares, J.M., Mezcuá, J. (2002): Catálogo Sísmico de la Península Ibérica. Monografías IGN, 18. IGN, Madrid, 253 p.
- Michetti, A.M. et al. (2004): The INQUA Scale: An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. *Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia*, 67. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia.
- Michetti, A.M. et al. (2007): Intensity Scale ESI-2007. *Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia*, 74. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia.

CUADRO DE LA INQUA ENVIRONMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE 2007 - ESI 07

Elaborada por el Grupo de Trabajo Español AEQUA (modified from Silva et al., 2008; Reichert et al., 2009)

	EFECTOS PRIMARIOS RUPTURAS ELEVACI/SUBSD SUPERFICIALES TECTONICA		EFECTOS SECUNDARIOS CON REGISTRO GEOLOGICO Y GEOMORFOLOGICO GRIETAS TERRENO MOVIMIENTOS DE LADERA		PROCESOS DE LICUEFACCION		OLEAJE ANOMALO Y TSUNAMIS		OTROS EFECTOS SECUNDARIOS CON REGISTRO GEOLOGICO MENOR ANOMALIAS MOVIMIENTO HIDROGEOLOGICAS DE ARBOLES		AREA AFECTADA Y TIPO DE REGISTRO AREA Tipo de REGISTRO	
I-III	Observado	AUSENTES	AUSENTES	Raros y locales	Solo Niveles de deform (semitiles)	1 cm	cm	Cambios temporales del nivel del mar	Cambio temporal de nivel H ₂ O	Raros y locales	Raros y locales	Raros y locales
IV	DAÑO	AUSENTES	AUSENTES	Raros y locales	3 cm	1 m	Oleaje <1m	Cambio temporal de turbidez H ₂ O	Cambio temporal Físico-Químico H ₂ O	Raros y locales	Raros y locales	Raros y locales
VII	DAÑO	Raros y locales	Dislocaciones del Terreno Permanentes (< 10 cm)	10 ¹ ·10 ¹ m ³	50 cm	1 m	1-2m	Cambio temporal de temperatura H ₂ O	Desecación temporal Fuentes H ₂ O	Caida de Ramaje	Local solo zona epicentral	Geológico frecuente y excepcionalmente Geomorfológico
VIII	DESTRUCTIVO	cm	< 1m	10 ¹ ·10 ¹ m ³	1 m	1 m	3-5 m	Cambios de Nivel en Fuentes	Cambios de Nivel en Fuentes, ríos y acuíferos	Caida de Ramaje	100km ²	Geológico característico y frecuentemente Geomorfológico
B	MUY DESTRUCTIVO	dm	< 10m	10 ¹ ·10 ¹ m ³	Volcanes Arena	0,5 m	> 10 m	Oleas Gigantes	Cambios de Nivel en Fuentes	Caida de Ramaje	1000km ²	Geológico y Geomorfológico Característico
X	MUY DESTRUCTIVO	metric	> 10m	Deslizamientos Gigantes	0,5 m	> 5 m	Tsunamis	Cambios de Nivel en Fuentes	Cambios de Nivel en Fuentes	Caida de Ramaje	5000km ²	Geológico y Geomorfológico Característico
XI	DESTRUCTIVO	metric	> 10m	Deslizamientos Gigantes	0,5 m	> 5 m	Tsunamis	Cambios de Nivel en Fuentes	Cambios de Nivel en Fuentes	Caida de Ramaje	10.000km ²	Geológico y Geomorfológico Característico
C	DESTRUCTIVO	metric	> 10m	Deslizamientos Gigantes	0,5 m	> 5 m	Tsunamis	Cambios de Nivel en Fuentes	Cambios de Nivel en Fuentes	Caida de Ramaje	50.000km ²	Geológico y Geomorfológico Característico
XII	DEVASTADOR	metric	> 100 km	Deslizamientos Gigantes	0,5 m	> 5 m	Tsunamis	Cambios de Nivel en Fuentes	Cambios de Nivel en Fuentes	Caida de Ramaje	50.000km ²	Geológico y Geomorfológico Característico

DESCRIPCION Desplazamiento vertical y horizontal de rupturas cosísmicas Dislocaciones Permanentes del Terreno Anchura y longitud de agrietamientos en suelos y rocas Volumen Total de material movlizado Dimensiones de niveles licuefactados y volcanes de arena asociados Cambios temporales de Nivel Oleaje y Tsunamis Cambios de Nivel en Fuentes, ríos y acuíferos Caidas de Ramas, troncos de árboles, Rupturas, etc... Local solo zona epicentral

REFERENCIAS BÁSICAS

Michetti et al., 2007. Environmental Seismic Intensity scale - ESI 2007. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 74. Servizio Geologico d'Italia, APAT, Rome, Italy
 Silva et al., 2008. Catalogue of the geological and environmental effects of earthquakes in Spain in the ESI-2007 Macroseismic scale. Cong. Geol. Esp. Gran Canaria, Spain
 Reichert, K., Michetti, A.M., Silva, P.G., 2009. Palaeoseismology: Historical and Prehistorical Record of Earthquake Ground Effects. Geol. Soc. London Spec. Publ. 316. 324 pp. GSL Publishing House, London, UK.

Registro geológico frecuente y excepcionalmente geomorfológico

No existe registro geológico (simitas y trincheras de falla)

EEE	Rupturas de Falla	Movimientos en Masa	Agrietamientos y Fracturación	Liquefacción y Subsistencia	Anomalías Hidrológicas	Colapso, Tsunamis y Otros Efectos	Preservación y Registro
I							
II							
III							
IV							
V							
VI							
VII							
VIII							
IX							
X							

