



2009

Investigación

ESTIGIA

EVALUACIÓN DEL DAÑO SÍSMICO EN
EDIFICIOS HISTÓRICOS Y YACIMIENTOS
ARQUEOLÓGICOS. APLICACIÓN AL ESTUDIO
DEL RIESGO SÍSMICO. Proyecto *EDASI*

FUNDACIÓN **MAPFRE**

www.fundacionmapfre.com

Giner-Robles, J.L.; Silva Barroso, P.G.; Pérez-López, R.;
Rodríguez-Pascua, M.A.; Bajardí Azcárate, T.;
Garduño-Monroy, V.H. y Lario Gómez, J. (2011).
Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos
arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico.
Proyecto EDASI. Serie Investigación. Fundación MAPFRE; 96 pp.

ISBN: 978-84-9844-344-8

Investigador Principal

Jorge Luis Giner Robles

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor
Titular de Universidad.
Departamento de Geología y Geoquímica.
Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.
Campus de Cantoblanco. 28049 Madrid (España)

Equipo de investigación

Pablo G. Silva Barroso

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular de Universidad. Departamento de Geología.
Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca. 05003 Ávila (España)

Raúl Pérez López.

Doctor en Ciencias Geológicas. Investigador Titular de Organismos Públicos de Investigación.
Área de Peligrosidad y Riesgos Naturales. Instituto Geológico y Minero de España.
28003 Madrid (España)

Miguel Angel Rodríguez Pascua

Doctor en Ciencias Geológicas. Investigador Titular de Organismos Públicos de Investigación.
Área de Peligrosidad y Riesgos Naturales. Instituto Geológico y Minero de España.
28003 Madrid (España)

Teresa Bardají Azcarate

Doctora en Ciencias Geológicas. Catedrática de Escuela Universitaria. Departamento de Geología
Universidad de Alcalá de Henares. 28871 Alcalá de Henares (España)

Victor Hugo Garduño Monroy

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular de Universidad.
Instituto de Investigaciones Metalúrgicas.
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia (México)

Javier Lario Gómez

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular de Universidad. Facultad de Ciencias.
Universidad Nacional de Educación a Distancia. 28044 Madrid (España)

Índice

1.	Resumen	5
2.	Introducción	5
3.	Objetivos	8
4.	Antecedentes	8
5.	Metodología	11
6.	Efectos arqueológicos de terremotos (EAE's)	13
6.1.	Origen de las estructuras y deformaciones	15
6.2.	Clasificación y descripción de EAE's	15
6.2.1.	Efectos cosísmicos	15
6.2.1.1.	Efectos Geológicos	15
6.2.1.2.	Efectos en la fábrica de las construcciones	17
6.2.2.	Efectos Postsísmicos	20
6.2.2.1.	Efectos en las construcciones	20
6.2.2.2.	Efectos de registro	24
6.3.	Comparación de EAE con efectos en sismos instrumentales	24
7.	Cuantificación de la deformación	25
7.1.	Orientación del tensor de deformación	25
7.2.	Análisis de la deformación en los EAE's	27
7.2.1.	Características de los datos	27
7.2.2.	Análisis Individual de EAE's	28
a)	Deformaciones en pavimentos	29
a1)	Pavimentos de argamasa plegados	29
a2)	Fracturas y pliegues en enlosados regulares	29
a3)	Fracturas y pliegues en enlosados irregulares	30
a4)	Impactos entre losas	30
a5)	Marcas de impacto de bloques	31
b)	Deformaciones en muros y contrafuertes	31
b1)	Muros basculados	32
b2)	Muros plegados	33
b3)	Muros desplazados	35
b4)	Muros fracturados	35
b5)	Muros colapsados	36
b6)	Contrafuertes plegados y desplazados	37

c) Caída orientada de columnas	37
d) Efectos individuales en bloques de sillera	37
d1) Fracturación	38
d2) Desplazamiento	39
7.2.3. Análisis conjunto del yacimiento	42
7.3. Anisotropías	42
7.3.1. Deformación vs anisotropías previas	42
7.3.2. Anisotropías inducidas por las estructuras arqueológicas	43
8. Aplicación de la metodología de cuantificación de la deformación	44
8.1. Análisis de estructuras individuales	44
8.2. Análisis de sitios	47
8.3. Análisis de yacimientos/ciudades	50
8.4. Análisis conjunto de sitios	58
9. Introducción de datos históricos y geológicos en catálogos sísmicos	60
9.1. Los efectos ambientales y geológicos de los terremotos: la escala de intensidades ESI- 07	60
9.1.1. Las escalas de intensidades	61
9.1.2. Efectos primarios y secundarios de los terremotos	62
9.2. La utilización de la escala de intensidades ESI-07	63
9.2.1. Procedimiento para el uso de la escala ESI-2007 como herramienta sísmica independiente	64
9.2.2. Correlación entre la ESI-2007 y las escalas macrosísmicas tradicionales	65
9.3. Estructura de la escala de intensidades ESI-07	66
9.3.1. Principales grupos de grados de intensidad	66
9.3.2. Descripción de los efectos ambientales de los terremotos	67
9.4. Efectos geológicos de los terremotos en España: registro y catalogación	68
10. Alcance y evolución futura de la metodología	69
10.1. Alcance del análisis. Aportaciones de la metodología al conocimiento sísmico	70
10.2. Aplicaciones y desarrollo futuro de la metodología. Nuevas líneas de investigación	72
11. Conclusiones	75
12. Bibliografía	76
Anexos	
Anexo I. Fichas de consulta rápida de los EAE's más comunes	81
Anexo II. Definiciones de los grados de intensidad ESI- 071.- Resumen	90

1. RESUMEN

El presente volumen introduce a la ciencia emergente de la arqueosismología para su aplicación al mejor conocimiento, y en su caso identificación de terremotos históricos y antiguos, estos últimos solamente documentados arqueológicamente. Se resumen las metodologías actualmente en desarrollo para el análisis arqueosismológico y se desarrolla una novedosa clasificación de los efectos arqueológicos de los terremotos (EAE), subdividiéndolos en efectos cosísmicos y post sísmicos. Ambas categorías consideran efectos primarios y secundarios sobre el terreno (geológicos) y sobre la fábrica de las construcciones. Los efectos post sísmicos también incluyen como evidencias sísmicas los procesos de reconstrucción, abandono y horizontes de destrucción evidenciados en los registros geoarqueológicos de yacimientos. El trabajo se enfoca a la cuantificación de la deformación a partir de los efectos cosísmicos primarios sobre las construcciones como pueden ser: deformaciones en pavimentos, muros y contrafuertes; caída orientada de columnas; y desplazamientos, roturas o rotaciones en bloques de sillaría.

La metodología expuesta, se basa en la aplicación de técnicas de geología estructural a la determinación del elipsoide de deformación que mejor explique las deformaciones analizadas para la determinación de las trayectorias de máximo acortamiento horizontal asociadas y obtener parámetros de direccionalidad respecto a epicentros históricos o posibles fuentes sismogénicas.

Estos análisis pueden realizarse para una única construcción, conjunto de construcciones (sitio), o conjunto de sitios que registren este tipo de efectos para un evento sísmico común. Finalmente se evalúa el significado y potencial de este nuevo tipo de análisis en la ampliación de los catálogos sísmicos y mejora del conocimiento sobre la peligrosidad sísmica.

Palabras clave: Arqueosismología, Efectos Arqueológicos de los Terremotos (EAE), Cuantificación de la deformación, Terremotos antiguos, Peligrosidad Sísmica.

2. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la peligrosidad sísmica en una zona es esencial para la planificación del riesgo sísmico, de forma que se puedan minimizar los efectos de los terremotos en la sociedad aplicando medidas de mitigación y prevención.

Para establecer la peligrosidad sísmica de una zona es necesario conocer el ciclo sísmico que le afecta, ciclo que está determinado por las condiciones geodinámicas de esa zona. Estas condiciones definirán, a grandes rasgos, las características de las fallas activas que pueden terremotos sísmicos destructivos, incluyendo los intervalos de tiempo en los que se puede repetir un evento de una magnitud dada (periodos de retorno).

Para poder analizar correctamente ese ciclo sísmico, se hace absolutamente necesario contar con un catálogo sísmico lo suficientemente completo a escala temporal, para que abarque el ciclo sísmico de la zona. Normalmente, estos catálogos están contruidos fundamentalmente a partir de los registros instrumentales, que incorporan los datos de aquellos eventos que se han registrados instrumentalmente (i.e. sismógrafos), y que en el mejor de los casos comprenden periodos temporales de algo más de 100 años. En el territorio español los registros instrumentales continuados sólo están disponibles a partir de la década de 1960 y por tanto solamente poseemos registro de los últimos ca. 60 años.

En zonas muy activas, los periodos de retorno de los terremotos destructivos son relativamente pequeños y pueden ser caracterizados mediante el análisis del registro instrumental, ya que este tipo de registro pueden llegar a abarcar el intervalo de tiempo necesario para establecer una **aproximación válida** de los periodos de retorno o recurrencia de los sismos destructivos que pueden afectar a la sociedad de forma importante.

En zonas menos activas, como es el caso de la Península Ibérica, en las que los periodos de retorno de grandes eventos destructivos pueden ser relativamente elevados, de cientos e incluso miles de años, el análisis del registro instrumental por si solo no puede abarcar el periodo de tiempo necesario para analizar el ciclo sísmico en su totalidad.

La incompletitud del catálogo instrumental en España, que sólo define adecuadamente un intervalo de tiempo de algo más de 60 años, se complementa con los datos obtenidos de crónicas y datos históricos (catálogo histórico) que aportan datos de sismos destructivos ocurridos antes de la incorporación de tecnología de registro instrumental.

España cuenta con un buen catálogo histórico de sismos destructivos ocurridos en los últimos 2000 años, aunque se puede considerar incompleto debido a la falta de documentación histórica fiable del periodo anterior al siglo XI, cuya información es muy fragmentaria y generalista. Este catálogo presenta mayor fiabilidad en lo que se refiere al periodo de los últimos 800 años, en el que se han producido más de 120 sismos con intensidades sísmicas iguales o superiores a VI MSK, presentando 30 de ellos intensidades iguales o superiores a VIII MSK (datos del Instituto Geográfico Nacional).

Como ya hemos apuntado, las características geodinámicas de la Península Ibérica, confiere a las fallas activas periodos de retorno relativamente elevados. Este hecho influye negativamente en la completitud del catálogo sísmico, incluso considerando los datos del registro histórico, ya que eventos potencialmente destructivos con periodos de retorno superiores al periodo de tiempo catalogado pueden no estar representados estadísticamente en los catálogos sísmicos actualmente existentes.

Este hecho es fácilmente observable: la ocurrencia de nuevos sismos instrumentales puede producir variaciones sustanciales en los mapas de peligrosidad, ya sea por su ocurrencia en zonas en las que no se había registrado

sismicidad significativa; o por presentar una magnitud más elevada de lo esperable en esa zona.

El mapa de aceleraciones sísmicas esperables en España (periodo de retorno de 500 años) de la Norma de Construcción Sismorresistente Española del año 1994 (NCSE-94) (Figura 2.1a), difiere notablemente en algunas zonas con el mapa de referencia de la NCS del año 2002. Estas diferencias son muy significativas en el noroeste pe-

ninsular. En esta zona, el mapa de aceleraciones de la NCSE-94 no preveía aceleraciones superiores a 0,04 g; en cambio, el mapa de aceleraciones de la NCSE- 2002 (Figura 2.1b) si que las considera. Esta variación está debida a la ocurrencia de las crisis sísmicas ocurridas en Sarriá (Lugo) en los años 1995 y 1997, crisis sísmicas posteriores a la publicación de la NCSE del año 94.

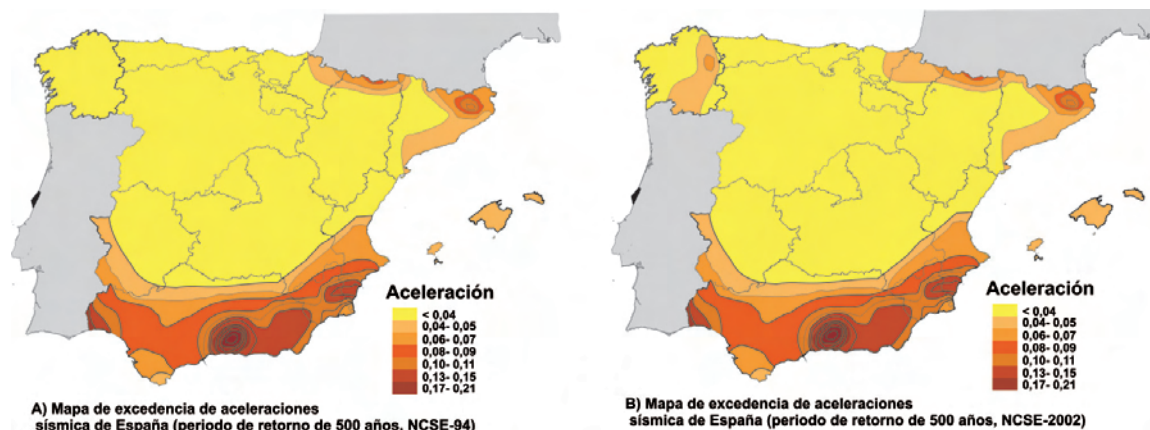


Figura 2.1. Mapas de excedencias de aceleraciones sísmicas en España (periodo de retorno de 500 años): A) Norma de Construcción sismorresistente Española del año 1994 (NCSE-1994); y B) Norma de Construcción sismorresistente Española del año 2002 (NCSE-2002). En esta figura se puede observar como en el mapa de la NCSE-2002 incluye una zona en el noroeste peninsular que no aparecía en el mapa anterior del año 1994. Esta zona queda incluida por la ocurrencia de las series sísmicas de Sarriá (Lugo) en 1995 y 1997, que aumentaron la peligrosidad sísmica de la zona.

En junio del año 2007 se produjo en las cercanías de la localidad de Escopete (Guadalajara) un sismo de magnitud 4.2. Este sismo produjo aceleraciones superiores a los 0,04 g (0,073 g, 0,058 g y 0,056 g) en tres acelerógrafos de la central nuclear de Jose Cabrera (Almonacid de Zorita) (actualmente no operativa), distante menos de 10 km del epicentro del terremoto (Carreño et al., 2008). Esta localidad se sitúa en una zona en la que el mapa de la NCSE del año 2002 considera que las aceleraciones máximas esperables (periodo de retorno de 500 años) son menores de 0,04 g (Figura 2.2). Posiblemente este dato pueda influir en la confección de la nueva Norma de Construcción Sismorresistente (actualmente en preparación), variando los valores de aceleración esperable para esta zona centro de la Península Ibérica.

Todos estos datos ponen de manifiesto que el conocimiento del ciclo sísmico en España está limitado por la completitud del catálogo sísmico utilizado para realizar los cálculos de peligrosidad sísmica, y que para poder calcular periodos de recurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud de forma adecuada, y así poder minimizar el riesgo sísmico asociado a los mismos, se necesita un registro del catálogo sísmico más completo.

Es evidente que no deberíamos esperar a la ocurrencia de nuevos sismos destructivos para poder definir correctamente la peligrosidad sísmica en España, y por tanto, se hace necesaria la aplicación de diferentes técnicas de análisis que nos permitan ampliar el catálogo sísmico en el tiempo para poder documentar la ocurrencia de terremotos destructivos desconocidos o poco documentados (Figura 2.3).

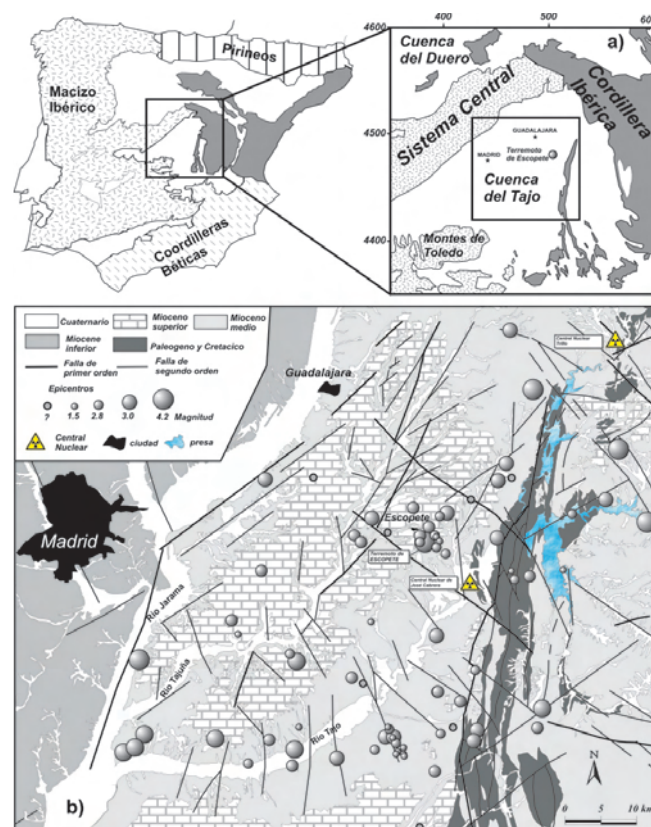


Figura 2.2. Situación del terremoto de Escopete (junio de 2007) en el contexto de la tectónica regional del centro de la Península Ibérica (a). Situación del terremoto y de la central nuclear de José Cabrera (en la que se situaban los acelerógrafos que registraron aceleraciones superiores a los 0,04 g) en un esquema sismotectónico de detalle de la zona (b) (modificado de Carreño et al., 2008).

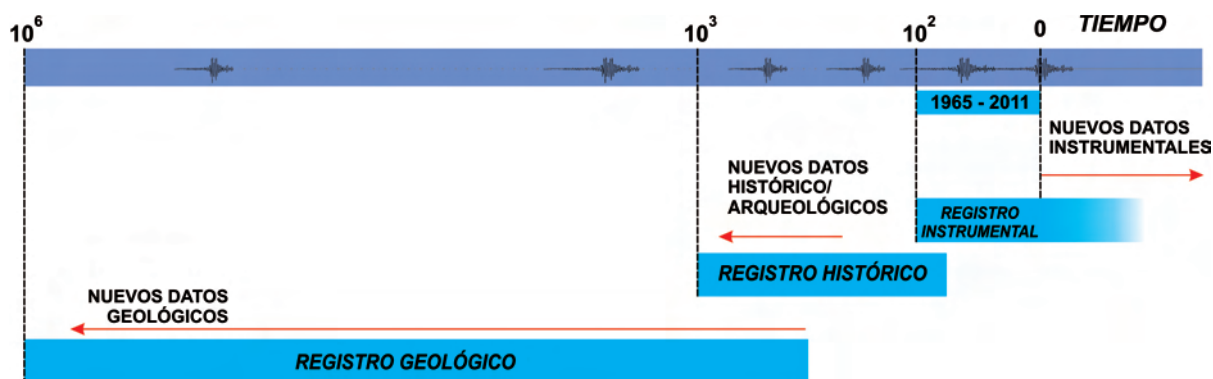


Figura 2.3. La Península Ibérica es una zona que presenta terremotos con periodos de ocurrencia muy elevados. El registro instrumental es muy limitado en el tiempo, y los datos que realmente son utilizables para el cálculo de la peligrosidad sísmica son los datos de los últimos 60 años, periodo de tiempo que no abarca el periodo sísmico estadísticamente adecuado para el cálculo de la peligrosidad sísmica. La incorporación de datos desde el registro histórico y geológico puede aportar información de sismos destructivos, ampliando el catálogo sísmico y permitiendo una mejor definición de la peligrosidad sísmica en España.

Desde la década de 1980 (i.e. Wallace, 1986) se han venido desarrollando diferentes metodologías (Geomorfología Tectónica, Tectónica Activa y Paleosismología) que permiten identificar, analizar y caracterizar terremotos pasados a partir de su registro geológico y geomorfológico, así como el análisis de terremotos históricos

variablemente documentados. Esto permite la incorporación de estos paleo-eventos sísmicos en los catálogos existentes con el fin de mejorar los datos y ampliar las ventanas temporales de este tipo de registros, mejorando en un futuro los análisis de peligrosidad sísmica. (Figura 2.4).

CATÁLOGO SÍSMICO	REGISTRO INSTRUMENTAL intervalo temporal 10 ¹ años	Ocurrencia de nuevos sismos Mejoras en la red (aumento detectabilidad)
	REGISTRO HISTÓRICO intervalo temporal 10 ³ años	Nuevos documentos o crónicas Estudios arqueológicos
	REGISTRO GEOLÓGICO intervalo temporal 10 ⁶ años	Arqueosismología
		Geomorfología tectónica Paleosismicidad y Geología de terremotos Neotectónica y Sismotectónica

Figura 2.4. Existen disciplinas científicas que nos permiten analizar y caracterizar eventos sísmicos que han ocurrido en el pasado y que son susceptibles de incorporarse al catálogo sísmico; bien desde el **registro histórico**, como con el estudio de nuevos documentos históricos, o la incorporación de datos a partir de análisis arqueológicos que indiquen la ocurrencia de un sismo que haya afectado al yacimiento; o bien desde el **registro geológico**, con análisis geomorfológicos, o análisis paleosísmicos mediante la realización de trincheras que pueden permitir la caracterización de una falla activa a partir de la determinación de los eventos sísmicos que han quedado registrados en los materiales.

La arqueosismología estudia terremotos del pasado mediante el análisis de yacimientos arqueológicos, aportando datos inéditos sobre sismos que pueden incluso no haberse registrado históricamente. La figura 2.4 ilustra claramente como la arqueosismología funciona como nexo de unión entre los registros clásicos históricos y los geológicos, intercalándose entre ellos. Así en la actualidad tenemos varias categorías de terremotos cuyos datos pueden proceder de distintos tipos de análisis: (a) terremotos instrumentales (registrados instrumentalmente); (b) terremotos históricos (documentados histórica y arqueológicamente); (c) terremotos antiguos (documentados arqueológicamente); y (d) paleoterremotos (sólo documentados geológicamente).

Así pues la arqueosismología se encarga del análisis de terremotos antiguos y del refinamiento de datos de algunos terremotos históricos con evidencias arqueológicas de las deformaciones. No obstante, uno de los principales problemas de esta rama emergente de la ciencia, era precisamente que, debido a la relativa novedad de este tipo de análisis, no existían trabajos recopilatorios de referencia (excluyendo tal vez el de Stiros y Jones, 1996). Para suplir esta carencia, Rodríguez-Pascua et al. (2009, 2011) realizaron una recopilación bibliográfica de los principales

efectos producidos por sismos en yacimientos arqueológicos de Europa y Asia; estableciendo una clasificación estructurada de los efectos sísmicos más comunes que se pueden observar en yacimientos arqueológicos (Earthquake Archaeological Effects, EAE's).

No obstante, en muchos casos estos efectos pueden haberse producido por otro tipo de fenómenos, tanto de origen natural como antrópico. Y normalmente, si no hay una descripción histórica bien documentada, es bastante complejo asignar un origen sísmico claro a los daños observados.

Las investigaciones realizadas en este trabajo se centran fundamentalmente en establecer una metodología de análisis que permita cuantificar las deformaciones observadas en yacimientos arqueológicos, de forma que se pueda determinar de una forma cualitativa su posible origen sísmico.

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología de análisis arqueosismológico, que permita la identificación y cuantificación de las deformaciones de origen sísmico en restos arqueológicos y/o históricos. Los resultados obtenidos mediante la aplicación de esta metodología pueden ser incorporados a diferentes catálogos sísmicos, ampliando así el espectro temporal utilizado en el análisis de la peligrosidad sísmica en una zona determinada.

Este estudio también pretende ser un primer paso para potenciar la aplicación de los análisis arqueosismológicos en zonas en las que su rico patrimonio cultural y arquitectónico, hacen de esta disciplina emergente una herramienta fundamental, tanto para el análisis del fenómeno sísmico, como para sus posibles implicaciones en la sociedad.

Por otro lado, este tipo de análisis debería aportar una visión más amplia a los profesionales y científicos implicados en alguna de las numerosas disciplinas relacionadas con este tipo de estudios, sobre las técnicas y metodologías aplicables para una correcta identificación, inventario y análisis de los daños producidos por terremotos en restos arqueológicos y edificios históricos.

4. ANTECEDENTES

La arqueosismología es un disciplina emergente que en los últimos años ha pasado de ser una simple herramienta de trabajo a constituir una línea de investigación independiente dentro de la sismología.

La historia de la Tierra se ha ido desarrollando desde sus inicios dentro de un contexto geodinámico muy activo, que incluye eventos extremos de muy diversa índole, desde cambios climáticos hasta impactos meteoríticos devastadores. La historia de la humanidad no debe desligarse de este tipo de eventos que han producido catás-

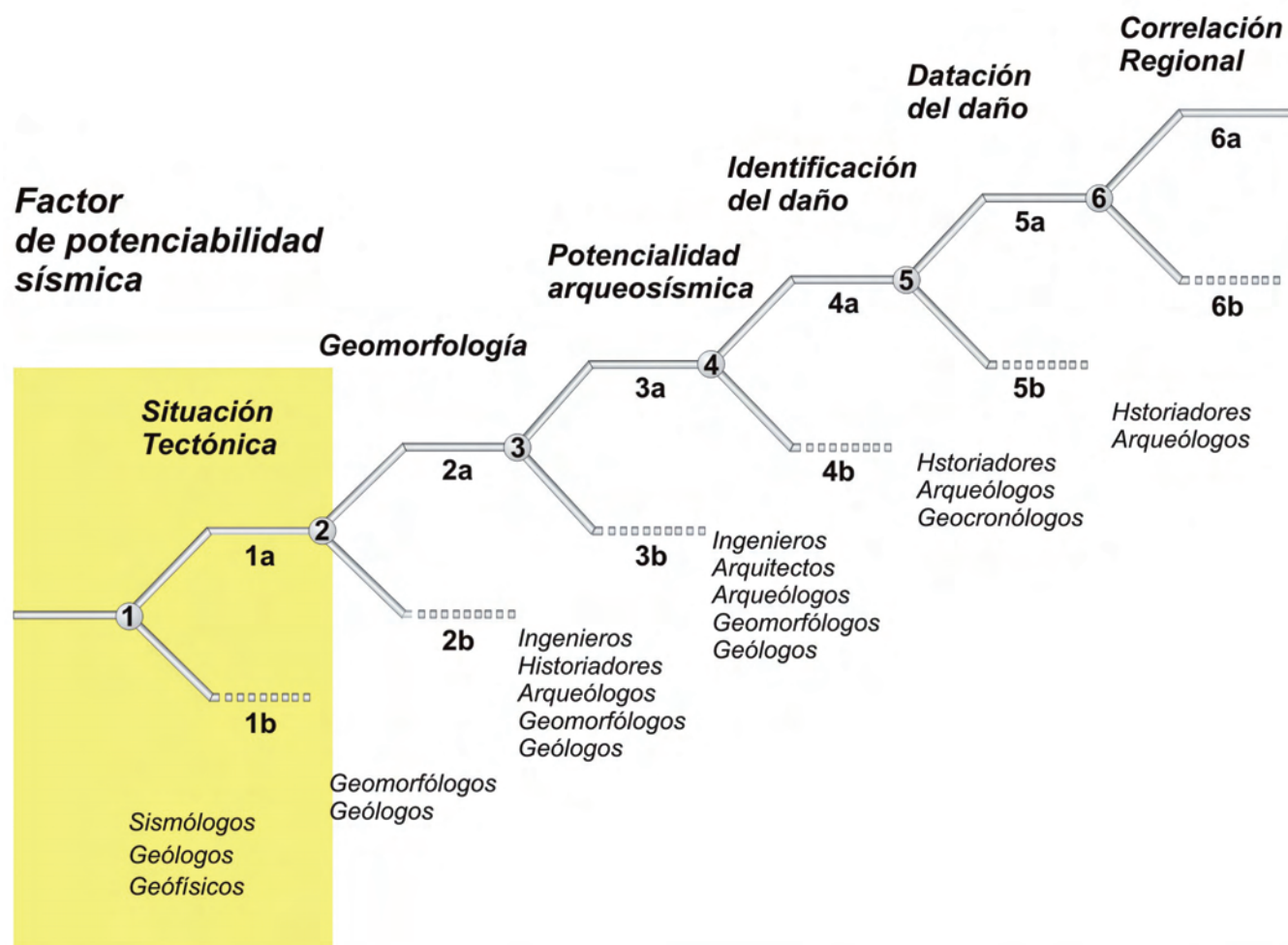
trofes de mayor o menor entidad, induciendo cambios importantes en las civilizaciones. La arqueología, al intentar reconstruir nuestro pasado a partir de registros más o menos puntuales, debe incluir sin dudar el estudio de dichos eventos catastróficos para poder obtener una imagen lo más completa posible de dicho pasado. Es en este punto en el que la arqueosismología juega un papel importante, ya que se basa en la aplicación de metodologías clásicas para la identificación de terremotos en yacimientos arqueológicos.

La arqueosismología proporciona la posibilidad de detectar terremotos en yacimientos arqueológicos. En este sentido las primeras referencias escritas se deben a Lanciani (1918) que realizó un estudio precursor al analizar los efectos de los terremotos en los edificios de la Roma Antigua. Más adelante tarde, Evans (1928) definió lo que se conoce como "*earthquake horizon*" (horizonte de terremoto) al sufrir él mismo un terremoto mientras estaba excavando el Palacio de Minos en Knossos, Creta.

No obstante, no es hasta el último cuarto del siglo XX, en que vuelve a surgir el interés por la identificación de terremotos como causas de destrucción en yacimientos arqueológicos, a través de trabajos aislados como el de Karcz y Kafri (1978) en Israel, Rapp (1982) en Anatolia, ó Nur y Ron (1996; 1997) a través del análisis de historias bíblicas. Existen también importantes contribuciones de tipo conceptual o metodológico como son los trabajos de Nikonov (1988), o los de Stiros (1988 a; 1988 b; 1996). Un documento clave al ser el primero en el que se desarrollan las bases para esta nueva disciplina, es el libro "*Arqueoseismology*" editado por Stiros y Jones en 1996, en el que se hace hincapié en la relevancia que este tipo de estudios debe tener en los análisis de peligrosidad sísmica.

Uno de los principales criterios indicados por los diferentes autores mencionados para poder identificar el origen sísmico de los daños observados en estructuras arqueológicas, es su orientación, siempre y cuando existan diferentes estructuras dañadas, ausencia de destrucción de origen antrópico, etc. En este sentido, Buck y Stewart (2000) o Jones y Stiros (2000) aluden a la ambigüedad de la evidencia arqueosísmica de algunos terremotos en Grecia y la zona mediterránea. Guidonobi et al. (2000) introducen una clasificación metodológica en arqueología aplicada a terremotos antiguos fuertes.

La principal tarea que la arqueosismología debe abordar, se refiere al establecimiento de criterios que ayuden a identificar los efectos de terremotos en un yacimiento arqueológico, distinguiéndolos de los causados por otros agentes destructivos. Sintubin y Stewart (2008) han propuesto una metodología basada en una estructura de árbol-lógico, que ayuda a cuantificar el factor arqueosismológico (AF) potencial de un determinado yacimiento (Figura 4.1). El factor AF permite cuantificar el posible daño sísmico en un yacimiento asignando un número a dicha probabilidad. Para ello incluye parámetros geológicos y arqueológicos, incluyendo las incertidumbres en la propia estructura de árbol lógico.



QWF SITUACIÓN TECTÓNICA			
QWF	Situación Tectónica	Strain rate	Falla / localización epicentral
0.8 - 1.0	 Placa 1 Placa 2 Limite placas	ALTO $>1\text{mm/yr}$	 $M > 6$ 10 km
0.6 - 0.8	 Deformación intraplaca	MEDIO $\sim 0.1\text{ mm/yr}$	 $M > 6$ 100 km
< 0.6	 Zonas estables	BAJO $\sim 0.01\text{ mm/yr}$	 100 km

Figura 4.1. Esquema del árbol-lógico propuesto por Sintubin y Stewart (2008) para cuantificar el factor sísmico en estructuras arqueológicas. Desarrollo del cálculo de la probabilidad de la situación tectónica (primera rama del árbol).

Dos monografías recientes y también interesantes son “*The Archaeology of Geological Catastrophes*” editado por McGuire, Griffiths, Hancock y Stewart (2000) y el volumen especial “*Archeoseismology at the beginning of the 21st century*” editado por Galadini, Hinzen y Stiros (2006).

Por último la monografía resultado del 1st INQUA IGCP-567 *International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology* (Pérez-López et al., 2009) incluye los trabajos y tendencias metodológicas más recientes en arqueosismología, todos ellos amparados bajo un lema común: “*hacia una clasificación comprensiva de los Efectos Arqueológicos de los Terremotos y la cuantificación de la deformación*”. Entre estos trabajos cabe destacar a modo de síntesis el de Sintubin et al. (2009) en el que los autores tratan de establecer los retos que la arqueosismología debe abordar en el futuro inmediato, dando una gran importancia a los estudios multidisciplinarios cuantitativos.

En la actualidad el desarrollo de proyectos internacionales financiados por UNESCO (IGCP-567: “*Earthquake Archaeology along the Alpine – Himalayan Seismic Zone*”) o la realización de reuniones científicas internacionales multidisciplinarias (Baelo, 2009; Corinto, 2011) muestran el gran avance que en ese sentido ha tenido lugar.

Paralelamente, la guía del curso “*Structural analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples*”, (Giner-Robles et al., 2009) organizado por el equipo de investigación del Proyecto EDASI, ha supuesto uno de los primeros pasos a la hora de establecer una metodología apropiada para el reconocimiento y medida de deformaciones cosísmicas en un yacimiento arqueológico, y distinguirlas de las causadas por cualquier otro agente destructivo.

Las deformaciones registradas en un yacimiento arqueológico pueden tener múltiples causas, siendo probablemente el resultado de la suma de varias de ellas. Por esta razón, es necesario tener en cuenta la posibilidad de que las deformaciones observadas hayan sido causadas por otro tipo de procesos tales como subsidencia natural, colapsos, tormentas excepcionales, deslizamientos asociados a la inestabilidad de laderas, o incluso ruina por abandono, antes de asignar como única y verdadera causa la sismicidad. Hay que tener en cuenta que diferentes procesos pueden generar deformaciones similares, por lo que el protocolo eliminatorio causa-efecto debe incluir un análisis geomorfológico de detalle previo, que nos ayude a identificar cuáles son los procesos naturales más probables en el sitio de estudio (inundaciones, inestabilidad de laderas, retroceso costero, erosión, etc).

De igual manera serían recomendables estudios climáticos, no sólo del contexto climático actual, sino de la evolución climática sufrida en el entorno del yacimiento,

así como otro tipo de posibles interferencias post-enterramiento tales como por ejemplo, las diferentes excavaciones que han tenido lugar, los trabajos de consolidación de las ruinas, etc.

En este sentido hay varios trabajos que recomiendan extremar las precauciones a la hora de asumir el origen sísmico como causa única, ejemplos de estos trabajos son los de Stiros, (1996), Jones y Stiros (2000), Buck y Stewart (2000), Guidoboni et al. (2000), Kovach (2004), Ambraseys (2006), Marco (2008) o Sintubin y Stewart (2008).

En el caso de las deformaciones producidas por un terremoto en un asentamiento antiguo, éstas están directamente condicionadas por la orientación con respecto a la dirección de aproximación de las ondas sísmicas, lo cual no ocurre en otras circunstancias como por ejemplo guerras, explosiones o ruina, en las que las deformaciones presentan una distribución totalmente aleatoria. La llegada de las ondas sísmicas produce un impulso orientado (direccionabilidad de los daños), que puede desencadenar una secuencia de deformaciones, de alguna manera, ordenadas.

Mediante el análisis de las deformaciones observadas en un yacimiento arqueológico (Giner-Robles et al., 2009) puede calcularse el elipsoide de esfuerzos producido por el terremoto y que afecta a edificios o estructuras de ese yacimiento. La tendencia del eje de esfuerzos identificado a partir de las diferentes estructuras de deformación, debe ser similar si éstas han sido producidas por un mismo terremoto, en caso contrario se obtendría una dispersión clara de los elipsoides de esfuerzos calculados, como podría ocurrir si la causa fuese por ejemplo una destrucción por ataque de artillería. De este modo, la clasificación y estandarización de los Efectos Arqueológicos de los Terremotos (*Earthquake Archaeological Effects*, EAE) (Rodríguez-Pascua et al., 2009) permite no solamente la identificación de estructuras de deformación cosísmica, sino también su utilización a la hora de determinar la fuente sísmica, y aplicarlo al análisis de la peligrosidad en una zona determinada.

La metodología propuesta por el equipo de investigación del Proyecto EDASI (Giner-Robles et al., 2009), se basa en la aplicación de técnicas clásicas del análisis estructural a deformaciones localizadas en un yacimiento arqueológico, con el fin de poder calcular los elipsoides de deformación de origen sísmico. Esta metodología ha sido aplicada con éxito en la antigua ciudad romana de Baelo Claudia (Giner Robles et al., 2009), dado que éste ha sido el primer yacimiento arqueológico en España analizado desde el punto de vista de la arqueosismología (Silva et al., 2005, 2009), y que además presenta numerosos ejemplos de estructuras de deformación atribuibles a terremotos destructivos, identificados por otro lado en el registro histórico.

Efectos Arqueológicos de Terremotos

EAE's (Earthquake Archaeological Effects)

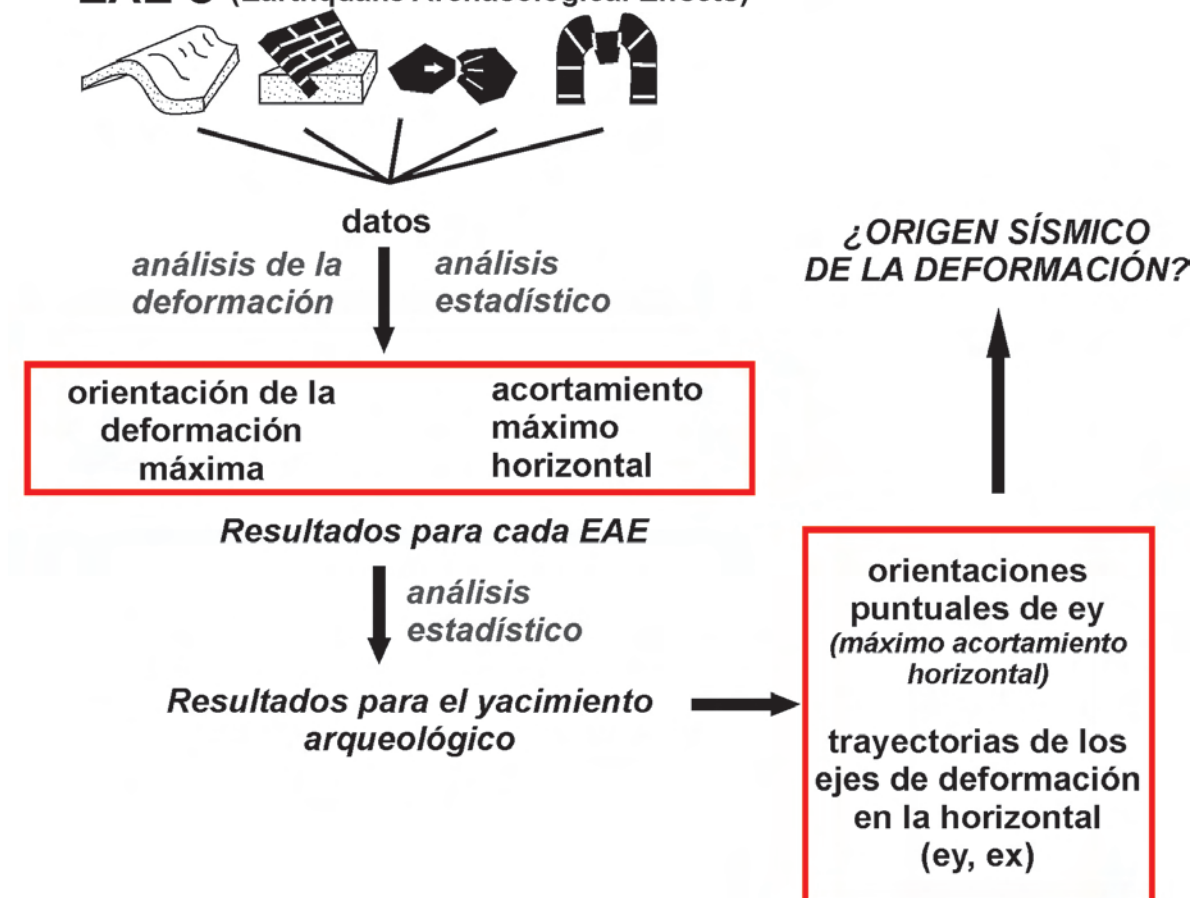


Figura 4.2. Esquema metodológico propuesto por Giner-Robles et al. (2009), para el análisis cuantitativo de las deformaciones presentes en estructuras de un yacimiento arqueológico (EAE) (Rodríguez Pascua et al., 2009, 2011) (ver capítulos 6 y 7).

En realidad todos los estudios y tratados sobre arqueosismología, ya sean estudios metodológicos o estudios sobre yacimientos concretos, están orientados hacia una misma finalidad: conocer cuándo se ha producido un terremoto, dónde se localizó el epicentro, y cómo se produjo, y, si es posible, determinar su magnitud. Para contestar al cuándo, tenemos unos métodos de datación cada vez más precisos, aunque como se establece en Giner-Robles et al. (2009) es necesario saber con la mayor precisión posible qué es realmente lo que vamos a datar y cómo lo vamos a datar, es decir, el método más idóneo para nuestro propósito.

Respecto al ¿dónde? es necesario identificar la fuente sísmica potencial (falla sismogénica o área sismogénica) a través no sólo del análisis de las deformaciones observadas sino también a través del análisis sismotectónico o geomorfológico del área. Por último, la respuesta al ¿cómo? trata de que una vez identificada la fuente sísmica, podamos también reconstruir la historia de dicha falla, periodo de recurrencia, tasa de desplazamiento; y con ello completar los catálogos sísmicos mejorando así el estudio de la peligrosidad sísmica.

5. METODOLOGÍA

La metodología de un trabajo de carácter multidisciplinar como es éste, presenta una serie de inconvenientes a la hora de caracterizar adecuadamente todos los pasos a seguir en el proceso de análisis, ya que, muchos de los análisis que se deben realizar en un estudio arqueosismológico deben estar apoyados por datos e investigaciones específicas de diferentes disciplinas: historia, arqueología, arquitectura, ingeniería, geología.

En este documento no se abarca en detalle algunos de los datos y estudios necesarios para realizar un análisis de este tipo, en muchos casos solamente se enumeran las investigaciones específicas que deben ser consideradas a la hora de realizar un estudio de cuantificación de las deformaciones de origen sísmico en un yacimiento arqueológico o enclave histórico.

La metodología propuesta en este trabajo consta de fases partes principales (Figura 5.1):

- Identificación e inventario de los daños
- Cuantificación de la deformación
- Incorporación de los resultados a los catálogos sísmicos

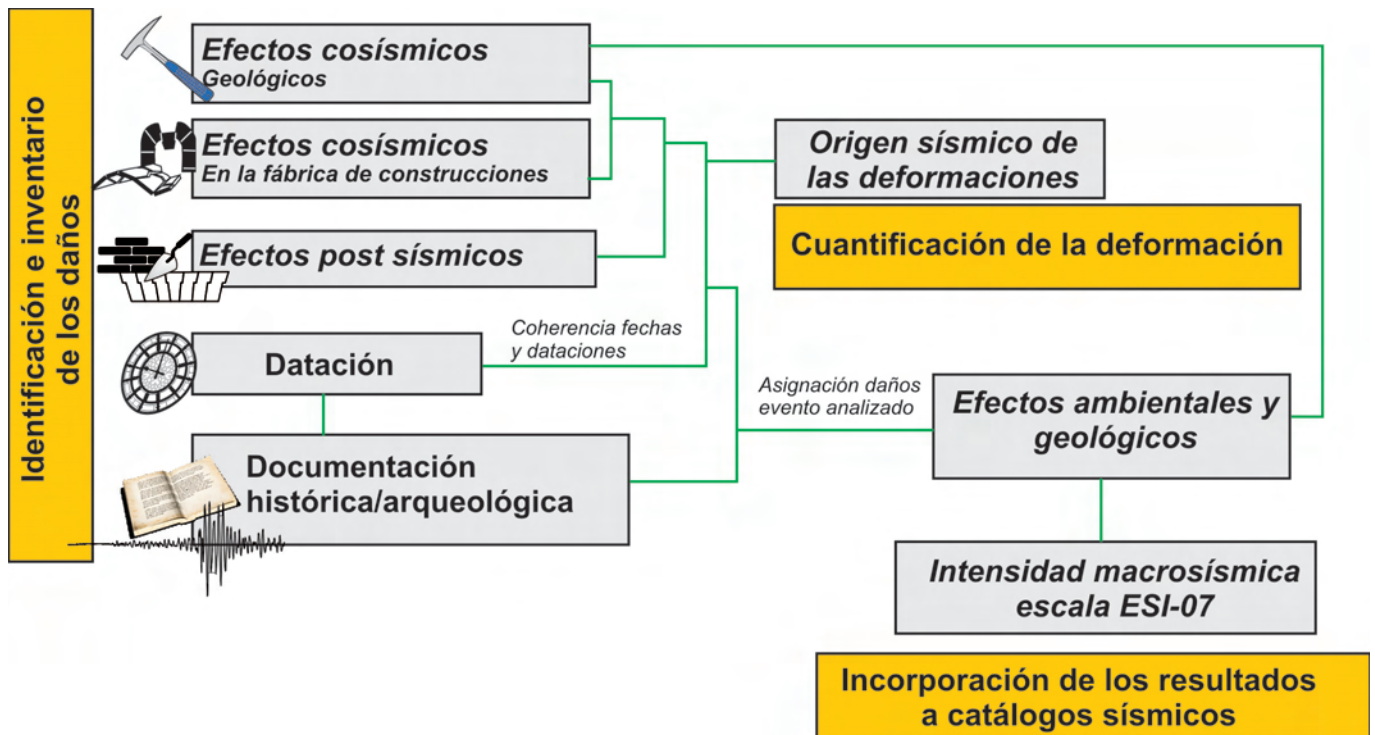


Figura 5.1. Esquema de la metodología propuesta en este trabajo: a) identificación de los daños, b) cuantificación de la deformación, y c) incorporación de los resultados a los catálogos sísmicos.

a) Identificación e inventario de los daños

(ver capítulo 6).

La identificación de los daños es uno de los pasos más importante en el análisis, ya que es en esta fase en la que se deben identificar perfectamente los efectos susceptibles de ser asignados a un origen sísmico.

Un paso preliminar absolutamente necesario es la búsqueda de documentación histórica existente, que nos indique si el emplazamiento a analizar (yacimiento o conjunto histórico) tiene relación expresa con un sismo histórico. De ser este el caso, de la documentación histórica existente se han de extraer y localizar los efectos sísmicos más significativos para su posterior análisis. En el caso de yacimientos antiguos en los que no se tenga constancia escrita de la ocurrencia de un terremoto, se han de revisar los informes de las excavaciones arqueológicas realizadas con el fin de documentar posibles efectos arqueosismológicos. Por último, en todos los casos, también es importante poseer información acerca de los trabajos de restauración y consolidación arqueológica, más relevantes con el fin de poder descartar las zonas reparadas del análisis para su adecuada cuantificación.

Para la identificación de daños utilizaremos la clasificación de efectos arqueológicos de terremotos (EAE) propuesta por Rodríguez Pascua (2009, 2011), que diferencia entre efectos cosísmicos (efectos geológicos y efectos en la fábrica de las construcciones), y efectos post sísmicos. En esta identificación se deben tener muy en cuenta los estudios arqueológicos e históricos de la zona para, por un lado interpretar correctamente las estructuras, y por otro lado datar adecuadamente las mismas para poder

asignarlas a un sismo concreto. Muchos de los efectos inventariados pueden tener un origen múltiple, esta incertidumbre puede ser eliminada con el análisis de la cuantificación de la deformación.

b) Cuantificación de la deformación (ver capítulo 7).

La cuantificación de la deformación de los efectos arqueológicos de terremotos (EAE) se basa en el análisis de los EAE susceptibles de aportar información sobre el proceso de deformación que los ha producido o inducido; es decir los efectos cosísmicos, tanto los efectos geológicos (a), como los efectos en la fábrica de las construcciones (b).

El análisis de la deformación de estructuras geológicas (a, efectos geológicos) no se ha expuesto con detalle en este trabajo, ya que las metodologías aplicadas son las mismas que se utilizan normalmente en un análisis clásico de geología estructural.

En este documento se ha desarrollado fundamentalmente el análisis de los efectos en la fábrica de las construcciones, aplicando diferentes técnicas utilizadas en geología estructural. Este hecho nos permite comparar directamente los resultados obtenidos del análisis de estas estructuras con los resultados obtenidos del análisis de los efectos geológicos, ya que las metodologías, y por tanto los resultados son análogos.

La metodología aplicada al análisis de la deformación de los efectos sísmicos en la fábrica de las edificaciones en yacimientos arqueológicos consta de una serie de fases (Giner Robles et al., 2009):

- *Caracterización de los datos.* Antes de analizar las diferentes deformaciones observadas, debemos con-

siderar una serie de aspectos relacionados con los datos que vamos a recopilar. Estos aspectos se centran en la definición los parámetros analizables para obtener los datos del tensor de deformación y en la caracterización adecuada de la cinemática de las deformaciones.

- *Cuantificación de la deformación* en cada estructura analizada.
- *Análisis de los tensores definidos para cada uno de los EAE* (un único resultado para cada tipo de estructura descrita en el yacimiento), de forma que se pueda analizar la coherencia de los datos en todo el yacimiento en función del tipo de estructura.
- *Análisis conjunto del yacimiento*, de forma que se pueda evaluar y en su caso establecer la homogeneidad de todo el yacimiento frente al tensor de deformación definido.

Con los resultados obtenidos, se evalúa el grado de coherencia de los resultados, asignándole un origen sísmico o no. La definición del origen de las deformaciones no implica que los efectos inventariados puedan ser asignados a un evento concreto. Para poder asignar esos daños a un evento determinado, se tiene que datar adecuadamente todas las estructuras, y que esas dataciones sean coherentes con el evento.

La datación de las estructuras puede conllevar el establecimiento de edades puramente arqueológicas (estilos arquitectónicos, cerámicas, monedas, etc.), geoarqueológicas (relación de las estructuras con la estratigrafía de rellenos naturales y/o antrópicos que las engloban o englobaron en el momento de su excavación) e isotópicas (e.g. C¹⁴). Este último método fundamentalmente se refiere a la datación isotópica (numérica) del horizonte geoarqueológico que fosiliza la estructura deformada o sobre el que se sitúa la estructura deformada, de manera que obtenemos edades post o pre-evento respectivamente.

En la actualidad también es posible realizar dataciones sobre las construcciones arqueológicas (e.g. muros, columnas) mediante la liquenometría, técnica que utiliza el crecimiento continuo de los líquenes sobre dichos muros, enlosados, pavimentos y columnas de los yacimientos arqueológicos. La técnica en si misma es muy sencilla y barata, estando supeditada exclusivamente al reconocimiento de la especie de liquen (la más común es el *Rhizocarpon geographicum*, aunque asociados a rocas carbonatadas se utilizan mucho los *Lecanora sp* y los *Aspicilia sp*) y a la reconstrucción de la curva de crecimiento.

Para obtener la curva de crecimiento del liquen se miden diferentes diámetros sobre rocas cuya talla es de edad conocida. Para ello, se utilizan las lápidas de los cementerios, así como construcciones singulares de edad conocida (puentes, catedrales, etc.). En general, los líquenes presentan una curva de crecimiento lineal a largo plazo (ca 2000 años) y exponencial a corto plazo (ca 200 años). En cualquier caso, esta técnica permite obtener edades de los últimos 5000 años (con un error moderado)

siendo su intervalo de trabajo óptimo para los últimos 2000 años. En este sentido, la aplicación de la liquenometría en estudios de arqueosismología queda patente en las estructuras caídas, volcadas, así como en los desprendimientos rocosos.

En el capítulo 8 se analizan algunos ejemplos de la cuantificación de estructuras en diferentes lugares, de diferentes periodos históricos, contextos socio-culturales y situación geomorfológica, con características bastante diferentes entre ellos.

c) Incorporación de los resultados a los catálogos sísmicos (ver capítulo 9).

Una vez definido el origen sísmico de las deformaciones y asignados los daños a un evento concreto, se debe asignar una intensidad macrosísmica al evento para que pueda ser incorporado a los catálogos sísmicos utilizados en los análisis de peligrosidad sísmica.

Para ello se propone la utilización de la escala macrosísmica ESI-07, que utiliza los efectos ambientales y geológicos producidos por los terremotos *Environmental Earthquake Effects* (EEE) para determinar una escala comparable a las normalmente utilizadas.

Creemos que esta escala es la más adecuada, ya que no basa su definición en parámetros que no pueden ser corroborados en terremotos antiguos sin una documentación histórica detallada. Otra de las características de esta escala, es que se tienen en cuenta algunas de las estructuras geológicas consideradas en la clasificación de efectos arqueológicos de terremotos, y por tanto su relación es directa. No obstante, cuando el grado de destrucción de las estructuras sea evidente y cuantificable puede aplicarse cualquiera de las escalas macrosísmicas convencionales que describen la cuantificación de daños en edificaciones. Como se verá en el capítulo 8 las escalas convencionales y la nueva escala ESI-2007 no son excluyentes, sino más bien complementarias, especialmente para terremotos de intensidad inferior o igual a IX grados (MSK o EMS).

6. EFECTOS ARQUEOLÓGICOS DE TERREMOTOS (EAE'S)

Los efectos arqueológicos de terremotos (*Earthquake Archaeological Effect's*, EAE's) son todos aquellos efectos asociados a la ocurrencia de un sismo y que se pueden analizar a partir del registro arqueológico y geológico dentro del contexto de un yacimiento arqueológico. El principal interés en la caracterización de estos efectos es documentar y caracterizar daños producidos por terremotos destructivos en el intervalo histórico definido por el yacimiento arqueológico, ya sea en la Península Ibérica, o en cualquier parte del mundo que posea un rico patrimonio arqueológico.

Estos efectos pueden estar documentados por otras fuentes, como por ejemplo el terremoto de Lisboa (1 de

noviembre de 1755). También pueden ser terremotos de los que no se tiene constancia histórica ni instrumental, por ejemplo los terremotos que afectaron entre los siglos I y III AD a la ciudad romana de *Baelo Claudia* (Cádiz) (Silva et al., 2005, 2009). La caracterización de terremotos desconocidos o poco documentados en el registro histórico son una fuente importante de información que puede ser incorporada a los catálogos sísmicos para el estudio de la peligrosidad sísmica.

Numerosos trabajos han puesto de manifiesto diferentes daños asimilables a la ocurrencia de terremotos en diversos contextos arqueológicos (Stiros y Jones, 1996; Guidonobi et al., 2000; Ambraseys, 2006; Marco, 2008). No obstante, existían pocos trabajos de recopilación y cla-

sificación de los diferentes efectos que se podían observar en yacimientos arqueológicos. Normalmente los efectos descritos en la literatura son efectos muy concretos y específicos, referidos únicamente a los yacimientos analizados, y como consecuencia de ello las metodologías de análisis aplicadas por los autores era difícilmente exportable a otros yacimientos.

Rodriguez-Pascua et al. (2009, 2011) desarrollaron una clasificación de los diferentes efectos de terremotos que pueden aparecer en el contexto de un yacimiento arqueológico, definiendo una estructura clara de clasificación para poder abordar su estudio conjunto aplicando las metodologías más coherentes para su análisis en cualquier contexto arqueológico (Figura 6.1).

a. EFECTOS COSÍSMICOS (DIRECTOS)		
EFECTOS GEOLÓGICOS	Efectos geológicos primarios	<ul style="list-style-type: none"> - Escarpes de falla - Levantamientos / hundimientos
	Efectos geológicos secundarios	<ul style="list-style-type: none"> - Licuefacciones - Deslizamientos - Caída de bloques - Tsunamis/Seiches - Colapsos en cavidades
EFECTOS EN LA FÁBRICA DE LAS CONSTRUCCIONES	Por deformación permanente del sustrato	<ul style="list-style-type: none"> - Pavimentos de argamasa plegados - Fracturas y pliegues en enlosados regulares - Fracturas y pliegues en enlosados irregulares - Impactos entre el enlosado - Contrafuertes desplazados y girados - Muros basculados - Muros plegados - Muros desplazados
	Deformaciones instantáneas a la vibración	<ul style="list-style-type: none"> - Fracturas penetrativas en bloques de sillería - Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo - Columnas caídas y orientadas - Giros en bloques de sillería y columnas - Bloques de sillares desplazados - Arcos desplazados - Escalones y líneas de bordillo plegadas - Muros colapsados (incluyendo restos humanos y objetos de valor bajo los escombros) - Bóvedas colapsadas - Marcas de Impacto - Roturas en esquinas de bloques
b. EFECTOS POSTSÍSMICOS (INDIRECTOS)		
EFECTOS DE REGISTRO		<ul style="list-style-type: none"> - Incendios - Abandonos injustificados - Horizontes de destrucción o falta de registro estratigráfico en la secuencia arqueológica - Avenida súbita por roturas de presas artificiales o embalsamientos naturales
	EFECTOS CONSTRUCTIVOS	<ul style="list-style-type: none"> - Construcciones antisísmicas - Reparación de construcciones - Elementos de reciclado constructivo anómalos

Figura 6.1. Tabla de clasificación de los Efectos Arqueológicos de Terremotos (Earthquake Archaeological Effects: EAE) (modificado de Rodriguez-Pascua et al., 2009 y 2011): a) efectos cosísmicos, efectos producidos directamente por el evento sísmico (geológicos y en la fábrica de las construcciones), b) efectos post sísmicos, efectos indirectos producidos por las consecuencias del terremoto, ya sean visibles en el registro geoarqueológico (efectos de registro), o en las construcciones posteriores al evento sísmico (efectos constructivos).

6.1. Origen de las estructuras y deformaciones

Como ya se ha apuntado, esta clasificación de EAE permite inventariar los efectos de terremotos que pueden aparecer en el registro geoarqueológico en un yacimiento y que pueden aportar información sobre la ocurrencia de sismos. No obstante, uno de los principales problemas que puede aparecer en un análisis de este tipo, es determinar el origen de las deformaciones y de los efectos observados, ya que algunas de estas estructuras pueden producirse por otros fenómenos de origen natural (deslizamientos), o incluso de origen antrópico (guerras, abandonos, etc...).

Por ello, el análisis de los EAE debe considerar todas las génesis posibles de los efectos descritos; y en ningún caso la existencia de un único efecto nos permite inferir la presencia de un sismo. Únicamente un análisis conjunto y estructurado, a partir de un estudio multidisciplinar, permite definir la ocurrencia de un sismo en la zona considerada.

6.2. Clasificación y descripción de Efectos Arqueológicos de Terremotos

La clasificación de EAE's se centra en la estructuración de estos efectos en dos grandes grupos: los efectos cosísmicos y los efectos postsísmicos (Figura 6.1)

6.2.1. Efectos cosísmicos

Estos efectos son los que muestran las deformaciones simultáneas a la ocurrencia del terremoto, y pueden estar asociadas, tanto a **efectos geológicos**, producidos por procesos y estructuras geológicas (ruptura superficial de una falla), como a los daños producidos directamente en la **fábrica de las construcciones** (Figura 6.2).

6.2.1.1. Efectos Geológicos

Los efectos geológicos son los efectos del terremoto que se pueden observar en el registro geológico. Las metodo-

logías de análisis aplicables a estos efectos, son las técnicas clásicas de geología desarrolladas para el análisis de fallas activas capaces de producir terremotos destructivos: geomorfología tectónica, trincheras, análisis sismo-tectónico, etc... Estos efectos están descritos detalladamente en la escala ambiental de efectos geológicos de terremotos ESI-07 (Michetti et al., 2007).

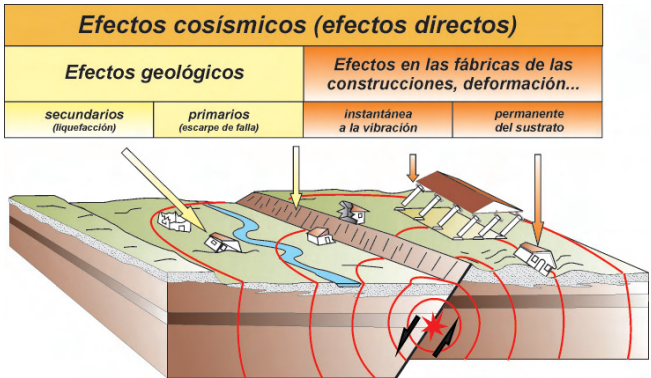


Figura 6.2. Diagrama de distribución de efectos cosísmicos (efectos directos) de terremotos en yacimientos arqueológicos (Rodríguez-Pascua et al., 2011).

Esta escala, elaborada por la Subcomisión de Paleosismología y Tectónica Activa de la Comisión de Procesos Terrestres de INQUA (*International Union for Quaternary Research*), ha sido desarrollada para poder establecer la intensidad macrosísmica de un sismo analizando los diferentes efectos que pueden ser observados en el registro geológico y ambiental (ver capítulo 9 y Anexo II). Esta escala diferencia tanto efectos **primarios (a)** (escarpes de falla, rupturas cosísmicas superficiales, subsidencias y levantamientos tectónicos), como efectos **secundarios (b)** (licuefacciones, deslizamientos, tsunamis, etc.). Este tipo de efectos proporciona mucha información sobre algunas de las variables de los sismos, con esta información es bastante sencillo definir las características básicas del sismo para analizar el resto de los EAE (Figura 6.3)

a. EFECTOS COSÍSMICOS (DIRECTOS)			Caracterización del evento
EFECTOS GEOLÓGICOS	Efectos geológicos primarios	<ul style="list-style-type: none">- Escarpes de falla- Levantamientos / hundimientos	<ul style="list-style-type: none">- longitud de la falla, tipo de falla, superficie de rotura, edad de la deformación, periodos de retorno, movimientos en la vertical, tasas de sedimentación y deformación, datación del evento, magnitud mínima del evento
	Efectos geológicos secundarios	<ul style="list-style-type: none">- Licuefacciones- Deslizamientos- Caída de bloques- Tsunamis/Seiches- Colapsos en cavidades	

Figura 6.3. Variables que se pueden caracterizar a partir del análisis de efectos cosísmicos geológicos en el contexto de un yacimiento arqueológico.

La clasificación de los EAE es coherente con la escala ESI-07, ya que se han aplicado los mismos criterios geológicos de clasificación de efectos, considerado tanto los efectos primarios, como los efectos secundarios.

Los efectos **primarios** serían aquellos que caracterizan directamente los efectos del movimiento de las fallas en superficie (roturas, desplazamientos, basculamientos, etc...) (Figura 6.4).

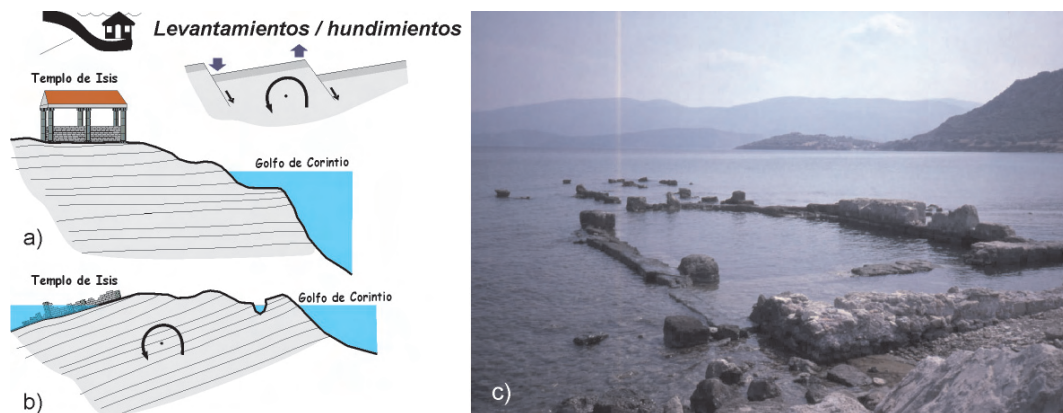


Figura 6.4. Efectos cosísmicos (efectos geológicos primarios): basculamientos (levantamientos /hundimientos). Templo de Isis (Kenchreai, Golfo de Salónica, Grecia). a) Esquema de la disposición del templo previa al basculamiento de la zona, b) Esquema de la disposición actual de las ruinas del templo c) Templo de Isis (Foto: T. Bardaji). Esta zona evidencia tres momentos de hundimiento cosísmico (con 160 cm de desplazamiento acumulado) (Noller et al., 1998): 1) evento ocurrido durante o después de 80AD (pre-400AD) (máximo hundimiento de 78 cm); 2) evento de 400AD \pm 25 (hundimiento mínimo de 45 cm). Este evento afecta a la zona portuaria, quedando claramente definido por el abandono y demolición de edificios que estaban siendo remodelados en el momento del sismo; 3) evento post 650AD (entre 650AD y 1928, no hay criterios para acotarlo), con un desplazamiento mínimo de 35 cm.

Los efectos geológicos más abundantes son los **secundarios**, es decir los efectos observables en el registro geológico, producidos por la transmisión de las ondas sísmicas en el sustrato (licuefacciones, tsunamis, deslizamientos y/o caída de bloques) (Figura 6.5). En muchos casos, bien porque la rotura del sismo se haya a decenas de kilómetros, o bien porque el terremoto no produce rotura superficial, son estos efectos los que proporcionan mayor cantidad de información sobre el terremoto analizado.

Uno de los efectos secundarios más destructivos son los tsunamis. El terremoto de Lisboa de 1755 generó un

tsunami que afectó a toda la costa sur peninsular. En la costa de Conil (Cádiz) se observó un retroceso del mar y posteriormente la llegada de dos olas que rompieron violentamente contra la costa. La inundación de la costa llegó hasta 8,25 km tierra adentro, con alturas de 8 a 8,5 sobre el nivel medio de marea. El agua llegó cargada de sedimentos (principalmente arenas), bloques y restos de plantas. Las olas destruyeron las estructuras de madera e incluso las de piedra, moviendo también los barcos tierra dentro. La pequeña población de pescadores de Conilete fue totalmente arrasada (Figura 6.5b).



Figura 6.5. Efectos cosísmicos (efectos geológicos secundarios). a) Caída de bloques de roca en el Parque Arqueológico de El Tolmo de Minateda (Albacete, España), como consecuencia del terremoto de Lisboa de 1755. La datación del deslizamiento se ha realizado por liquenometría (Pérez-López et al., 2010). Nótese la presencia de tumbas antropomórficas en los bloques caídos, cuya posición original estaba en la parte superior del yacimiento (Rodríguez-Pascua et al., 2011). b) Restos de Conilete (Cádiz, España) a los pies de la torre de Castilnovo, arrasado en 1755 por el tsunami del terremoto de Lisboa. Este pequeño asentamiento de pescadores no volvió a ser ocupado después del tsunami.

Asentada a los pies de la Torre de Castilnovo, actualmente se puede distinguir, por fotografía aérea, abanicos de derrame que marcan una dirección de llegada de la ola SW-NE (Figura 6.6). Los sedimentos de este abanico de

derrame muestran una secuencia de depósitos de tsunami en la que están incluidos restos de los muros de edificaciones del poblado (Figura 6.6)

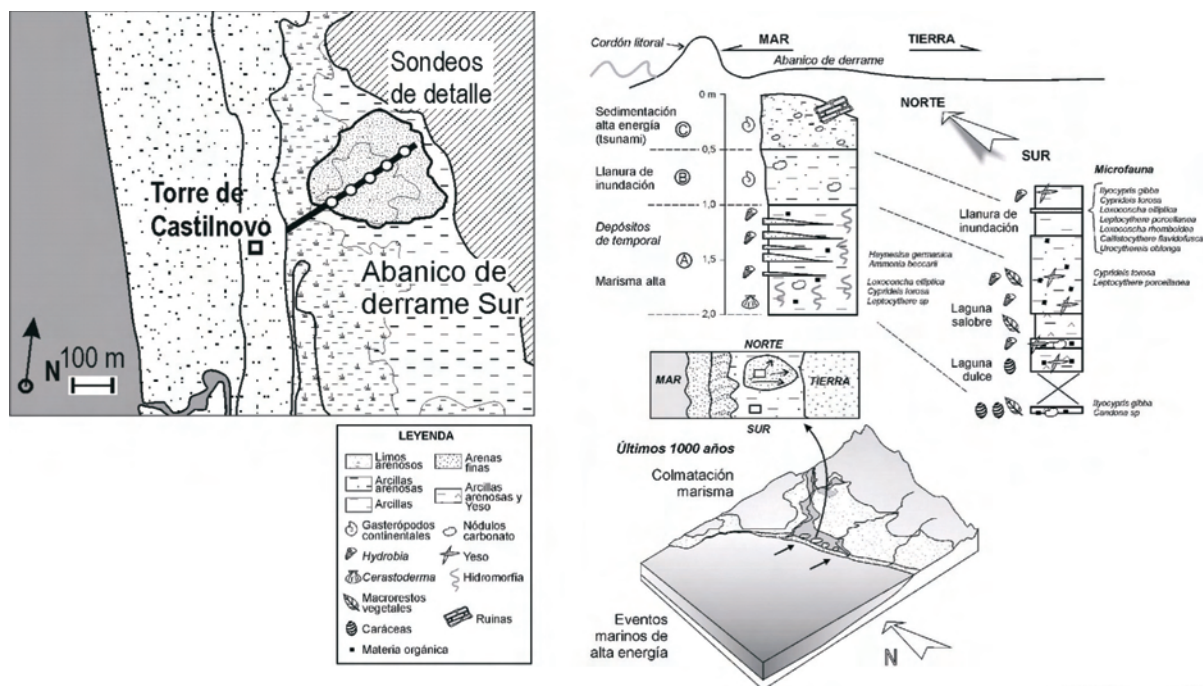


Figura 6.6. Abanico de derrame creado por el tsunami de 1755 y que incluye los restos del poblado de Conilete. Columna sintética de la secuencia de sedimentos de tsunami en los abanicos de derrame de la Torre de Castilnovo (Luque et al., 2004).

6.2.1.2. Efectos en la fábrica de las construcciones

Estos efectos están representados por los daños directos a las edificaciones e infraestructuras del yacimiento analizado. Esta clasificación establece dos grupos de efectos en la fábrica de las edificaciones: **(a)** los daños producidos por la deformación permanente del sustrato, y **(b)** deformaciones instantáneas a la vibración. Hay que tener en cuenta que esta clasificación no implica que ambos tipos de efectos no puedan aparecer simultáneamente en un yacimiento afectado por terremotos; es una clasificación genética teniendo en cuenta el momento de la deformación: instantáneo a las vibraciones, o como consecuencia de la deformación del sustrato en el que se encuentran las estructuras, deformación que puede no sea instantánea a esas vibraciones.

a) Por deformación permanente del sustrato. Estos efectos están producidos como consecuencia de las deformaciones permanentes que sufre el sustrato donde se asientan las edificaciones y que afectan fundamentalmente a la cimentación de las mismas (Figura 6.7). La deformación de las estructuras es consecuencia directa de su acomodación al cambio “de forma” del sustrato. Es decir, que si las estructuras se comportaran de forma totalmente elástica frente a las deformaciones, las deformaciones se producirían de igual forma. En muchos casos, estas deformaciones pueden estar asociadas a estructu-

ras como pavimentos o conducciones de agua que se ven afectadas de forma importante por los terremotos.

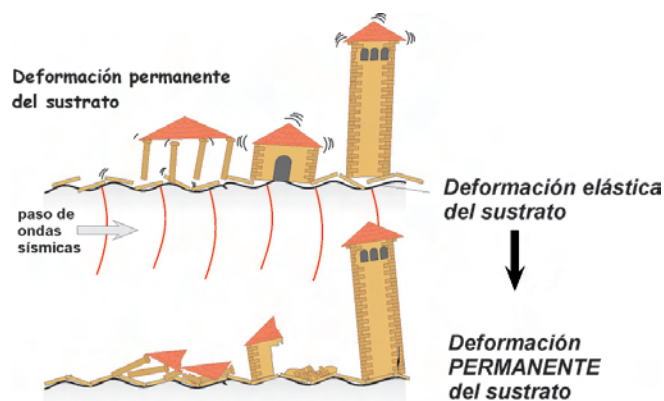


Figura 6.7. Esquema explicativo de la génesis de EAE asociados a la deformación permanente del sustrato. Este tipo de efectos están relacionados con la acomodación de las estructuras a la deformación permanente (no elástica) que ha sufrido el sustrato en el que se asientan las estructuras. En este gráfico podemos observar que el paso de las ondas sísmicas produce una deformación elástica, es decir no permanente. No obstante, esta deformación elástica puede superar el límite de resistencia de los materiales que atraviesa y producir deformaciones de carácter permanentes en el sustrato, estas deformaciones pueden ser basculamientos, plegamientos, fracturas, etc; y son finalmente las responsables de las deformaciones observadas en este grupo de EAE (deformación permanente del sustrato).

Dentro de este tipo de EAE se clasifican los siguientes efectos (ver Figura 6.1): *fracturas*, *pliegues en pavimentos de argamasa y enlosados* (Figura 6.8); *impactos entre*

losas de pavimentos, *muros basculados, plegados y desplazados* (Figura 6.9); y *desplazamientos y rotaciones de contrafuertes*.

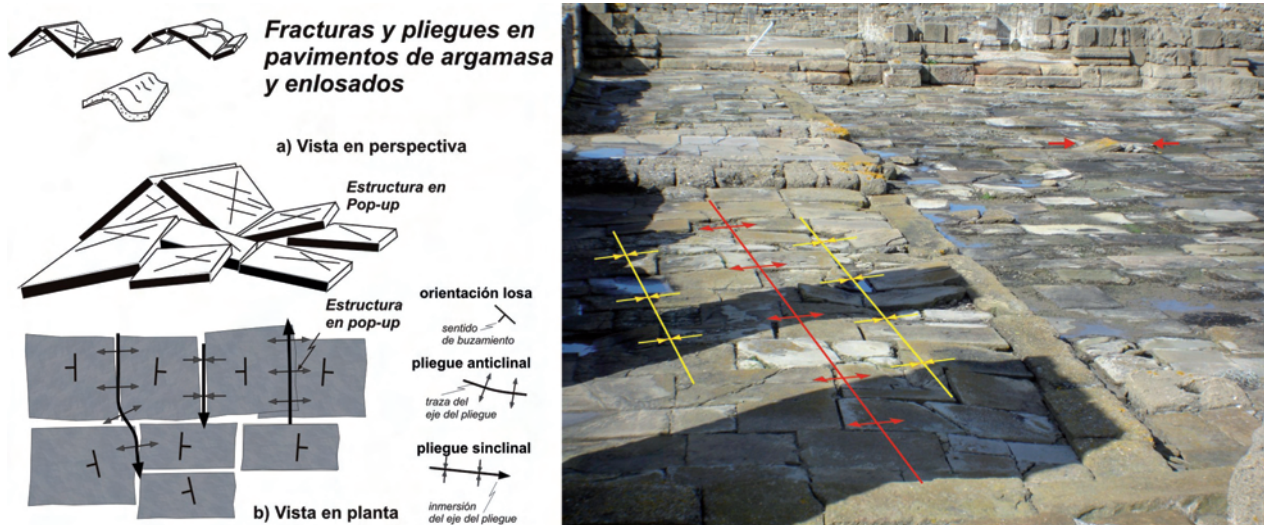


Figura 6.8. Efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones (efectos por deformación permanente del sustrato). Plegamiento en pavimentos enlosados regulares en la plaza del Foro del yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz, España). Las líneas rojas representan la traza de los pliegues anticlinales y las amarillas las de los sinclinales. Las flechas rojas señalan una de las estructuras de *pop-up* que se observan en este pavimento. Las estructuras de *pop-up* en enlosados son zonas en las que el movimiento del terreno ha producido que las losas se monten unas encima de otras.

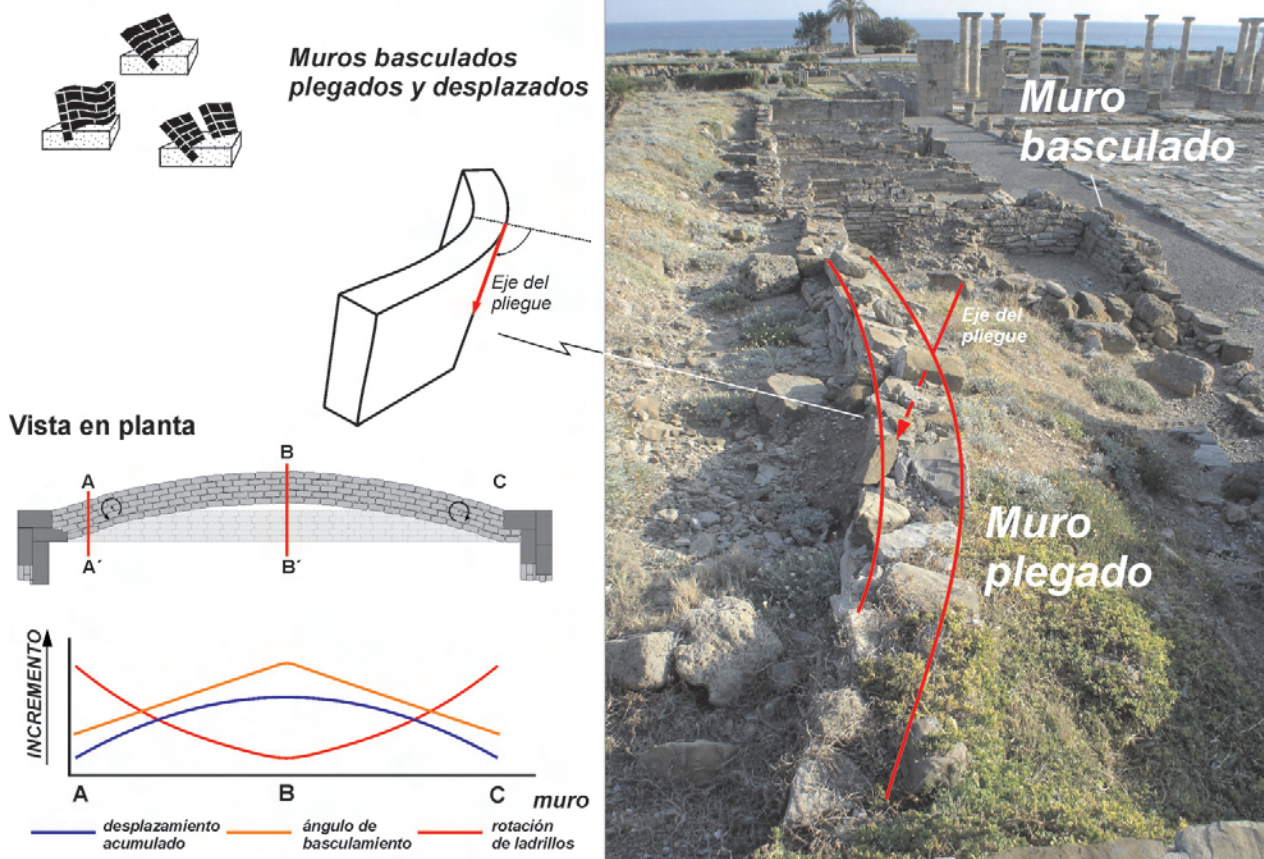


Figura 6.9. Efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones (efectos por deformación permanente del sustrato). Ejemplo de un muro plegado y un muro basculado en las tiendas del foro del yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz, España).

b) Deformaciones instantáneas a la vibración. Estos efectos están relacionados directamente con las vibraciones inducidas por las ondas sísmicas en el terreno. Estas deformaciones se producen como consecuencia del comportamiento rígido de las estructuras frente a las deformaciones elásticas producidas por el paso de las ondas sísmicas (Figura 6.10). Si los elementos estructurales afectados se comportaran de una forma totalmente elástica, no se producirían este tipo de deformaciones, ya que no implican necesariamente deformación permanente del sustrato.

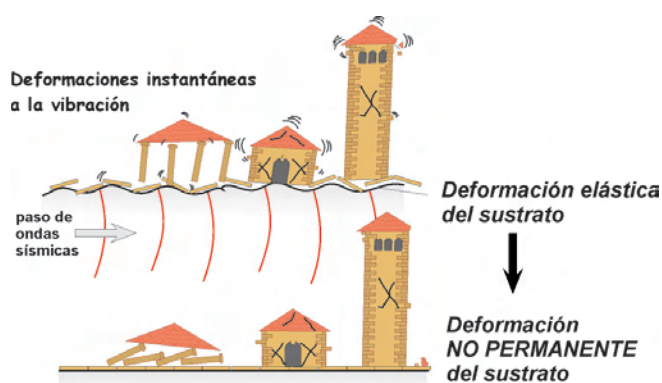


Figura 6.10. Esquema explicativo de la génesis de EAE asociados a las deformaciones instantáneas producidas por las ondas sísmicas. En este caso las deformaciones que se producen en las estructuras se producen directamente por las vibraciones inducidas por el paso de las ondas sísmicas, y no por deformaciones permanentes del sustrato. Esto no implica que no se produzcan estas deformaciones, sino que estos efectos no están relacionados con esas posibles deformaciones no elásticas (permanentes) del terreno.

Dentro de este tipo de EAE se clasifican los siguientes efectos (ver Figura 6.1): *fracturas penetrativas y conjugadas en muros de estuco, ladrillo o sillería; caída orientada de columnas* (Figura 6.11); *giros en bloques de sillería y columnas; bloques de sillares desplazados; dovelas de arcos o dinteles desplazadas* (Figura 6.12); *escalones y líneas de bordillo plegadas; muros y bóvedas colapsadas; marcas de impacto; y roturas en esquinas de bloques.*

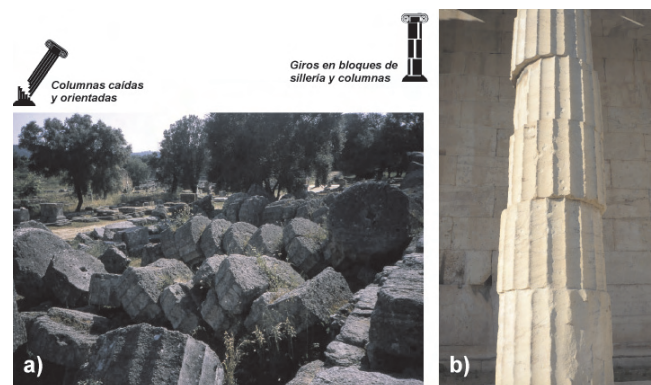


Figura 6.11. Efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones (deformaciones instantáneas a la vibración). Las caídas orientadas de columnas son estructuras comúnmente relacionadas con los efectos de eventos sísmicos. a) Caída orientada de columnas en Olimpia (Grecia) (Foto: T. Bardaji). b) Rotación y desplazamiento de tambores de columna en el templo de Zeus (Atenas, Grecia) (Foto: Virginia Ruiz Villanueva).

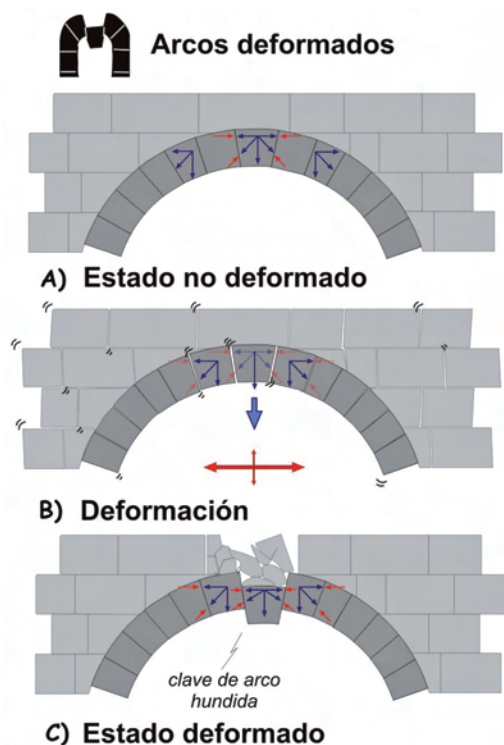


Figura 6.12. Efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones (deformaciones instantáneas a la vibración). Los movimientos horizontales inducidos por terremotos producen la separación de las dovelas, eliminando el soporte de lateral de las mismas, produciendo el movimiento vertical (deslizamiento) de las dovelas, generalmente la clave del arco. En la foto se puede observar el colapso de la clave del arco de una ventana en un fortificación del siglo XIX en Pythagorion (Samos, Grecia) como consecuencia de un terremoto de magnitud 6.9 ocurrido en 1955 (Stiros, 1996) (Foto: T. Bardaji).

6.2.2. Efectos Postsísmicos

Éstos son los efectos posteriores a la ocurrencia del terremoto, que se clasifican como efectos secundarios. Este tipo de efectos se clasifican en: efectos visibles en las **construcciones**, y efectos visibles en el **registro geoarqueológico**.

6.2.2.1. Efectos en las construcciones

Estos efectos incluyen las soluciones constructivas adoptadas por las sociedades que han sufrido uno o más eventos destructivos. Estas soluciones pueden ir desde la reconstrucción con elementos reciclados de las construcciones afectadas (a), a la adopción de medidas constructivas antisísmicas (b).

Muchos de estos efectos son difícilmente evaluables, por lo que generalmente se consideran de carácter secundario dado que implican la adopción de medidas por parte de las sociedades afectadas, y esas medidas deben tener un claro carácter funcional, difícilmente demostrable en muchas ocasiones. El inventariado e interpretación de este tipo de estructuras requiere el análisis multidisciplinar de las estructuras por arquitectos, historiadores y arqueólogos.

a) Reparación de construcciones y utilización de elementos reciclados

Este tipo de efectos es difícilmente identificable, deben considerarse siempre en el contexto del yacimiento, apoyado por datos arqueológicos e históricos.

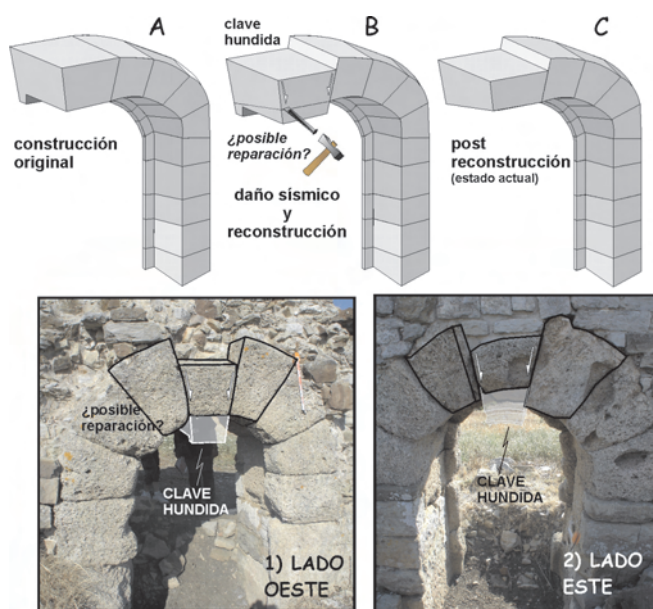


Figura 6.13. Posible estructura de reparación de daños producidos por un sismo (siglo II) (hundimiento de la clave central del arco) en la puerta de un bastión en la zona este de la muralla del yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz, España): A) posición original B) daños sísmicos y posible reparación: eliminación de parte de la clave para ajustar el arco en la puerta. C) estado actual (fotos 1 y 2).

b) Construcciones antisísmicas

Uno de los elementos más comunes como medida de construcción antisísmica y que a la vez suele tener un buen in-

dice de conservación, son los engatillados en bloques, sillares en muros, y engatillados en dovelas de arco o dinteles.

Los engatillados de bloques son el resultado de labrar bloques de forma que encajen con los adyacentes rompiendo las hiladas homogéneas, de forma que frente a cargas dinámicas horizontales la estructura en la que están incluidos se deforme de forma homogénea, evitando daños mayores en la estructura.

Este tipo de elemento constructivo está muy extendido en culturas del mediterráneo y de oriente próximo (Figura 6.14).

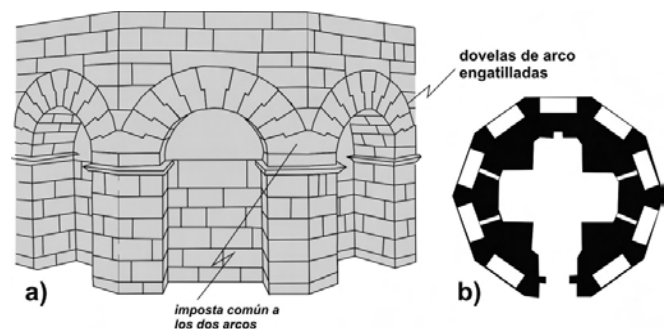


Figura 6.14. a) Esquema de la planta inferior del Mausoleo de Teodorico el Grande (Rávena, Italia). Edificio funerario construido por el rey Teodorico el Grande (siglo VI), de planta circular con forma decagonal. Nótese como además del engatillado de las dovelas, la imposta es común a los dos arcos contiguos, lo que hace que el conjunto se comporte como un anillo de atado perimetral (b). Actualmente, en los edificios con aplicación de norma sismorresistente los atados perimetrales suelen hacerse con cables de acero.

En España existen numerosos ejemplos de utilización de engatillados en la construcción de elementos de infraestructura o defensivos, en prácticamente todas las culturas que se han desarrollado en la Península Ibérica:

- de origen púnico, como por ejemplo en la muralla del siglo V del Castillo de Doña Blanca en el Puerto de Santa María (Cádiz); o en la muralla del siglo II de Cartagena (Bendala y Blanquez, 2003).
- de época romana republicana, como por ejemplo en la muralla de Contrebia Belaisca (Cabezo de las Minas de Botorrita, Zaragoza), en la muralla de Emporiare (Ampurias romana) (San Martín de Ampurias, Gerona); en los muros de la Fortaleza de Olèrdola (San Miquel d'Olèrdola, Barcelona); en la muralla de Tarraco (Tarragona) (Asensio, 2006), o en la muralla tardorromana de Veleia (siglo II d.C.) (Iruña, Álava) (Iriarte, 1997), o su utilización en puertas como en un dintel de la Puerta del Socorro de la muralla de Tarraco (Tarragona).
- de origen árabe (Figura 6.15), como en el arco almohade de la Puerta de Sevilla (Carmona, Sevilla), o en los arcos del puente de Villa del Río y de los Pedroches (Córdoba). Estos últimos puentes han sido considerados romanos pero diversos autores asignan estos engatillados a una reconstrucción árabe (Omeyyas) con técnicas bizantinas de puentes romanos preexistentes (Durán, 2006).



Figura 6.15. Los engatillados aparecen con cierta frecuencia en arcos y dinteles de puertas y ventanas, como solución a posibles desplazamientos de las dovelas por movimientos horizontales. Era una solución muy aplicada en la cultura árabe en España para evitar posibles colapsos de este tipo de estructuras por movimientos sísmicos (Cejka, 1978). Un claro ejemplo de la utilización de dovelas engatilladas lo podemos encontrar en un arco de época almohade de la Puerta de Sevilla en Carmona (Sevilla, España).

- y en diferentes edificios religiosos y civiles del siglo XIV-XV en adelante (Lonja de Valencia, Iglesia de Santa Catalina en Valencia, Ayuntamiento de Astorga, etc...).

No obstante, siempre ha existido una gran controversia sobre la funcionalidad antisísmica de estas estructuras, definiendo dos posibles aplicaciones constructivas a estas estructuras: por refuerzo constructivo (incluido el antisísmico); y por ampliación y/o reconstrucción (en la reconstrucción también puede haber un origen sísmico).

Utilización de engatillados para reforzar la estructura.

La utilización de sillares y/o dovelas engatilladas para reforzar la estructura frente a cargas horizontales (dinámicas o estáticas) se puede observar en muchos edificios en los que la utilización sistemática de estas estructuras hace evidente la funcionalidad de la medida. Un ejemplo claro en España es la Lonja de Valencia, edificio del gótico civil levantino (de finales del siglo XV hasta mediados del siglo XVI). Este edificio consta de varias partes, la más conocida es la Sala de la Contratación (Figura 6.16). Esta sala se estructura en tres naves de más de 17 metros de altura, sostenida por columnas (finales del siglo XV). En ella, se observa la utilización sistemática de engatillados para contrarrestar cargas laterales en la estructura (Figura 6.16): en las zonas inferiores, medias y superiores de las ventanas (fotos 1, 2, 6 y 9), en los muros alrededor de las puertas (fotos 3, 7 y 8), y en los muros que engloban las columnas laterales (foto 5).

Y aunque no podemos establecer inequívocamente su origen antisísmico, el maestro constructor de esta estructura, Pere Compte (¿? Gerona- 1506 Valencia), pudo estar influenciado por las técnicas constructivas de la zona catalana, como por ejemplo la Catedral de Gerona, estructura diseñada teniendo en cuenta la posible ocurrencia de un sismo (Huerta, 2001).

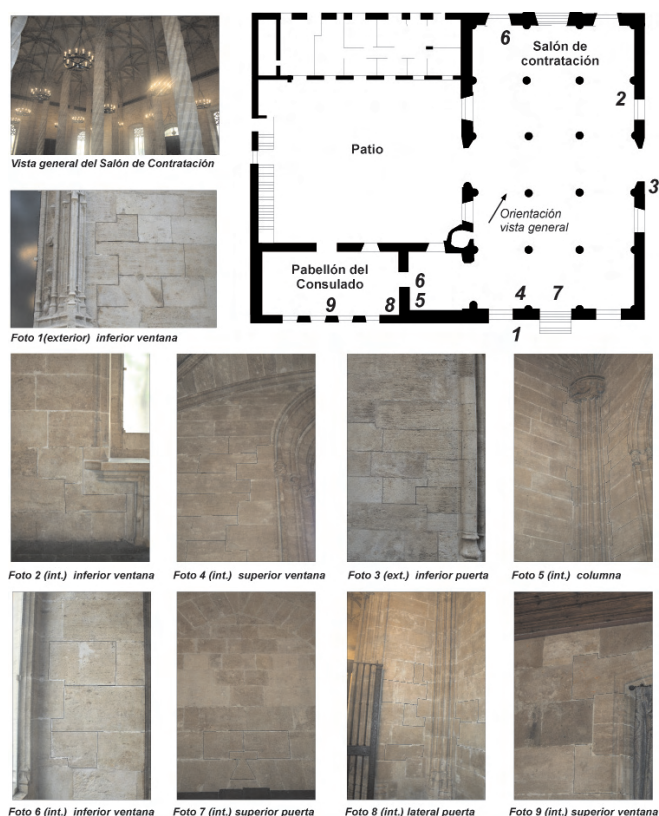
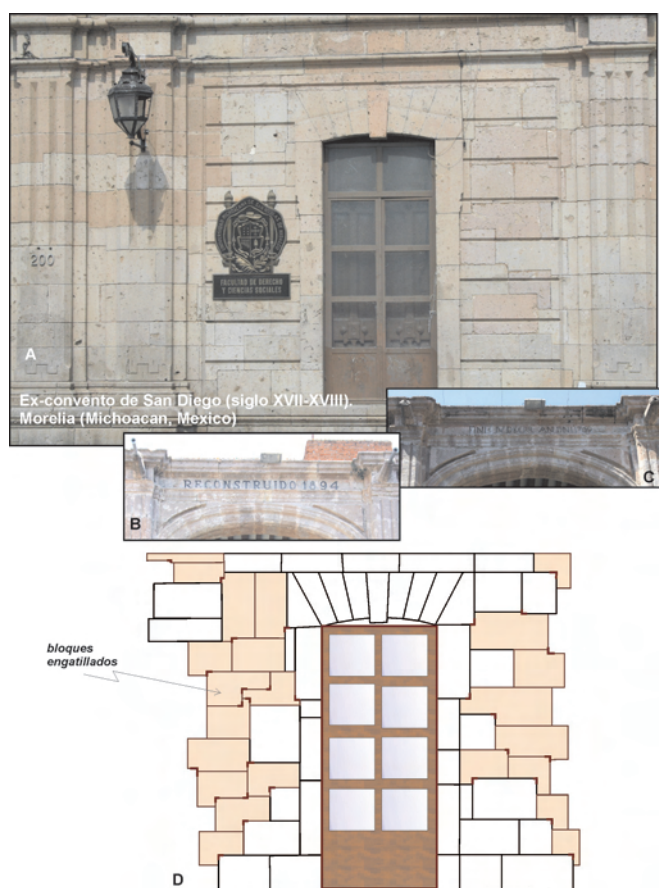


Figura 6.16. Diferentes engatillados en la Lonja de Valencia (finales del siglo XV y principios del XVI). La utilización constante y sistemática de los engatillados en la construcción de uno de los máximos exponentes de la arquitectura civil gótica en España demuestra una clara funcionalidad constructiva, destinada a evitar el colapso por aumento de cargas horizontales dinámicas o estáticas.

No obstante, y aunque es evidente, que sin documentación adecuada es difícil caracterizar, sin lugar a dudas que la utilización de este elemento constructivo tiene una intención antisísmica, en algunos casos, es evidente el diseño antisísmico de los engatillados. En concreto podemos destacar la reparación del antiguo convento de San Diego (siglos XVII y XVIII) en la ciudad de Morelia (antigua Nueva Valladolid), capital del estado de Michoacán (México). Este edificio, que fue finalizado en 1769, fue reconstruido a finales del siglo XIX (1895), con posterioridad al gran terremoto de Patzcuaro de 1856 (Intensidad IX, escala MSK), que provocó grandes daños en las ciudades de Patzcuaro y Morelia. En toda la fachada del edificio (de más de 80 m de largo) se pueden observar la sistematicidad en la utilización de sillares engatillados, rompiendo completamente la horizontalidad de las hiladas de sillares que conforman la fachada, sobre todo en la planta baja del edificio (Figura 6.17).



Utilización de engatillados para ampliar y/o reparar estructuras.

No obstante, los engatillados de sillares y bloques están presentes en edificaciones de todas las culturas que han residido en la Península Ibérica, y en muchos casos existen diferentes interpretaciones sobre la funcionalidad de estos elementos.

En España se puede localizar numerosos ejemplos de la utilización de esta técnica constructiva para reforzar estructuras que hubieran sufrido colapso (Figura 6.18), e incluso para dar consistencia a la ampliación de una estructura preexistente (Figura 6.19).

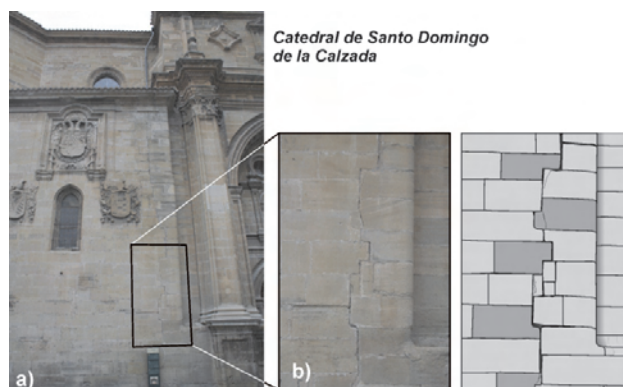


Figura 6.18. Utilización de engatillados para reparar estructuras dañadas o colapsadas. a) Vista frontal de la Catedral de Santo Domingo de la Calzada (La Rioja, España), en la que se observa una grieta que recorre verticalmente la fachada. b) Detalle de la zona reparada, en la que se observa la grieta y la utilización de sillares engatillados para repararla y dar consistencia a la estructura muraria. En el resto de la fachada no se observa la presencia de sillares engatillados lo que demuestra la función reparadora de esta técnica constructiva.

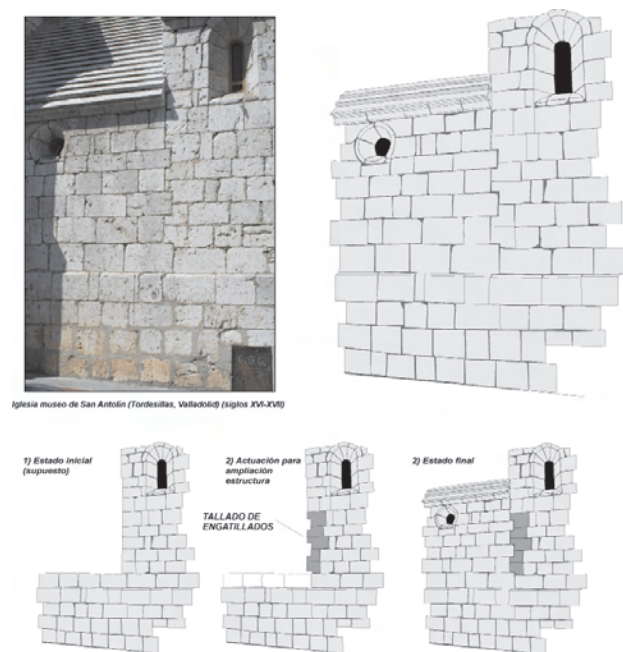


Figura 6.19. Utilización de engatillados para la ampliación de una estructura preexistente en la Iglesia Museo de San Antón en Tordesillas (Valladolid, España). Es esta figura se reconstruye la posible actuación realizada para la ampliación de una zona de la iglesia, con el cinzelado de los engatillados para ajustar y poder construir el nuevo muro, de forma que la estructura se comporte homogénea frente a la deformación.

Diseño antisísmico de grandes estructuras

En algunos casos, tenemos información histórica sobre la aplicación del diseño sismorresistente de grandes estructuras. Un ejemplo es el congreso realizado en Gerona entre 1416 y 1417, en él que se reúnen 11 maestros arquitectos para establecer si el diseño de la catedral de Gerona en una única nave, era seguro. Uno de ellos, maestro de la catedral de Tarragona, expone sus dudas sobre la seguridad de una única nave de tales dimensiones pueda ser estable frente a temblores de tierra o a grandes huracanes (Huerta, 2001).

No obstante, en la mayoría de los casos no tenemos documentación que acredite esa funcionalidad, y por ello es mucho más difícil establecer la función antisísmica de algunas estructuras constructivas bien, porque que las medidas aplicadas no han quedado patentes en el registro arqueológico y/o histórico (estructuras de madera que no suelen preservarse), o bien porque implican diseños mucho más complejos, y por tanto mucho más discutibles en cuanto a su función antisísmica.

Algunas estructuras constructivas son universalmente aceptadas como resultado de la búsqueda de la funcionalidad antisísmica, como es el caso de la planta baja del Mausoleo de Teodorico en Rávena (Italia) (ver Figura 6.14), en la que las impostas engatilladas comunes a dos arcos contiguos, hacen que la estructura como conjunto se comporte como un anillo de atado perimetral. Pero otros mu-

chos, requieren un análisis detallado de la funcionalidad de algunas técnicas constructivas para poder apuntar esa funcionalidad sismorresistente.

Cassinello (2003, 2005) establece una clasificación de las catedrales góticas españolas en función de sus características estructurales, definiendo dos tipos principales (Cassinello, 2003): catedrales de tipo A (similares a las catedrales francesas a las que imitan) y las de tipo B, que cambian sustancialmente algunas características estructurales muy definitorias. Las catedrales con tipos estructurales B, cambian los techos inclinados por techos aterrazaados, y además incluyen arcos adheridos a la parte interior del cañón de una nave o a una bóveda (bóvedas enjutaadas) haciéndolas más resistentes a las fuerzas dinámicas horizontales inducidas por terremotos o fuertes vientos (Cassinello, 2003, 2005).

Cassinello (2005) relaciona la localización geográfica de las catedrales de tipo B, con las zonas epicentrales de los grandes terremotos ocurridos en la Península Ibérica en los siglos XIII, XIV y XV. La distribución geográfica de este tipo de catedrales en el mapa de aceleraciones sísmicas de la norma sismorresistente actualmente en vigor (NCSE-02), permite observar que todas las catedrales de tipo B se sitúan en zonas que presentan una aceleración esperable de más de 0,04 g (Figura 6.20), es decir las zonas en las que actualmente se exige la aplicación de la NCSE-02.

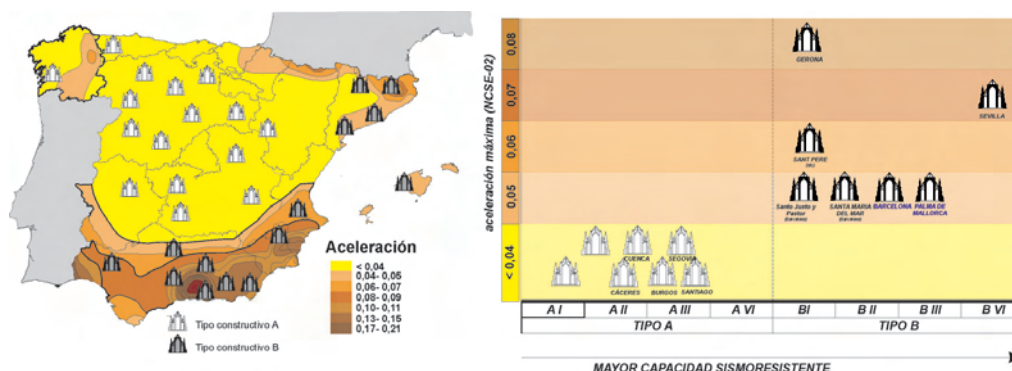


Figura 6.20. Ubicación de diferentes tipos de catedrales sobre el mapa de aceleraciones de la norma sismorresistente de España del 2002 (NCSE-02) (modificado de Cassinello, 2005): tipo A (techos inclinados, sin enjutamiento de las bóvedas, tipo francés) y tipo B (techos aterrazaados, con enjutamiento de las bóvedas), (Cassinello, 2003). Según esta autora, los tipos constructivos B son más resistentes a las cargas dinámicas horizontales producidas por los movimientos sísmicos. Las diferentes subclases (I, II, III y IV) hacen referencia al número de naves de las catedrales y a la altura de las naves laterales con respecto a la nave central (Cassinello, 2003).

Este tipo de datos muestran la respuesta de la sociedad ante la ocurrencia de terremotos, y es evidente que no puede utilizarse por sí solos para caracterizar un sismo destructor en una zona. No obstante, son de gran utilidad en numerosos aspectos relacionados con el análisis de la sismicidad histórica:

1) en una zona en la que no se tiene constancia de sismos destructivos importantes, el inventario de medidas constructivas antisísmicas nos ayudan a establecer posibles ocurrencias de sismos no catalogados en el registro histórico.

2) nos permite cuantificar las consecuencias de un terremoto en las sociedades afectadas, ya que cuanto más extendidas estén las medidas de construcción sismorresistente aplicadas por esas sociedades, mayor habrá sido el impacto de los eventos sísmicos en dichas sociedades.

3) puede dar información de ocurrencia de sismos a lo largo del tiempo, la aplicación sistemática de este tipo de medidas durante un intervalo de tiempo elevado puede significar la percepción del peligro sísmico por la sociedad, percepción relacionada con la ocurrencia “frecuente” de este tipo de eventos.

6.2.2.2. Efectos de registro

Los efectos visibles en el registro geoarqueológico requieren un análisis multidisciplinar y detallado del registro geoarqueológico por parte de arqueólogos y geólogos. Estos efectos pueden ser visibles por la presencia de horizontes de destrucción asimilables a terremotos (horizonte de terremoto, Evans 1928), por la falta de registro arqueológico en ciudades que han tenido ocupaciones durante largos periodos temporales y que son abandonadas sin causas claras que lo justifiquen (abandonos injustificados).

Es evidente que el hecho de definir en un yacimiento arqueológico un abandono puntual del asentamiento no implica la ocurrencia de sismos, no obstante si esos datos se relacionan con otros EAE en la zona, podemos llegar a establecer con un bajo grado de error la posible ocurrencia de un sismo.

Otro ejemplo muy común es la presencia de grandes incendios, ya que el colapso de las techumbres inflamables de las construcciones sobre los hogares de las casas producía importantes incendios, como por ejemplo el incendio de Lisboa después del terremoto de 1755, aunque como ya hemos mencionado este tipo de efectos deben ser analizados en el contexto del yacimiento junto con otros efectos observables.



Figura 6.22. Edificios históricos del Consejo de Canterbury (siglo XIX) (Christchurch, Nueva Zelanda) (construidos 1858 a 1865), afectados por el sismo del 22 de febrero de 2011. (Foto: Juan Miguel Insua Arévalo).

6.3. Comparación de EAE con efectos en sismos instrumentales

La mayor parte de las estructuras y efectos considerados en esta clasificación han sido descritos en diferentes yacimientos arqueológicos como resultado de los daños producidos por efecto de un terremoto.

Una de las formas que tenemos de intentar obtener mayor información de los efectos cosísmicos, es compararlos con los efectos producidos por sismos instrumentales de los que conocemos alguno de los parámetros focales.

Uno de los terremotos analizados ha sido el terremoto de Christchurch (Nueva Zelanda) del 22 de febrero de 2011.

La comparación de efectos geológicos es directa, ya que se conoce perfectamente la dinámica de estos procesos, y es relativamente sencillo reconocer estos efectos en el registro sedimentario (Figura 6.21).

En cambio, la comparación de terremotos actuales que afectan a poblaciones (efectos en la fábrica de las construcciones) presenta ciertos problemas a la hora de comparar daños, ya que, en muchos casos, los materiales y técnicas constructivas actuales tienen poco que ver con las utilizadas en otros momentos de la historia, no obstante los efectos en estructuras históricas (Figura 6.22) (e.g. iglesias) pueden aportar datos sobre el efecto de las ondas sísmicas sobre estructuras de sillares o bloques de piedra.

Existen otros daños fácilmente relacionables como puede ser los efectos sobre pavimentos, o sobre materiales de cubierta como asfaltos, en estos casos la dinámica de las deformaciones varían muy poco y son fácilmente comparables con los efectos producidos en yacimientos arqueológicos. (Figura 6.23).

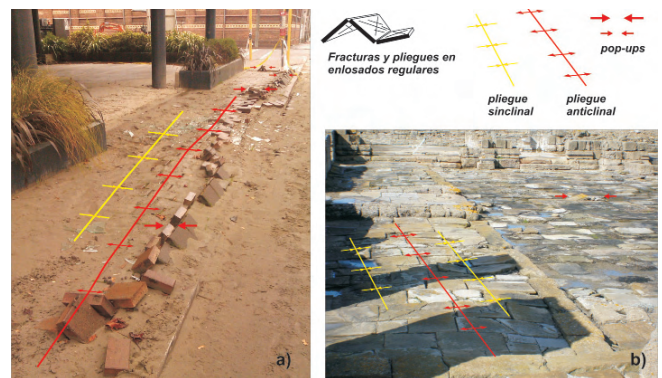


Figura 6.23. Comparación de los daños sufridos por actividad sísmica en (a) pavimento de bloques en una acera de Armagh Street (Christchurch, Nueva Zelanda) (sismo del 22 de febrero de 2011) (Foto: Juan Miguel Insua Arévalo); y en el enlosado del Foro del yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz, España) afectada por un sismo en el siglo III (Silva et al., 2009). En ambos casos se observa como se produce el plegamiento del pavimento formando pliegues anticlinales y sinclinales, y la formación de estructuras en *pop-up*. En el caso de la estructura del terremoto de Christchurch esta deformación también está asociada a procesos de licuefacción de las arenas subyacentes.

Otro de los casos de terremotos instrumentales con los que se han comparado algunas de las estructuras es el terremoto de México de 1985 (también conocido como el terremoto de Michoacán de 1985) del que tenemos pruebas documentales, y testimonios directos de las deformaciones producidas.

Muchas de las deformaciones producidas por este terremoto aún son visibles en las calles de México DF. En la figura 6.24 se observa la misma estructura de losas regulares formando *pop-ups*, es decir levantamientos de las losas por el movimiento horizontal de las sacudidas sísmicas, en algunos casos se produce la superposición de las losas. Observamos el mismo tipo de estructura en: el enlosado del foro romano de la ciudad de Baelo Claudia (sismo del siglo III) (Silva et al., 2009); y en una acera de

una de las principales avenidas de México D.F., estructura producida por el sismo de Michoacán de 1985.



Figura 6.24. Pliegues asimétricos en: a) enlosado del teatro de la ciudad romana de *Baelo Claudia* (Cádiz, España) y b) enlosado de la acera de la calle Dolores en su confluencia con Independencia en México DF, estos pliegues fueron generados por el devastador terremoto de Michoacán de 1985 (Garduño-Monroy comunicación personal) (Rodríguez-Pascua et al, 2011). Nótese la simetría entre las dos estructuras.

En la figura 6.25 tenemos otro ejemplo de comparación de estructuras de deformación producidas por sismicidad (fracturas penetrativas en muros de ladrillo o sillar) en yacimientos arqueológicos, como en el Tolmo de Minateda (Albacete, España), y daños producidos por terremotos instrumentales en la ciudad de México D.F. (Garduño-Monroy, comunicación personal).

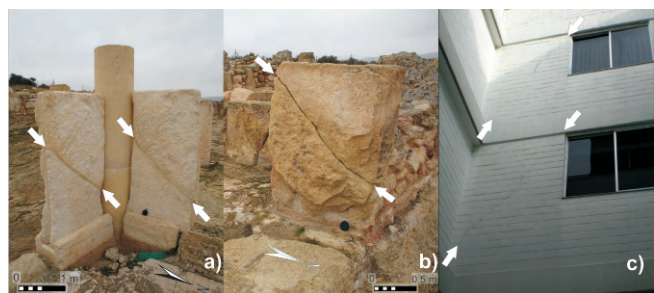


Figura 6.25. a) y b) Fracturas penetrativas en bloques de sillaría del yacimiento del Tolmo de Minateda (Albacete, España). c) Fracturas penetrativas en una de las fachadas del Hotel Segovia generadas por el terremoto de 1985 (Calle Insurgentes, Mexico D.F.) (Garduño Monroy, comunicación personal).

El análisis de efectos de terremotos instrumentales y su comparación con los EAE puede llegar a permitirnos definir algunas de las características macrosísmicas de los terremotos definidos en los análisis geoarqueológicos (direccionalidad de los daños, intensidades mínimas y máximas, etc.).

7. CUANTIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN

Una vez definidos y clasificados los Efectos Arqueológicos de los Terremotos (EAE's, Earthquake Archeological Effects) en un yacimiento arqueológico, debemos considerar las posibles interpretaciones cinemáticas de cada uno de ellos, que puedan aportar información sobre el estado de deformación que ha producido las estructuras.

Las estructuras que más información pueden ofrecer a la hora de definir el estado de deformación a partir del análisis estructural son las que se clasifican como efectos cosísmicos primarios (efectos directos): efectos geológicos y efectos en la fábrica de las construcciones.

Los efectos geológicos, tanto primarios como secundarios, se analizan con técnicas clásicas de análisis estructural geológico para determinar las características de la deformación que los ha producido. En cambio, los efectos en la fábrica de las construcciones, se han considerado siempre como datos documentales cualitativos de daños sísmicos en un yacimiento arqueológico (Stiros, 1996; Marco, 2008). En este capítulo se estudiará la cinemática de los efectos en la fábrica de las construcciones para poder analizarlos mediante técnicas clásicas de análisis estructural geológico, y poder obtener así los parámetros del teórico elipsoide de deformación resultante para el yacimiento arqueológico, conjunto monumental o histórico, afectado por un terremoto.

De este modos se podrá analizar de forma coherente y conjunta los datos de deformación obtenidos tanto de los efectos geológicos como de los efectos en la fábrica de las construcciones.

Otro de los datos que se va a considerar en el análisis de los efectos en la fábrica de las construcciones, es la direccionalidad de los daños observados. Existen diferentes trabajos definiendo cierta direccionalidad de daños en terremotos actuales (e.g. Ghayamghamian et al, 2007; Konagai et al., 2005; Motokí y Seo, 2000); sobre edificaciones, monumentos y distintos tipos de construcciones. Esta direccionalidad puede aportar datos suficientes para comparar terremotos instrumentales e históricos, pudiéndose evaluar e identificar algunos parámetros focales de sismos históricos.

7.1. Orientación del tensor de deformación

7.1.1. Tensor de deformación

Para definir el estado de deformación a partir del análisis de los EAE en un yacimiento arqueológico, definimos la

cinemática de las estructuras con el fin de inferir posteriormente los parámetros del tensor de deformación. Este tensor definido por un elipsoide, a su vez se puede definir mediante la orientación y magnitud de sus tres ejes principales ortogonales entre sí (e_y , e_x y e_z), siendo e_y y e_x los ejes de deformación en la horizontal ($e_y \geq e_x$), y e_z el eje de deformación en la vertical.

La forma del elipsoide de deformación viene definida por los valores de magnitud absolutos o relativos entre los tres ejes. No obstante, en la mayoría de los análisis es complicado definir las magnitudes absolutas de los diferentes ejes, y por tanto se suele trabajar con valores relativos. Dichos valores nos permiten establecer la forma del elipsoide de deformación, información importante, ya que la forma del elipsoide proporciona información sobre el tipo de cinemática que ha provocado la deformación del terreno inducida finalmente a las estructuras (Figura 7.1).

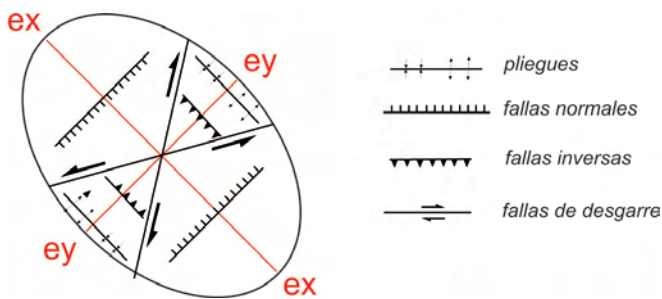


Figura 7.1. Elipse de deformación (e_y máximo acortamiento horizontal, e_x mínimo acortamiento horizontal). Orientación de las principales estructuras que se pueden neoformar o reactivar bajo un tensor de deformación (en este caso e_y orientado según N45° E).

En el caso del análisis de estructuras arqueológicas, es bastante complejo definir las magnitudes absolutas o relativas. Sin embargo, aplicando técnicas clásicas de análisis estructural geológico, es relativamente sencillo definir la orientación de la máxima deformación en la horizontal, es decir la orientación de e_y . Por ello, y para simplificar el análisis, consideramos únicamente la orientación de los ejes de deformación en la horizontal, es decir, la orientación de e_y y e_x (e_x se encuentra en el plano horizontal y perpendicular a e_y). Los datos de orientaciones de e_y y e_x obtenidos del análisis individual de los EAE en un yacimiento nos permiten definir la homogeneidad de las deformaciones presentes en esa zona, y por tanto establecer el posible origen sísmico de las deformaciones observadas.

En muchos casos para poner de manifiesto las posibles variaciones del tensor de deformación en una zona, se utilizan las trayectorias de deformación. Las trayectorias de deformación son las líneas que definen el estado de deformación en una superficie, es decir, definen las variaciones en la orientación de los ejes de deformación en la horizontal (e_x y e_y). Estas trayectorias se suelen construir mediante la interpolación de las orientaciones puntuales del tensor de deformación.

Tensor de deformación regional y local

En geología, cuando se realiza un análisis de la deformación, se consideran los posibles efectos locales que pueden inducir variaciones en la forma y orientación del tensor de deformación, medidas en distintos puntos de la zona analizada.

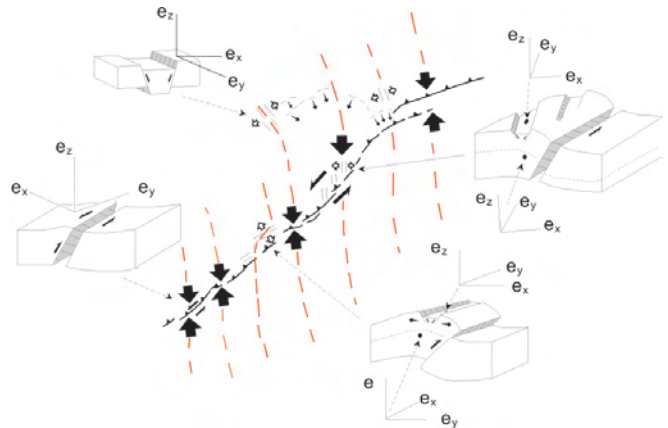


Figura 7.2. Ejemplo de variaciones en la forma y orientación del tensor de deformación (las líneas rojas son las trayectorias de e_y inducidas por el terremoto de la falla del Asnam en 1980 (modificado de Phillip y Cisternas, 1983).

Normalmente, estas variaciones están relacionadas con pequeños cambios en la orientación del elipsoide de deformación y en la forma del mismo. Cuando se analizan zonas relativamente poco extensas es absolutamente necesario considerar las posibles variaciones en la orientación del tensor de deformación.

En este tipo de análisis estas variaciones, normalmente pequeñas rotaciones, y pueden estar relacionadas con múltiples factores: bien con las orientaciones principales de las líneas de construcción que estructuraban el yacimiento (e.g. muros, calles, canalizaciones, alcantarillados, cimentaciones), o bien con las diferencias de comportamiento ante la deformación de las diferentes estructuras arquitectónicas existente en el yacimiento analizado (e.g. muros de sillería o de ladrillos, escaleras, enlosados regulares o irregulares) (ver punto 7.2).

No obstante, independientemente de los cambios en la forma del tensor de deformación, si se mantienen más o menos constantes la orientación y posición de los ejes de deformación (e_y y e_x), permitirá analizar las deformaciones basándose casi exclusivamente en la orientación de tensor de deformación y no en su forma, que puede variar mucho localmente.

En el caso que se produzcan reorientaciones puntuales e importantes del tensor de deformación, se hará la representación de las trayectorias de e_y deducidas de la interpolación de los datos puntuales de este eje obtenidos del análisis de cada estructura (EAE). De esta forma, se pueden identificar aquellas las zonas que presenten diferente comportamiento frente a la deformación, produciendo rotaciones en las trayectorias pudiéndose analizar la posible influencia de las estructuras y/o orientaciones arquitectónicas principales del yacimiento. En ocasiones, estas rotaciones pueden estar influenciadas por la inter-

vención de otros tipos de efectos secundarios de los terremotos, como es el caso de deslizamientos o flujos de tierra superficiales, tal y como ocurre en el conjunto arqueológico de Baelo Claudia (Silva et al., 2009). En cualquier caso, a la hora de elaborar este tipo de análisis es absolutamente necesario tener en cuenta la topografía y pendiente del terreno, para poder identificar la participación de procesos gravitatorios post-evento en la direccionalidad de las deformaciones.

7.2. Análisis de la deformación en los EAE's

El análisis de la deformación presente en los daños de un yacimiento arqueológico, puede aportar mucha información sobre el origen de los mismos. La cuantificación de la deformación permite: (a) caracterizar la deformación del conjunto del yacimiento arqueológico, por tanto, poder definir un origen común o no, de las deformaciones presentes (i.d. establecer el origen sísmico de las deformaciones); (b) analizar la posible direccionabilidad de los daños observados e intentar relacionarlas con algunos de los parámetros focales del sismo; y (c) descartar o no la participación de efectos secundarios cosísmicos o deformaciones posteriores producidas durante el proceso de enterramiento del yacimiento (fundamentalmente si son de origen coluvionar).

Para ello en este capítulo se expondrán las metodologías de cuantificación de la deformación que pueden aplicarse a cada uno de los EAE considerados, de forma que se pueda abarcar el análisis de las deformaciones presentes tanto de forma individual, como de forma conjunta (análisis conjunto del yacimiento).

7.2.1. Características de los datos

Antes de analizar los EAE, para poder cuantificar la deformación, se deben de considerar una serie de aspectos relacionados con la caracterización de los datos que se recopilarán y que posteriormente, se utilizarán para el análisis de la deformación en el yacimiento arqueológico a estudiar. Es necesario definir algunas características de estos datos para normalizar el procedimiento de análisis de la deformación. Fundamentalmente habrá que caracterizar (1) la orientación de los datos, (2) el tipo de dato, y finalmente (3) la complementariedad de los mismos.

Orientación de los datos

Las orientaciones que debemos considerar para poder realizar el análisis estructural de las EAE en el yacimiento arqueológico pueden presentar dos geometrías:

- Planos. Datos definidos mediante planos (dirección y buzamiento) (e.g. superficies plegadas, u orientaciones de losas en pavimentos plegados).
- Líneas. Datos definidos por una orientación de una línea, y que pueden ser de tres tipos (Figura 7.3):
 - a) sólo dirección (L1) (e.g. E-O, N45°E).
 - b) dirección y acimut (e.g. vector de caída de columnas) (L2), es decir definimos el sentido de una

dirección (i.e. conocemos la dirección de la línea y su sentido).

- c) y en algunos casos: dirección, acimut y magnitud (e.g. vectores de desplazamiento) (L3).

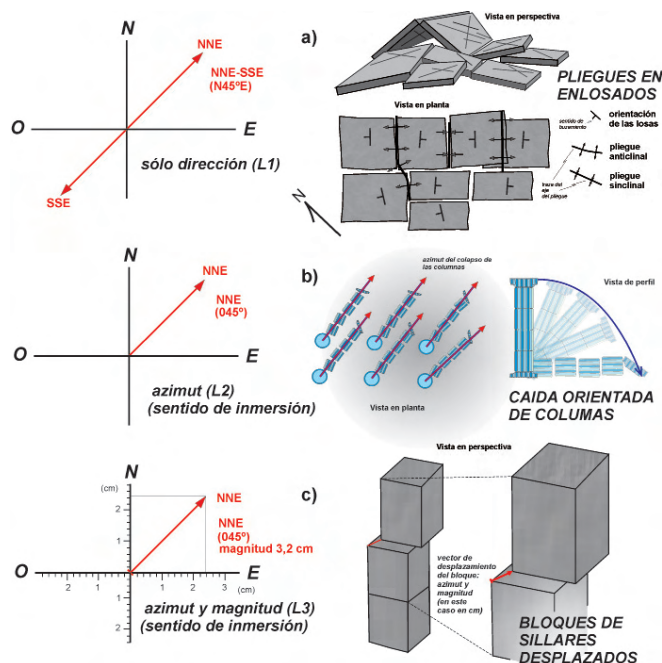


Figura 7.3. Caracterización de los datos lineales que se deben analizar en los yacimientos arqueológicos en función de su orientación: a) L1, sólo se puede definir la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey); b) L2, los efectos tienen una direccionalidad marcada, además de poder establecer su dirección, podemos establecer el sentido de los daños; c) L3, podemos obtener los mismos datos (acimut y sentido) que en los datos de tipo L2, pero además podemos cuantificar la magnitud de esa deformación (e.g. vectores de desplazamiento de bloques: acimut, sentido de movimiento, y magnitud de ese desplazamiento).

Tipo de dato

Los análisis realizados pueden definir: o bien una orientación única de un plano o de una línea, o bien un intervalo de orientaciones.

- Orientación única

Por ejemplo en el caso de los choques entre losas de pavimentos definimos una única línea (orientación y sentido).

- Rango de orientaciones

En cambio en el caso de los muros basculados definimos un intervalo de direcciones (orientación y sentido) con respecto a la dirección del muro considerado.

Complementariedad de los datos

- Datos únicos

Existen EAE que aportan una única orientación o intervalo de orientaciones, y que no se pueden acotar comparando con otros datos obtenidos del análisis del mismo elemento en otras zonas del yacimiento arqueológico.

- Datos complementarios (muros, dovelas hundidas en arcos,...)

Hay otros resultados obtenidos del análisis de los EAE que permiten acotar intervalos y orientaciones mediante la consideración de elementos similares en el tratamiento conjunto de los datos.

Un ejemplo claro son los análisis de los muros basculados (Figura 7.4). En este caso cada muro define un intervalo de acimut de aproximadamente 180°. En el caso de Baelo Claudia con una distribución arquitectónica regular podemos considerar los muros de un mismo edificio para realizar este análisis, definiendo un intervalo común para ambas familias de muros (Figura 7.4).

Caracterizando estos tres factores se definen los aspectos a tener en cuenta en la toma de datos posterior análisis de la deformación observable en los diferentes EAE considerados (Figura 7.5).

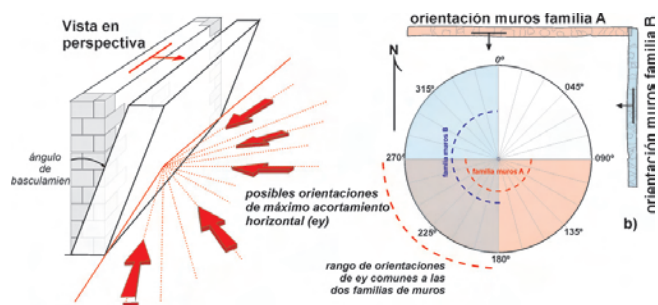


Figura 7.4. Ejemplo de análisis de datos complementarios. En el caso de los muros basculados o colapsados, podemos establecer un intervalo de orientaciones de máximo acortamiento horizontal (ey) que han podido producir los daños en cada familia de orientaciones de muros. Este intervalo de orientaciones puede ser complementado con el análisis de otros muros con diferentes orientaciones, estableciendo un intervalo o rango de orientaciones comunes para las dos familias de muros, acotando así la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) para el conjunto del EAE analizado.

Estructuras (EAE)		Orientación	Tipo	Com.
ESTRUCTURAS GENERADAS POR DEFORMACIÓN DEL SUSTRATO				U
				U
				U
				U
				U
				C
				U
				U
ORIENTACIÓN		TIPO		COMPLEMENTARIEDAD
			Orientación única	U Dato único
			Rango de orientaciones	
				C Dato Complementario

Estructuras (EAE)		Orientación	Tipo	Com.
ESTRUCTURAS GENERADAS POR DEFORMACIONES EN LA FÁBRICA DE LAS CONSTRUCCIONES	Fracturas penetrativas en bloques de sillería			U
	Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo			U
	Columnas caídas y orientadas			U
	Giros en bloques de sillería y columnas			U
	Bloques de sillares desplazados			U
	Arcos desplazados			C
	Escalones y líneas de bordillo plegadas			U
	Muros colapsados (incluyendo restos humanos y/o objetos de valor bajo los escombros)			C
	Marcas de impacto			U
	Roturas en esquinas de bloques			U

Figura 7.5. Caracterización de los parámetros considerados en el análisis de la deformación en cada EAE: orientación del dato (planos y línea: L1, L2 y L3); tipo de dato (orientación única y rango de orientaciones); y complementariedad del dato (dato único y dato complementario) (ver texto para explicación).

7.2.2. Análisis Individual de EAE

A la hora de analizar cada uno de los EAE presentes en el yacimiento arqueológico, debemos conocer la información que puede aportar cada uno de ellos, definiendo todos los posibles orígenes de las estructuras, así como las posibles limitaciones de interpretación de cada uno de ellos.

A continuación se analizan en detalle algunas de las EAE que aparecen con mayor frecuencia en yacimientos

arqueológicos con daños asimilables a eventos sísmicos. Los diferentes EAE considerados se han distribuido en una serie de categorías:

- Deformaciones en pavimentos (fracturas, pliegues, pop-up, impactos).**
- Deformaciones en muros y contrafuertes.**
- Caída orientada de columnas.**
- Efectos individuales en bloques de sillería.**

a) Deformaciones en pavimentos (fracturas, pliegues, pop-up, impactos)

Los pavimentos son estructuras muy susceptibles a deformarse frente a las ondas sísmicas (Altunel, 1998), y podemos distinguir tres tipos de pavimentos que presentan diferencias en cuanto a su comportamiento frente a la deformación:

- Pavimentos de argamasa (1). Pavimentos construidos con argamasa o mortero.
- Pavimentos enlosados. Pavimentos formados por losas de diferente tamaño. Dentro de este tipo de pavimentos podemos establecer una subdivisión en función de la forma y distribución de las losas: irregular (2) y regular (3).

Los dos primeros tipos, pavimentos de argamasa (1) y enlosados irregulares (2), se comportan de forma isotrópica frente a la deformación, es decir, se puede considerar que no existen anisotropías previas que pueden producir rotaciones en el tensor de deformación. En cambio en los enlosados regulares (3), por ejemplo con dos orientaciones principales a 90° , definidas por las losas, confieren al pavimento enlosado un comportamiento anisótropo frente a la deformación (Figura 7.6). También es necesario resaltar que estructuras previas (i.e. cimentaciones, drenajes, alcantarillados), pueden actuar como anisotropías que pueden llegar a condicionar la orientación del tensor de deformación.

No obstante, independientemente del comportamiento de cada uno de los pavimentos frente a la deformación, el análisis de la deformación presente en estas estructuras se realiza de forma idéntica sin tener en cuenta el tipo de pavimento analizado, estas consideraciones se realizan en el análisis conjunto de los datos. Por ello y para simplificar el texto se ha realizado una clasificación de estos efectos en función del tipo de deformación presente y no del tipo de pavimento:

a1) Pavimentos plegados. Enlosados y pavimentos de argamasa plegados.

a2) Estructuras de tipo "pop up".

a3) Fracturas conjugadas en losas.

a4) Impactos entre losas.

a5) Marcas de impacto de bloques.

a1) Pavimentos plegados.

Características de los datos: líneas (L1), orientación única, dato único.

Las estructuras plegadas son las deformaciones que más comúnmente aparecen en los pavimentos. La forma de analizar los pliegues es la misma para los tres tipos de pavimentos considerados (argamasa y enlosados irregulares y regulares).

Podemos considerar que la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) es perpendicular a la orientación del eje del pliegue. Por lo tanto si obtenemos la orientación del eje (L1, ver Figura 7.3), obtenemos automáticamente la orientación de ey para esa estructura (Figura 7.6).

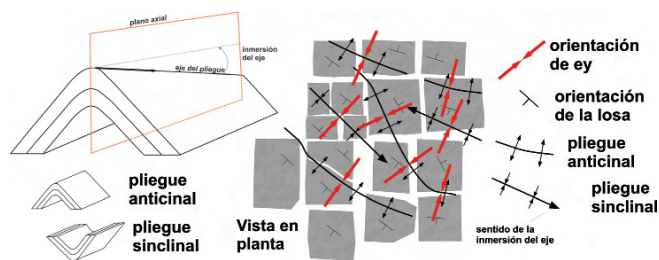


Figura 7.6. Determinación de la dirección de ey a partir de pavimentos plegados. En este caso analizamos la deformación de un enlosado regular, definiendo las orientaciones de los ejes de los pliegues. La orientación de ey es perpendicular a la traza de los ejes. Nótese la influencia de la anisotropía inducida por la regularidad de las losas del pavimento, produciendo cierta dispersión en las orientaciones de los ejes de los pliegues.

El eje del pliegue se puede obtener bien midiéndolo directamente (L1, ver Figura 7.3), o bien midiendo la orientación (dirección y buzamiento) de los planos que definen los flancos del pliegue.

En el caso medir los planos que definen los flancos de los pliegues en los enlosados hay que tener en cuenta que los flancos están formados por las losas que se comportan de forma rígida frente a la deformación.

Este hecho va a suponer que (1) la traza de los pliegues no es continua, ya que queda supeditada a la posición y tamaño relativo de las losas; y (2) que las inmersiones de los ejes pueden aparecer en sentidos opuestos (Figura 7.6). Estas características también pueden observarse en los plegamientos que afectan a otros tipos de estructuras arquitectónicas como bordillos y escalones (Altunel, 1998).

a.2) Estructuras de tipo pop-up.

Características de los datos: líneas (L1) sin superposición de losas, líneas (L2 ó L3 con superposición de losas, orientación única, dato único).

En los enlosados también se pueden producir estructuras llamadas *pop-up*. Estas estructuras están asociadas al acortamiento sufrido en estas estructuras por los movimientos horizontales del suelo, movimientos que inducen una falta de espacio entre losas (Figura 7.7), y que normalmente se resuelven con pliegues.

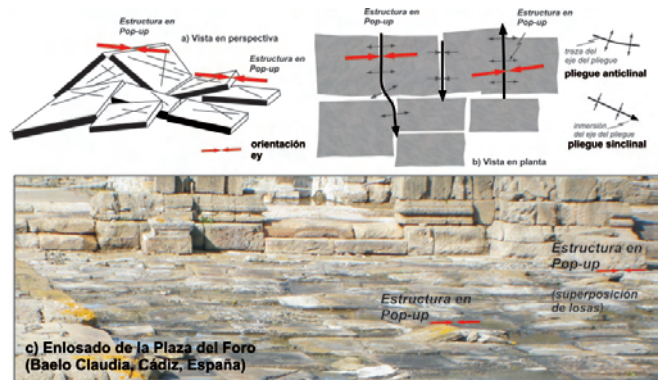


Figura 7.7. La determinación de la dirección de máximo acortamiento horizontal en los *pop-up* en enlosados, se define como la dirección perpendicular a la línea de contacto o de superposición de las losas (L2, ver figura 7.2b).

No obstante, cuando ese acortamiento aumenta (i.e. falta de espacio entre losas) esa deformación ya no se puede resolver únicamente con pliegues, y el comportamiento rígido de las losas individuales, induce el desplazamiento de algunas de ellas, de forma que llegan a superponerse, montándose unas sobre otras. Estas estructuras pueden dar información sobre la orientación de máximo acortamiento horizontal (e_y), ya que esta orientación de ese “cabalgamiento” es paralela al vector de desplazamiento (L2, ver figura 7.2b) de la losa que se superpone. Hay que tener en cuenta que estas estructuras proporcionan mayor información cuando se produce la superposición de una losa sobre otra, ya que en este momento aumentan los grados de libertad de movimiento de la losa al no estar supeditado a las orientaciones de contacto entre losas (Figura 7.8).

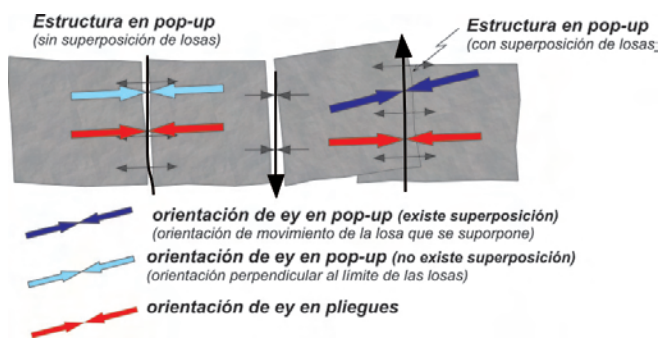


Figura 7.8. Para determinar la orientación de máximo acortamiento horizontal (e_y) en estructuras de tipo *pop-up* es importante definir si se ha producido superposición de una losa sobre otra. En el caso de superposición el desplazamiento de la losa no estará supeditado a los contactos entre losas contiguas, sino que se desplazará libremente, definiendo la orientación de e_y sin los condicionamientos de orientaciones preferentes que implican los límites de las losas. En el caso de que no se produzca la superposición de la losa, la orientación de e_y será perpendicular al contacto entre losas y por tanto estará condicionado por las direcciones preferentes del contacto entre las mismas (ver punto: *Anisotropías inducidas por las estructuras arqueológicas*).



En algunos casos se puede considerar el desplazamiento de la losa superior y analizarlo como un vector (L3, ver figura 7.2c), es decir considerar la magnitud (en cm) del desplazamiento de la losa que se desplaza. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que en algunas ocasiones ese desplazamiento individual puede estar definiendo el desplazamiento acumulado de varias losas.

Por ello es importante recordar que el vector de desplazamiento de la losa que se superpone se puede considerar paralelo a la dirección de máximo acortamiento (e_y); y en el caso de que no se produzca la superposición de las losas, la orientación de e_y será perpendicular al contacto de las dos losas, obteniéndose en este caso resultados muy similares a los obtenidos del análisis de los pliegues que casi siempre aparecen asociados a estas estructuras.

a.3) Fracturas conjugadas en losas.

Características de los datos: líneas (L1), orientación única, dato complementario.

En muchos casos, el comportamiento rígido de los pavimentos enlosados frente a la deformación produce la formación de fracturas y diaclasados en las losas. Estas fracturas pueden aparecer en sistemas conjugados que pueden dar información sobre la orientación de máximo acortamiento horizontal (e_y) (Boer y Hale, 2000; Monaco y Tortorici, 2004). El tratamiento de estos datos se realiza de igual forma que se analizan los sistemas de diaclasado en análisis estructural geológico. No obstante hay que tener en cuenta que muchas veces estas fracturas conjugadas reflejan las anisotropías previas de la roca de la que se ha extraído la losa, y por tanto pueden ser de poca utilidad en un análisis de deformación de estas características.



Figura 7.9. Ejemplos de fracturas conjugadas en losas de los pavimentos en el yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz, España): en el pavimento del *Decumanus Maximus* (izquierda) y en el enlosado de la Plaza del Foro (derecha). Este tipo de efectos deben ser considerados de forma global en el yacimiento, es decir deben analizarse gran cantidad de losas para considerarlos estadísticamente representativos en el análisis de la deformación de un yacimiento arqueológico (nota: la escala naranja que aparece en estas y en otra fotos es de 10X10 cm).

a.4) Impactos entre losas (enlosados).

Características de los datos: líneas (L2), orientación única, dato único.

Dentro de las fracturas que se pueden producirse en las losas cabe destacar los denominados impactos entre losas.

Este tipo de daño engloba las rupturas triangulares de la esquinas de las losas de un pavimento (Figura 7.10). Estas estructuras de tamaño centimétrico (excepcionalmente decimétrico) se forman por la colisión entre losas de un pavimento por el movimiento horizontal inducido por las ondas sísmicas. La dirección de máximo acortamiento

horizontal es perpendicular a la base de la pieza triangular fragmentada (para su correcta interpretación es preferible que se conserve *in situ* la pieza triangular fragmentada).

En este tipo de daños podemos definir la direccionalidad de los mismos, ya que podemos establecer el sentido del movimiento (L2, acimut y sentido). Este sentido se define desde la losa fracturada hacia la losa sin daños (figura 7.10).

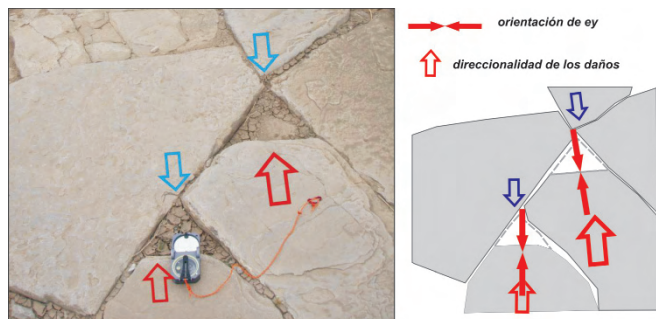


Figura 7.10. Ejemplo de fracturas entre losas en el pavimento del *Decumanus Maximus* del yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz, España). En el esquema se define la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey), perpendicular a la base de los fragmentos triangulares, y la direccionalidad de los daños queda definida por el acimut desde la losa fracturada hacia la losa sin dañar.

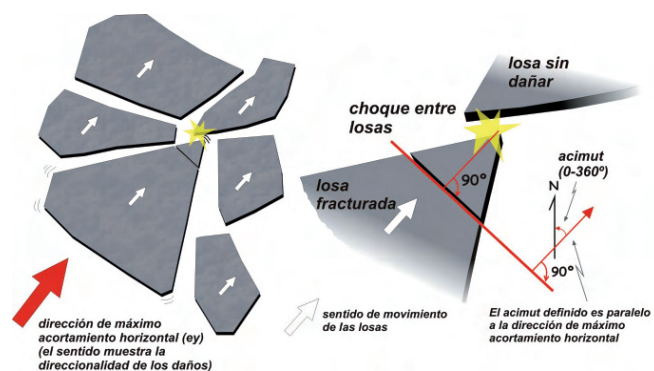


Figura 7.11. Determinación de la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) en roturas en esquinas de losas. Este tipo de estructuras aparecen como resultado del choque horizontal entre losas de un pavimento, produciéndose fragmentos triangulares. Este acimut define la orientación de ey, y el sentido define la direccionalidad de los daños en esta estructura (L2) (desde la losa fracturada a la losa sin daños).

En este caso podemos considerar que la línea (L2, Figura 7.11) perpendicular a la base del triángulo fracturado en la losa dañada, es paralela a la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) (Figura 7.10).

a.5) Marcas de impacto de bloques.

Características de los datos: líneas (L1), rango de orientaciones, dato complementario.

Las marcas de impacto son estructuras formadas como resultado de la caída de elementos arquitectónicos sobre pavimentos enlosados. Estas marcas pueden indicar el colapso de las partes superiores de los edificios debidas a movimientos horizontales asimilables a un origen sísmico. Sin embargo, estos colapsos no tienen porque estar producidos por actividad sísmica, por lo que

este tipo de efectos se deben considerar en el análisis conjunto como un dato de apoyo al resto de los análisis.

La forma de analizar este EAE es similar a la descrita para los muros basculados. Se debe identificar la orientación de la estructura de la que provengan los elementos arquitectónicos caídos, y una vez identificada, se consideran dos intervalos de acimuts de 180° limitados por la orientación de la estructura. La orientación de la máxima deformación está contenida en el intervalo en el que se sitúen las marcas de impacto (Figura 7.12) (L2, rango de orientaciones).

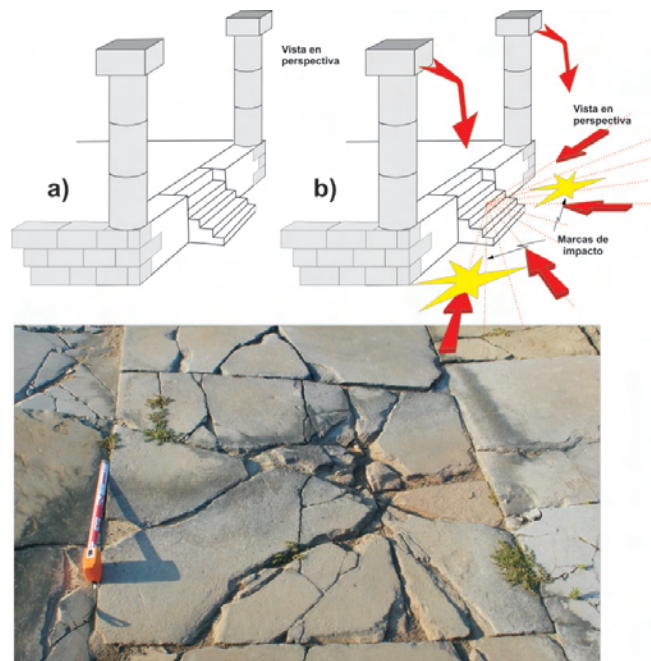


Figura 7.12. Esquema en el que se representa la posición relativa de los impactos en losas. La interpretación de la orientación de ey es similar a la que se aplica en los muros basculados (ver figura 7.14).

b) Deformaciones en muros.

En muchas ocasiones, en yacimientos arqueológicos es común observar deformaciones de diferentes tipos que afectan a las estructuras murarias del yacimiento. Este tipo de deformaciones pueden deberse a diferentes procesos. Con este tipo de análisis se pretende cuantificar esas deformaciones de forma que podamos establecer si el proceso presenta homogeneidad para todo el yacimiento (posible origen sísmico), o si bien las deformaciones no presentan directrices claras y podemos considerarlas heterogéneas o caóticas, y por lo tanto resultado de otros procesos genéticos.

Korjenkov y Kaiser (2003), consideran que la presencia de pliegues, rotaciones y/o fracturas en los muros está condicionada por la orientación del muro con respecto a la componente horizontal del movimiento del terreno inducido sísmicamente. En este trabajo pensamos que la presencia de unas u otras estructuras está condicionada por la forma de acomodar la deformación de los muros en función de sus características constructivas: cimentación, tamaño y tipo de elementos constituyentes

(e.g. sillería, ladrillos), presencia de mortero entre elementos, tipos de anclajes, etc. Es evidente que la orientación del muro es un factor determinante a la hora de definir el tipo de estructuras que pueden aparecer, pero son las características antes mencionadas las que definen finalmente como se acomoda la deformación en este tipo de estructuras.

Para definir el análisis de las deformaciones en este tipo de estructuras se ha seguido la clasificación de EAE propuesta por Rodríguez Pascua et al. (2009, 2011):

b1) Muros basculados.

b2) Muros plegados.

b3) Muros desplazados.

b4) Muros fracturados.

- **Fracturas penetrativas en bloques de sillería.**

- **Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo.**

b5) Muros colapsados.

b6) Contrafuertes plegados y desplazados.

b1) Muros basculados.

Características de los datos: líneas (L2), rango de orientaciones, dato complementario.

En los yacimientos arqueológicos es muy común observar muros inclinados o basculados. Estas inclinaciones pueden producirse por diferentes procesos, entre ellos los terremotos. En este caso, los muros se inclinan como consecuencia de los movimientos horizontales del suelo inducidos por las ondas sísmicas (Nikonov, 1988; Stiros, 1996).



Figura 7.13. Ejemplo de muros basculados en la muralla de la ciudad de Baelo Claudia (Cádiz, España).

El acimut de la dirección de máximo acortamiento horizontal puede formar un ángulo de hasta 90° (de 0° a 90° , rango de orientaciones) con la orientación del muro. Podemos considerar que el acimut de la inclinación del muro (L2) es de sentido contrario al acimut de la dirección de máximo acortamiento horizontal (siendo la inclinación del muro el ángulo que forma con respecto a la vertical) (Figuras 7.13 y 7.14).

No obstante para asegurarnos de que se ha producido un movimiento en la horizontal asimilable a causas sísmicas, se deben observar movimientos diferenciales

entre los bloques o ladrillos que conforman las diferentes filas que forman el muro (Figuras 7.15 y 7.14 perfil).

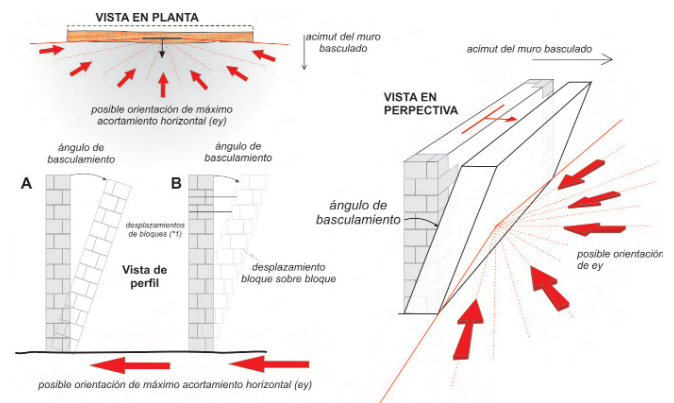


Figura 7.14. Esquema de la interpretación de los basculamientos producidos por la llegada de ondas sísmicas en estructuras murarias. La orientación de ey está incluida en el intervalo de orientaciones definido por la orientación del muro, en el sentido contrario al acimut del basculamiento del mismo.



Figura 7.15. Muros basculados de la zona norte del yacimiento de Baelo Claudia. Se observa un aspecto general del muro (a), y en la foto de detalle (B), se puede ver como se produce el desplazamiento bloque sobre bloque, sugiriendo el más que probable origen sísmico de las deformaciones.

La determinación de la orientación de ey (L2, rango de orientaciones), se basa en los posibles intervalos definidos por la orientación del muro. No obstante esta estructura también proporciona datos de direccionalidad de los daños: en la figura 7.16a, se representa un muro orientado E-O y basculado hacia el sur. En principio, los dos posibles intervalos de orientaciones quedan definidos por la orientación del muro (E-O): intervalo 1 desde 270° hasta 090° , y el intervalo 2 desde 90° a 270° . El intervalo más probable es el intervalo 2 ya que el acimut del basculamiento del muro es de sentido opuesto a la dirección de ey, el muro está basculado hacia el sur por lo tanto el acimut de ey es hacia el norte.

Estos datos son de carácter complementario, es decir durante el análisis individual de estos daños, podemos considerar varias orientaciones de muros para acortar mejor la orientación de ey (Figura 7.16b), aunque siempre es necesario considerar muros de similares características constructivas y que estén situados relativamente cerca.

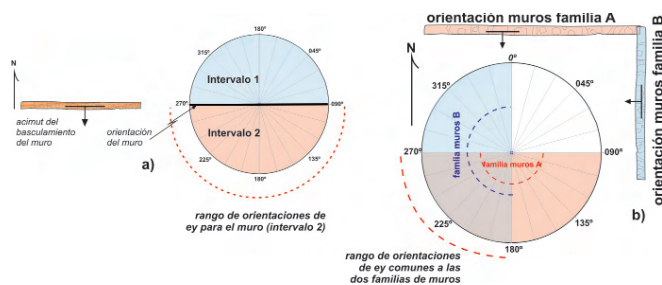


Figura 7.16. Ejemplo de determinación de la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) y de la direccionalidad de los daños en un yacimiento a partir de estructura murarias. a) para un único muro, b) para dos muros pertenecientes a la misma estructura.

También hay que tener en cuenta que, en muchos casos, la inclinación del muro no es constante, aumenta desde los extremos hasta el centro del muro (efecto ancla, ver muros plegados). Este dato no se utiliza en el cálculo de la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey), ya que dependerá mucho del sustrato sobre el que se asienta, la cimentación e incluso su situación dentro del yacimiento; aunque es adecuado considerarlo en el proceso de toma de datos y representarlo en la cartografía resultante.

b2) Muros plegados.

Es bastante común encontrar muros plegados en los yacimientos afectados por actividad sísmica. Estos plegamientos están relacionados con el comportamiento de los muros frente a la deformación inducida por los movimientos sísmicos. Podemos establecer dos tipos de pliegues en muros en función de la inmersión del eje (i):

Pliegues con inmersión de eje menor de 45° ($i < 45^\circ$).

Pliegues con inmersión de eje mayor de 45° ($i > 45^\circ$).

a) Pliegues con inmersión de eje menor de 45° ($i < 45^\circ$).

Características de los datos: líneas (L1 ó L2), orientación única, dato único.



Figura 7.17. Ejemplo de un muro plegado en el yacimiento romano de Baelo Claudia (Cádiz, España) con inmersión del eje menor de 45° . La falta de libertad del muro en su movimiento se resuelve con el plegamiento de la estructura muraria.

Estos pliegues suelen estar relacionados por una falta de espacio al producirse el movimiento de los muros en su plano, y normalmente se producen en muros de ladrillo o de sillarejo (pequeños bloques irregulares de sillería). Cuando los muros tienen limitado uno de sus extremos por

estructuras que se comportan de forma más rígida frente a la deformación (e.g. muros de sillería), se reduce de forma importante el grado de libertad en las oscilaciones (Figura 7.17). Ese efecto produce una falta de espacio que induce el plegamiento del muro para acomodar el acortamiento que se está produciendo.

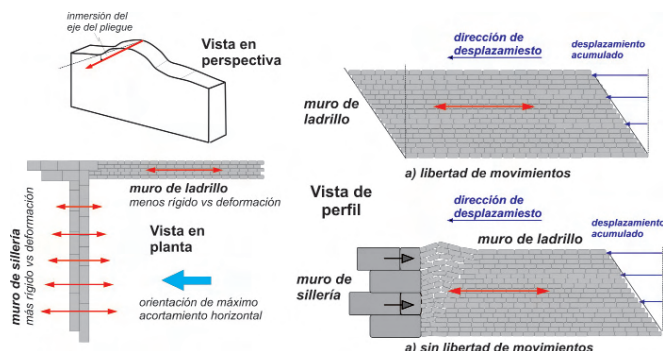


Figura 7.18. Plegamientos producidos por diferente comportamiento de los muros frente a la deformación, debido a sus características constructivas. La presencia de estructuras más rígidas frente a la deformación (e.g. muros de sillería) (b) que los muros de ladrillo (a) puede reducir el grado de libertad de las oscilaciones de un muro en uno de sus extremos, e inducir el plegamiento del muro para acomodar esa falta de espacio.

Una característica importante de este tipo de plegamiento es que la deformación suele disminuir hacia la base del muro porque es en esta zona donde tiene menos grados de libertad, ya que está confinado en vertical por el peso del mismo muro.

En el caso de este EAE, podemos considerar que la dirección de máximo acortamiento horizontal se puede considerar perpendicular al eje del pliegue definido en el muro, de forma análoga a la definida en los pliegues en pavimentos (ver figura 7.6).

b) Pliegues con inmersión de eje mayor de 45° ($i > 45^\circ$)

Características de los datos: líneas (L2), rango de orientaciones, dato complementario.



Figura 7.19. Ejemplos de muros plegados (inmersión de los ejes mayor de 45°) en el yacimiento de Baelo Claudia (Cádiz, España). a) Muralla este de la ciudad, en las proximidades del único bastión que permanece en pie (foto realizada desde el sur). b) Muros de la zona de tiendas en la plaza del foro (foto realizada desde el norte). En ambos casos se observa que además de presentar un plegamiento evidente, estas estructuras murarias están basculadas hacia el oeste.

Estos pliegues están relacionados con el anclaje de los muros afectados en otros muros o estructuras. Este efecto (efecto ancla) está inducido por un efecto diferencial de las vibraciones horizontales en los muros: las zonas más alejadas de la intersección de los muros o anclajes, sufren mayores vibraciones (Korjenkov y Kaiser, 2003) (Figura 7.20) y, por tanto mayores desplazamientos.

Estas vibraciones producen un movimiento diferencial entre los bloques o ladrillos del muro, movimientos que aumentan desde los extremos hacia la parte central del muro (Figura 7.20a). Estas vibraciones producen el desplazamiento entre los bloques que forman el muro. A mayor vibración mayor desplazamientos entre bloques (Figura 7.20c). El movimiento acumulado entre los bloques define el desplazamiento en esa parte del muro.

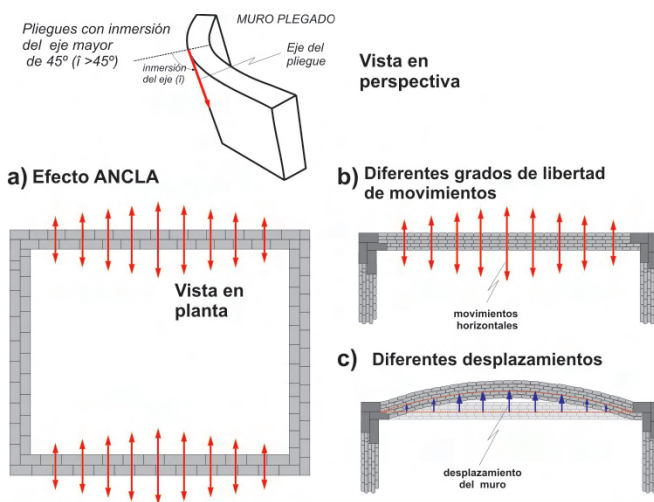


Figura 7.20. Efecto de anclaje de los muros (efecto ancla). Este tipo de plegamientos se suelen dar cuando las estructuras murarias tienen algún tipo de refuerzo o anclaje en las intersecciones con otras estructuras. Estos anclajes limitan los grados de libertad en los extremos del muro, produciéndose menor desplazamiento en los extremos del muro. En el caso de muros de sillería regular (a), mucho más rígidos frente a la deformación, las deformaciones de este tipo no suelen ser permanentes. En cambio en los muros de ladrillo o de pequeños bloques de sillería irregulares (b y c), las deformaciones suelen ser de carácter permanente.

El efecto ancla debe considerarse a la hora de cuantificar la deformación a partir de los ángulos de inclinación de los muros (ver muros basculados); ya que el valor de este ángulo va a depender de una serie de factores (Figura 7.21):

- la longitud del muro, considerando la longitud del muro la distancia entre los extremos anclados en otra estructura o muro. Ya que, considerando características similares en materiales y técnicas constructivas de los muros, frente a las mismas oscilaciones, los muros de mayor longitud presentarán mayores desplazamientos en la parte central y, por tanto, mayor ángulo de inclinación.
- la posición del muro en la se mida este ángulo, ya que la inclinación será mayor en las zonas centrales que en los extremos del muro.

En la figura 7.21 podemos observar dos secciones del mismo muro. La sección I-I', situada en un extremo del muro; y la sección II-II', situada en la parte central del mismo (Figura 7.21c). En ambas secciones se produce el

movimiento diferencial de los ladrillos, pero en la sección I-I' ese movimiento es menor porque el grado de libertad de movimiento está limitado por el anclaje del muro a otras estructuras. En cambio, en la sección II-II', el grado de libertad de movimiento es mucho mayor, y por lo tanto se producen mayores desplazamientos.

Estos desplazamientos diferenciales a lo largo y alto del muro son los que provocan finalmente el plegamiento de los mismos. Hay que tener en cuenta que esa diferencia de movimientos se resuelve normalmente con el desplazamiento de los ladrillos o de los sillares unos con respecto a otros, esos movimientos diferenciales en la vertical suelen inducir el basculamiento del muro, por lo que este tipo de plegamientos está asociado normalmente a muros basculados. Otros efectos de este movimiento diferencial son (Figura 7.21b y c):

- la inclinación de los muros aumenta desde los extremos hasta la parte central de los mismos.
- La rotación de los bloques es mayor en los extremos y mucho menor en el centro, rotaciones que tienen que acomodar las diferencias de desplazamientos que se producen a lo largo del muro.

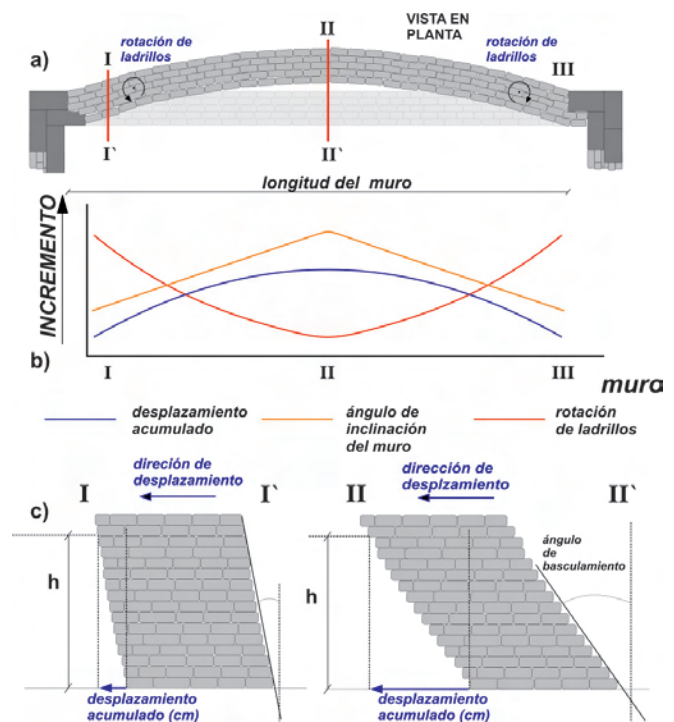


Figura 7.21. Efectos de la deformación perpendicular al plano de un muro de ladrillo o de pequeños sillares irregulares anclado en sus extremos a estructuras más rígidas. a) Vista en planta de las deformaciones presentes (e.g. desplazamientos, rotaciones). b) Gráfico en el que se representan en función de la posición con respecto a los extremos anclados del muro las intensidades del desplazamiento del muro, el ángulo de basculamiento y la rotación de ladrillos o sillares. c) Vista de perfil de las zonas externas del muro (posición I-I', zona anclada), y de la zona central (II-II'), zona con mayor grado de libertad de movimientos.

Debido a esta relación entre este tipo de plegamientos y los muros basculados, se puede considerar la misma metodología de análisis de la deformación expuesta en el caso de los muros basculados (ver figura

7.16). No obstante existe una caso, si bien poco frecuente, en el que podemos obtener una orientación única para este tipo de estructuras, y es el caso en el que la zona más desplazada del muro no se sitúe en la parte central del muro, es decir, que presente una asimetría con respecto a los extremos anclados del muro. En estos casos, podemos intentar definir la orientación del acimut de movimiento que define la asimetría del plegamiento y esa orientación sería paralela a la dirección de máximo acortamiento horizontal (ϵ_y).



Figura 7.22. Acueducto desplazado en el exterior de la muralla este de la ciudad romana de *Baelo Claudia* (Cádiz, España). Esta estructura de distribución de agua está desplazada en uno de sus extremos por una serie de pequeñas fracturas en dirección de carácter fundamentalmente diestro. Al fondo se puede ver una parte del acueducto que ha colapsado. La interpretación de esta estructura está condicionada al análisis detallado del subsuelo, ya que estos desplazamientos pueden estar asociados a movimientos permanentes del terreno que pueden tener su origen en diferentes procesos (e.g. movimientos sísmicos, deslizamientos).

b3) Muros desplazados.

Características de los datos: líneas (L1), orientación única, dato único.

Entendemos como muros desplazados a aquellos que han sufrido un movimiento diferencial de sus partes como consecuencia de la deformación permanente del terreno. Este tipo de estructuras son más comunes en muros de ladrillos o de fábrica de sillares pequeños e irregulares, ya que los muros de sillería con grandes bloques regulares se comportan de forma más rígida frente a las oscilaciones del terreno, fundamentalmente debido al tamaño de los bloques que los forman.

En prácticamente la totalidad de las estructuras murarias, se puede producir la rotación de los bloques próximos a los anclajes, como resultado de la acomodación de

los desplazamientos por la oscilación del muro. Además en algunos casos, cuando las oscilaciones del terreno son muy fuertes, el muro no puede acomodar esas deformaciones con la rotura o el desplazamiento del muro (Figura 7.22), y se produce el colapso de la estructura.

Para establecer un análisis de la deformación de estos desplazamientos se deben aplicar las metodologías clásicas de análisis estructural geológico aplicable a este tipo de estructuras falladas.

b4) Muros fracturados.

Características de los datos: líneas (L1), orientación única, dato único.

Este es uno de los EAE que mayores posibilidades de interpretación genética tienen, y que por tanto, presentan mayor incertidumbre a la hora de asignar los daños a fenómenos sísmicos. En este tipo de estructuras, que en principio presentan poco o ningún desplazamiento, deben ser analizadas partiendo del patrón de fracturación observable en la estructura muraria afectada.

En muchas ocasiones este tipo de estructuras se producen por deformaciones permanentes del terreno (Figura 7.23), y en la mayoría de las veces es relativamente complejo establecer su origen genético en yacimientos arqueológicos. Por ello, en el caso de observar patrones de fracturación inducidos por deformación permanente del terreno, es necesario analizar esas deformaciones del terreno con metodologías clásicas de análisis estructural geológico para poder obtener información sobre el tensor de deformación.

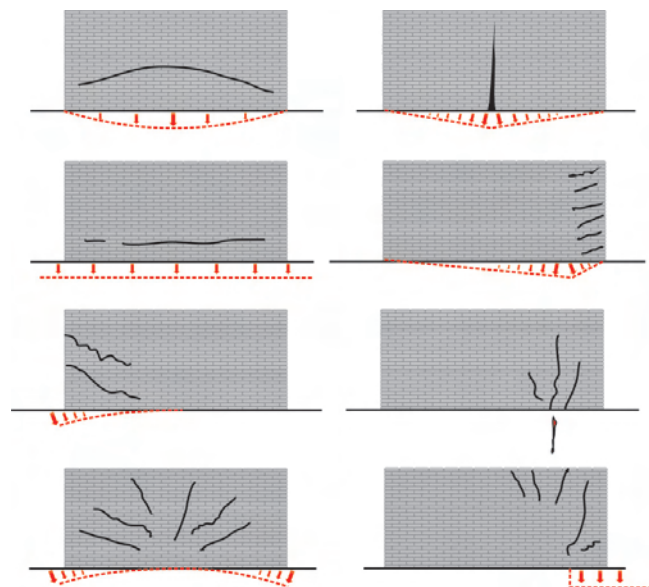


Figura 7.23. Diferentes patrones de fracturación en un muro por deformación permanente del terreno. La distribución y simetría de las fracturas se puede asociar a una geometría en la deformación del terreno. Estas deformaciones permanentes en el terreno pueden deberse a diferentes procesos, entre ellos la sismicidad. No obstante, es bastante complejo poder establecer el origen de las deformaciones en el sustrato sin realizar un análisis conjunto con otro tipo de deformaciones. Como la respuesta de los muros depende directamente de la deformación del terreno, lo más adecuado es analizar esta última y no la deformación presente en el muro (modificado de Arcos y Portu, 2003).

Existe otro tipo de fracturas en estructuras murarias que se producen como respuesta frágil a las deformaciones elásticas del sustrato, pero en este caso sin necesidad de que se produzcan deformaciones permanentes del mismo. Este tipo de fracturación correspondería a los EAE enmarcados dentro de las deformaciones instantáneas a la vibración: fracturas penetrativas y fracturas conjugadas (ver figura 6.1).

Las fracturas más comunes asociadas a terremotos en estructuras murarias, son las fracturas conjugadas que normalmente dibujan un esquema muy característico en forma de cruz o aspa (Figura 7.24). Este tipo de estructuras se produce por movimientos de cizalla cíclicos paralelos al plano de muro.

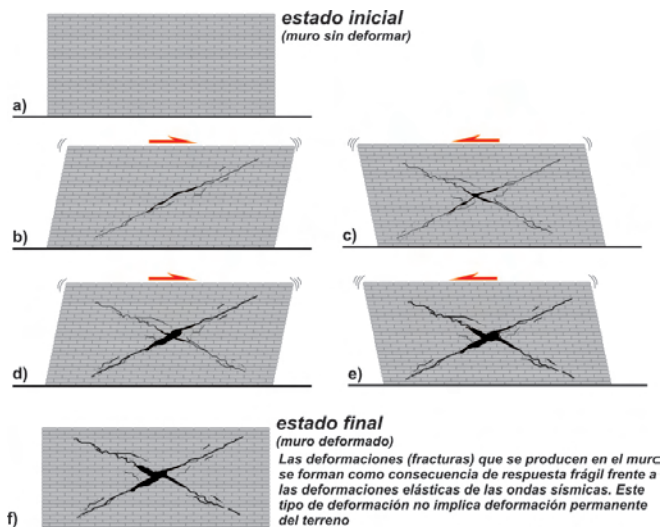


Figura 7.24. Fracturas conjugadas. Fracturación de un muro por movimientos sísmicos de carácter cíclico y paralelos al mismo. Suelen aparecer con mucha frecuencia en muros de ladrillo. Se producen fisuras en cada uno de los ciclos, provocando fracturas conjugadas (en forma de cruz o aspa) que suelen aparecer con un ángulo de 45° . Este tipo de deformaciones son producidas por las ondas sísmicas y no implican la deformación permanente del terreno; son el resultado del comportamiento frágil del muro frente a las deformaciones elásticas inducidas por las ondas sísmicas.

Las fracturas en forma de cruz o aspa (Figura 7.25a), se producen por movimientos de cizalla cíclicos en el plano del muro, este tipo de fracturas conjugadas están inequívocamente asociados a los terremotos. En el caso de existir huecos de ventanas y puertas las fracturas (Figura 7.25b) se suele distribuir en los huecos existentes, definiendo un patrón de fracturación muy característico entre los diferentes huecos.

Existe otro tipo de fracturas de carácter penetrativo que no suelen aparecer conjugadas, las más comunes son las que se producen en las zonas de contacto horizontales con las puertas y ventanas (figura 7.25c), en este caso los movimientos pueden haberse producido paralelos (en el plano del muro) o perpendiculares al mismo. En este tipo de fracturas, y para definir de forma inequívoca la orientación de los movimientos, es conveniente determinar posibles desplazamientos entre los ladrillos o bloques, estos desplazamientos nos definirán el sentido (perpendicular o paralelo al muro) de los movimientos que han causado las fisuras.

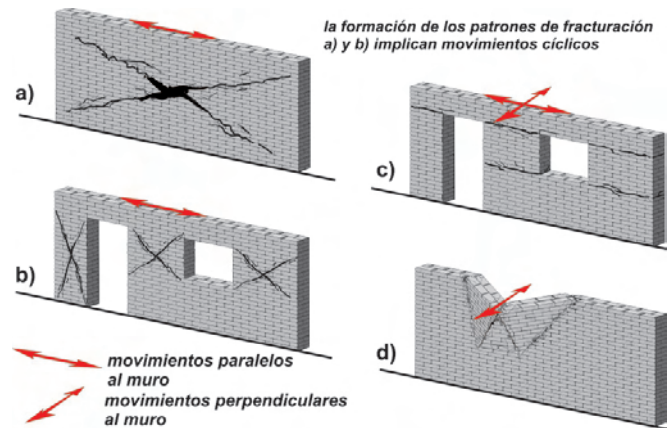


Figura 7.25. Patrones de fracturación de un muro inducidos por cargas horizontales. Los dos primeros (a y b) se forman por movimientos cíclicos paralelos a la traza del muro (fracturas conjugadas) (ver figura 7.24). Los patrones de fracturación del caso (d) se forman por movimientos perpendiculares al muro. En el caso del patrón de fracturación (c) puede estar producido tanto por movimientos perpendiculares como paralelos al muro. No obstante, en terremotos instrumentales este último tipo de fracturación suele indicar un movimiento perpendicular a la estructura muraria.

b5) Muros colapsados.

Características de los datos: líneas (L1), rango de orientaciones, dato complementario.



Figura 7.26. Estructuras murarias colapsadas en el yacimiento de Baelo Claudia (Cádiz, España). a) Bloque de grandes dimensiones en el teatro de la ciudad. b) Horizonte de destrucción asociado a estructuras murarias colapsadas.

Cuando las deformaciones son lo suficientemente fuertes como para superar la resistencia del muro y/o desestabilizarlos más allá de la recuperación elástica de la estructura, se produce el colapso de la misma (Figura 7.26). Al igual que muchas de las estructuras de deformación observables en muros, el colapso de estructuras murarias pueden tener muchos orígenes, en gran medida relacionados con deformaciones permanentes del terreno, o simplemente con la degradación misma de la estructura por falta de mantenimiento.

Los muros colapsados tienen que ser analizados en el contexto del yacimiento, en relación con cualquier otro tipo de estructuras de deformación definidas en las estructuras murarias (e.g. muros basculados, fracturados, desplazados). Independientemente de todo esto, y para incluir este tipo de efecto en el análisis de la deformación debemos analizarlos de igual forma que analizaríamos los muros basculados (ver figura 7.16) y las marcas de impactos en pavimentos enlosados (ver figura 7.12).

b6) Contrafuertes plegados y desplazados.

Características de los datos: líneas (L1), intervalo de orientaciones, dato único.

Este tipo de estructuras siempre están relacionadas con deformaciones permanentes del sustrato. Los contrafuertes están diseñados para reforzar estructuras elevadas o con una carga vertical inducida por techos de gran peso (normalmente bóvedas de ladrillo o sillería). Estas estructuras son muy sensibles a movimientos horizontales perpendiculares a su plano, ya que su diseño no está preparado para este tipo de cargas (Figura 7.27). Este tipo de deformaciones suelen estar relacionados con movimientos del terreno producidos bien por actividad sísmica o bien por deslizamientos del terreno.

El análisis de la deformación presente en estas estructuras es muy similar al aplicado en muros desplazados, aunque en este caso y debido al diseño de este tipo de estructuras podemos considerar la orientación de máximo acortamiento horizontal aproximadamente perpendicular al plano del contrafuerte, aunque siempre con una dispersión de al menos 20°, a ambos lados de la perpendicular del plano del contrafuerte, dispersión máxima aceptable para que la cinemática del movimiento sea coherente con la estructura.

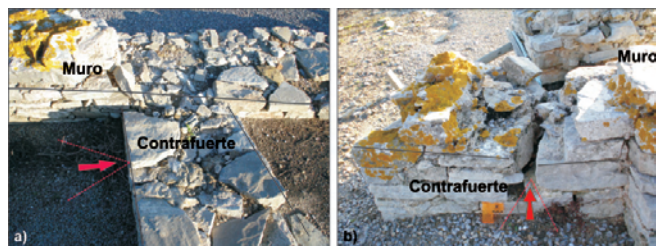


Figura 7.27. Contrafuertes de la cisterna principal de la ciudad romana de Baelo Claudia (Cádiz, España) desplazados (a) y plegados (b). Este tipo de estructuras están relacionadas con deformaciones permanentes del terreno. En este caso se puede establecer la direccionalidad de los daños ya que la cisterna es una estructura subterránea y en principio consideramos que han sido los contrafuertes los que han sufrido el desplazamiento en consonancia con el desplazamiento del terreno.

c) Caída orientada de columnas.

Características de los datos: líneas (L2), orientación única, dato único.

En los análisis arqueosísmológicos es muy común considerar la caída orientada de columnas como un indicio de actividad sísmica en la zona (Nur y Ron, 1996; Stiros, 1996). (Figura 7.28).

Numerosos autores consideran que la orientación de la caída de las columnas indica la dirección de llegada de la onda sísmica, es decir que el sentido de caída de la columna es opuesto al de llegada de la onda sísmica (Figura 7.29) (Nur y Ron, 1996). Otros autores puntualizan esta afirmación, ya que consideran que pueden afectar de forma importante otros factores de tipo constructivo (e.g. calidad del material, imperfecciones); de carácter antró-

pico (e.g. destrucción deliberada) (Ambraseys, 2006; Marco, 2008); o de carácter topográfico (e.g. pendientes, escarpes) (Silva et al., 2009).



Figura 7.28. Orientación de caída de la columna. Podemos considerar esta orientación paralela a la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey). La direccionalidad del daño queda definida sentido de caída de la columna. Templo de Zeus (Atenas, Grecia)(fotografía cedida por Virginia Ruiz Villanueva).

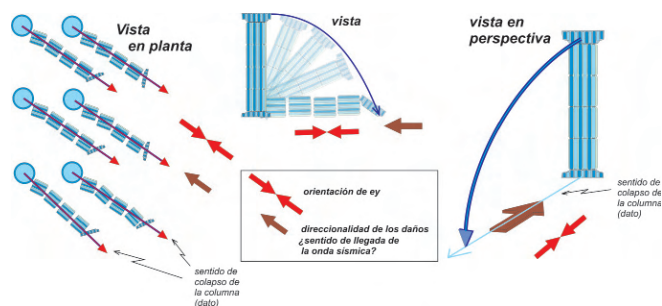


Figura 7.29. Análisis de la deformación en estructuras de caídas orientadas de columnas. La dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) es paralela al sentido de caída de las columnas. La direccionalidad de los daños está definida por el sentido de caída de la columna.

Algunos autores (Hinzen, 2009; Hinzen et al., 2009), mediante modelizaciones de movimientos cíclicos de este tipo de estructuras, indican que pequeñas variaciones en la energía de las vibraciones, e incluso su duración, pueden inducir diferentes orientaciones de caídas de las columnas.

Por todo ello, y para evitar posibles errores en la interpretación de este tipo de EAE debido a efectos de tipo local, el análisis debe estar condicionado al número de columnas afectadas y a la extensión de la zona en la que aparecen. Debemos analizar un número importante de columnas afectadas, y cuanto mayor sea la extensión de la zona en la que aparezcan estas estructuras, menor importancia tendrán los efectos locales.

d) Efectos individuales en bloques de sillería.

Otro tipo de efectos que pueden ser de gran importancia a la hora de establecer la deformación sufrida en un yacimiento arqueológico son los efectos visibles en bloques individuales de sillería. Este tipo de efectos pueden clasificarse en función de si los bloques han sufrido fracturación o desplazamiento:

d1) Fracturación.

- Roturas en esquinas de bloques.

d2) Desplazamiento.

- Deformaciones en arcos y dinteles en puertas y ventanas.

- Giros en bloques de sillería y columnas.

- Bloques de sillares desplazados.

d1) Fracturación. Roturas en esquinas de bloques.

Características de los datos: planos (P) ó líneas (L2), orientación única, dato único.

Las roturas en esquinas de bloques individuales han sido interpretadas por numerosos autores como deformaciones provocadas por el movimiento diferencial de los bloques en zonas de esquinas o en columnas integradas en los muros producidos por movimientos sísmicos (Figura 7.30) (e.g. Urbina y Camacho, 1913; Stiros, 1996; Marco, 2008). Este tipo de roturas afectan únicamente a un bloque, si este tipo de fracturación afecta a más bloques y con continuidad a lo largo de una estructura, se debe analizar como muros fracturados (ver figuras 7.23 y 7.25).



Figura 7.30. Estructura de rotura en la esquina de un bloque situado en el *macellum* (mercado) del yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz, España).

El movimiento vertical provoca que los bloques de las esquinas de los muros se muevan con un movimiento de oscilación subparalelo a la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) (Figura 7.31). Este tipo de estructuras se suele dar en zonas de esquinas en las que aumen-

tan los grados de libertad de movimiento de los bloques frente a movimientos sísmicos.

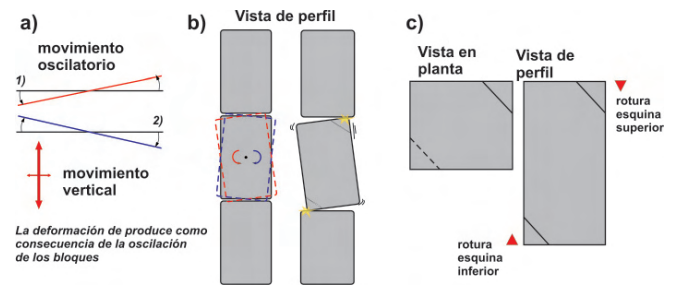


Figura 7.31. Interpretación de la dinámica de las roturas que se pueden observar en este tipo de estructuras. Los movimientos de oscilación inducidos por las ondas sísmicas (a) en zonas con mayor grado de libertad de movimientos (e.g. esquinas de muro, columnas integradas en estructuras murarias), produce la rotura de las esquinas en los bloques. Este tipo de estructuras se dan únicamente en estructuras de sillería.

Este movimiento oscilatorio provoca la rotura de las esquinas de los bloques de sillería (Figura 7.32a). Estas roturas suelen estar definidas por planos con buzamientos de 45°.

El acimut de estos planos (sentido de buzamiento) es paralelo a la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey). La rotura se produce siempre en bordes opuestos del bloque: esquina superior derecha y esquina inferior izquierda (e.g. Figura 7.32b). Este hecho es muy importante a la hora de tomar los datos en campo, ya que es necesario definir la zona (superior o inferior) del bloque en el que sitúa la fractura, de forma que se pueda analizar los datos correctamente (Figura 7.31c).

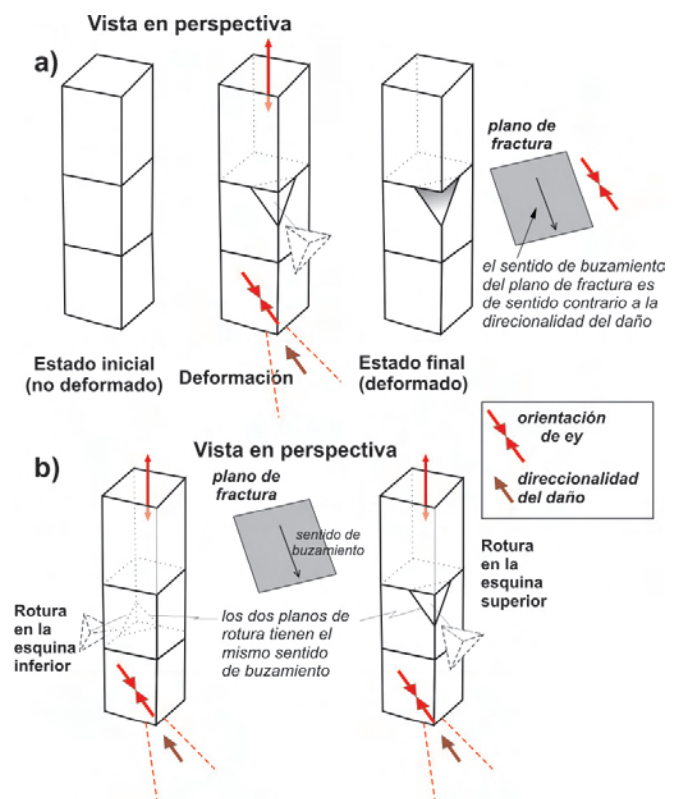


Figura 7.32. Interpretación de la dinámica de las deformaciones analizables en las roturas de esquinas de bloques. Según esta interpretación podemos obtener datos sobre la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) y sobre la direccionalidad del daño sufrido.

d2) Desplazamiento

Giros en bloques de sillería y columnas.

Características de los datos: este tipo de datos requiere una interpretación conjunta con otro tipo de efectos, ya que lo único que se mide es el sentido de giro de la estructura (considerando la parte inferior fija): dextro (sentido agujas del reloj) y siniestro (sentido contrario a las agujas del reloj).

Los giros en bloques de sillerías y columnas son deformaciones instantáneas a la deformación que no implican deformación permanente del sustrato. Son giros diferenciales que se producen entre bloques en estructuras independientes como columnas (Figuras 7.33 y 7.34b) o en estructuras de terminación de torres, techos (Figura 7.34a) o terrazas. Este tipo de deformaciones tienen un claro origen sísmico, ya que no se pueden producir giros sobre el eje de la estructura si no actúan fuerzas horizontales, aunque hay que tener en cuenta que este tipo de deformaciones sólo puede producirse cuando el valor de la aceleración vertical es importante.

Normalmente los giros suelen ir asociados a desplazamientos de los bloques, por lo que en el análisis de este tipo de deformaciones se suele analizar primero los desplazamientos y después los giros.

Si observamos una estructura que presenta giros y desplazamientos, es posible establecer la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) de los giros observa-

dos, utilizando los vectores de desplazamiento deducidos de la misma estructura (Figura 7.35). En primer lugar, definimos la orientación de los vectores de movimiento a partir del análisis de los bloques desplazados (Figura 7.35a). Una vez obtenida esa dirección se representa en el centro de la estructura que ha sufrido rotación y se define el hipotético movimiento que sufriría esa orientación con el movimiento (dextro o siniestro) de la estructura girada (Figura 7.35b). Una vez definido el movimiento, es posible inferir la dirección de máximo acortamiento horizontal para una estructura con esa orientación y cinemática (Figura 7.35c), obteniendo un dato (dependiente de los vectores de desplazamiento) del tipo línea (L1) e intervalo de orientaciones. Este tipo de dato se podría considerar como dato complementario, ya que su inclusión o no en el análisis dependerá de la congruencia de las orientaciones obtenidas mediante otro EAE (desplazamiento asociado de bloques) y del conjunto de orientaciones obtenidas en el yacimiento analizado.

En el caso que solamente se observen giros entre elementos estructurales, y no evidencias de desplazamientos, este tipo de EAE no puede utilizarse ya que comúnmente se encuentra asociado a efectos aislados de los terremotos cuando localmente se alcanzan valores de la aceleración vertical del terreno igual o próxima a la de la gravedad, generalmente asociada a intensidades iguales o superiores a VIII MSK (Bolt, 1993).



Figura 7.33. Zona inferior de la Columna de Adriano (Roma). En esta columna se observan como mínimo dos rotaciones de los tambores de la columna producidos por eventos sísmicos. El segundo rota una zona que reparada de la columna (zona derecha imagen). En la parte izquierda se puede observar el desplazamiento relativo de los dos de los tambores de la columna, muy visible en la parte inferior del escudo. Este desplazamiento es el desplazamiento acumulado de al menos dos eventos: el evento 2, y como mínimo un evento anterior (evento 1) (Foto: Teresa Bardaji).

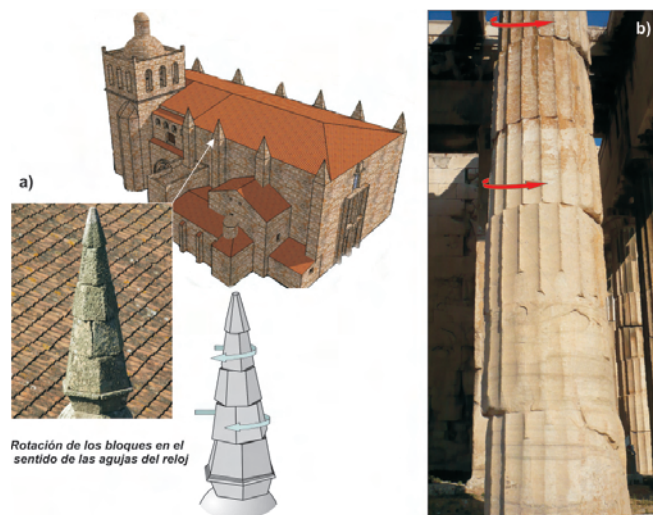


Figura 7.34. a) Estructura de deformación por rotación en los adornos superiores de la Catedral de Coria (Cáceres, España), inducidas por el terremoto de Lisboa del 1 de noviembre de 1755 (Martínez Vázquez, 1999). Estas deformaciones se producen como consecuencia del movimiento horizontal inducido al terreno por el sismo, produciendo la rotación de los bloques, en este caso en el sentido de la aguja del reloj. b) Rotaciones de los tambores de una de las columnas del Templo de Zeus (Atenas, Grecia) (Foto: Virginia Ruiz Villanueva).

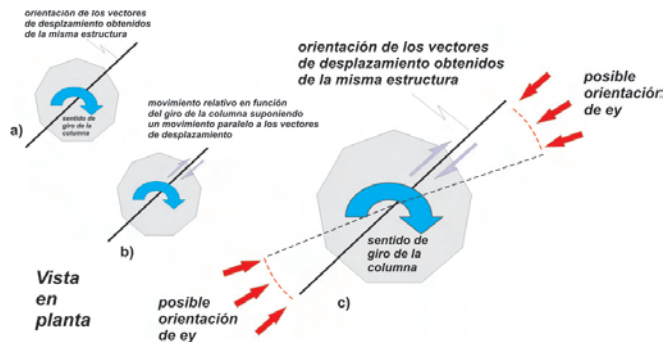


Figura 7.35. Esquema explicativo de la metodología alternativa para obtener un dato de orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) de estructuras giradas (en este caso una columna): a) determinación de la orientación de vectores de desplazamiento en la misma estructura; b) definición de la cinemática que tendría una hipotética fractura orientada paralela a esos vectores que pase por el centro de la estructura rotada; c) determinación del intervalo de ey compatible con la orientación y cinemática de la hipotética fractura, este intervalo de orientaciones se deduce considerando la fractura como un estructura vertical con movimiento en dirección, y considerando la orientación posible de ey asignable a este tipo de estructuras.

Bloques de sillares desplazados

Características de los datos: líneas (L3), orientación única, dato único.

Este tipo de desplazamientos se suelen dar en zonas en las que la estructura tiene gran libertad de movimientos (e.g. esquinas de muro, columnas integradas en estructuras murarias) (Figura 7.36).



Figura 7.36. Desplazamientos de sillares con cierto grado de libertad de movimientos, ya que son las estructuras terminales de los muros que separan las diferentes tiendas del *macellum* (mercado) (*Baelo Claudia*, Cádiz). Este tipo de desplazamientos se pueden analizar como vectores (L3), ya que se puede cuantificar la magnitud del movimiento relativo entre los dos bloques.

El análisis de bloques desplazados es relativamente simple, ya que lo único que debemos determinar es la orientación del vector de desplazamiento (L3). Esa orientación es subparalela a la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey). La direccionalidad de los daños quedará definida por el sentido de movimiento del bloque más alejado del suelo. Esto último es debido a que consideramos que estas estructuras se desarrollan sin que se produzca la deformación permanente del sustrato, por lo

que para establecer el movimiento relativo de los bloques consideramos que la parte más próxima al suelo es la que está fija con respecto al resto de la estructura.

Escalones y líneas de bordillo desplazados y plegados.

Características de los datos:

Pliegues: líneas (L1), orientación única, dato único.

Desplazamientos: líneas (L3), orientación única, dato único.

Los escalones y líneas de bordillos plegados y desplazados, son estructuras que se comportan de forma muy rígida frente a las deformaciones elásticas de las ondas sísmicas, ya que presentan muy poca libertad de movimiento. Las deformaciones que presentan se pueden analizar de forma similar a las definidas en de los enlosados plegados en los bloques desplazados. Sin embargo, hay que tener en cuenta que presentarían una fuerte anisotropía frente a otro tipo de estructuras deformadas que poseen mayor grado de libertad. Estas estructuras en si se pueden considerar como anisotropías de primer orden en el yacimiento arqueológico.



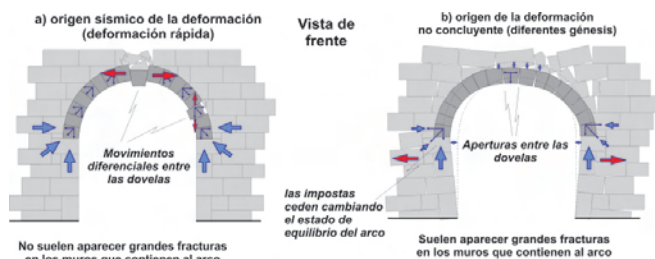
Figura 7.37. Bordillos plegados de la escalera entre la *Basílica* y el *Decumanus Maximus* en *Baelo Claudia* (Cádiz). La metodología de análisis de la deformación es similar a la utilizada en los pavimentos plegados (ver figura 7.6).

Deformaciones en arcos y dinteles en puertas y ventanas.

Características de los datos: líneas (L1 o L2), rango de orientaciones, dato complementario.

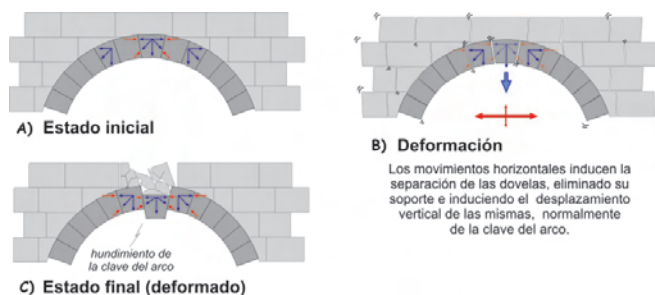
El movimiento de dovelas de arcos o dinteles es considerado en muchos casos el resultado de actividad sísmica (Marco, 2008; Silva et al., 2009). Kamai y Hatzor (2007) concluyen mediante el análisis de elementos finitos en casos reales, que sólo grandes terremotos pueden producir el deslizamiento de la clave de arcos. Además concluyeron que este tipo de daños son inequívocamente resultado de un terremoto, aunque añaden que debe haber una disminución de la carga sobre el muro para que

se produzcan este tipo de estructuras. No obstante hay que tener en cuenta que existen muchos daños en arcos que implican movimiento de las dovelas. Estos daños están producidos por la desestabilización del arco por variaciones de carga en las impostas (Figura 7.38).



El origen sísmico de las deformaciones en un arco, quedan claramente definido por el hundimiento de algunas de las dovelas del arco. Estos desplazamientos en la vertical se producen sin provocar otros daños de consideración en la estructura (Figura 7.39). Estos movimientos se producen debido a una pérdida de apoyo momentáneo de las dovelas como consecuencia de los movimientos de cizalla cíclicos horizontales del plano del muro que contiene al arco.

El origen sísmico de las deformaciones en un arco, quedan claramente definido por el hundimiento de algunas de las dovelas del arco. Estos desplazamientos en la vertical se producen sin provocar otros daños de consideración en la estructura (Figura 7.39). Estos movimientos se producen debido a una pérdida de apoyo momentáneo de las dovelas como consecuencia de los movimientos de cizalla cíclicos horizontales del plano del muro que contiene al arco.



El daño más común es el deslizamiento de la clave del arco, aunque también pueden producirse deslizamientos de otras dovelas (Marco, 2008). También es importante considerar que, aunque lo más frecuente es observar movimientos de las dovelas en la vertical, también pueden producirse movimientos de los bloques en la horizontal.

En el caso de los movimientos de bloques en la vertical (Figura 7.41b y c), la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) debe formar un ángulo inferior a 45° con respecto al plano del muro que contiene el arco (L1, rango de orientaciones), este intervalo de ángulos implica-

ría una mayor componente de la deformación paralela al muro. Con ángulos superiores la componente normal al muro sería mayor, y sería improbable que se formaran este tipo de estructuras (Figura 7.40b). Este hecho ha sido puesto de manifiesto por algunos autores. Marco (2008), reconoce este tipo de deformación producida por un terremoto en 1759 en el yacimiento de Kal'at Nimrod. Este efecto es visible en arcos orientados E-O, en cambio en arcos orientados N-S, contiguos a los anteriores, no se observan deformaciones de este tipo.

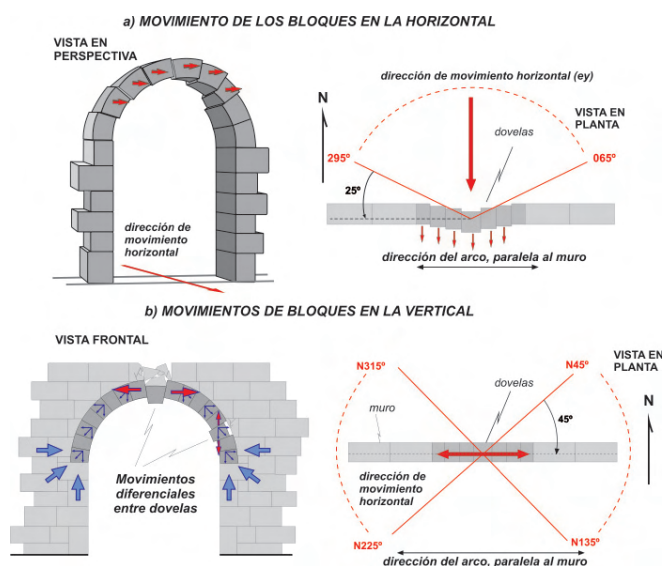


Figura 7.40. Esquemas idealizados del análisis de la deformación en arcos y dinteles. a) Deformaciones de origen sísmico que inducen el movimiento horizontal de las dovelas, la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) se analiza de forma similar a la de los muros basculados; b) deformaciones de origen sísmico que inducen el hundimiento de dovelas de arco, la dirección de ey se sitúa en un ángulo menor de 45° con respecto al plano del muro que contiene el arco.



Ejemplos de movimientos de dovelas en Baelo Claudia (Cádiz, España). a) caída de la clave de un arco en la puerta de uno de los bastiones de la muralla de la ciudad; b) movimientos en la vertical de las dovelas de un dintel de una ventana en uno de los edificios del foro de la ciudad.

En el caso de los movimientos en la horizontal de las dovelas (Figura 7.41a), aplicamos un análisis similar al utilizado en los muros basculados. Asumimos que la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) que ha producido el desplazamiento de los bloques se sitúa en un intervalo de orientaciones de 180° (rango de orientaciones). Limitado por la dirección del muro que contiene al

arco, el intervalo elegido será el de orientaciones opuestas al desplazamiento de los bloques (L2) (Figura 7.40a). Este tipo de análisis permite definir la direccionalidad de los daños.

7.2.3. Análisis conjunto del yacimiento

Es importante asumir que para realizar un correcto análisis arqueosismológico desde el punto de vista estructural, se debe analizar estadísticamente los datos de forma que podamos afrontar la interpretación de los resultados de forma conjunta.

De este modo, independientemente del tipo de dato obtenido en el análisis de campo (dato único o complementario), el análisis estructural consiste en el análisis poblacional de un conjunto de datos para definir parámetros comunes a todo el yacimiento arqueológico.

Por lo tanto, los resultados de este tipo de análisis deben considerarse como la orientación media o rango de orientaciones con los diferentes parámetros de dispersión estadísticos para cada uno de los EAE analizados (Figura 7.42a y b).

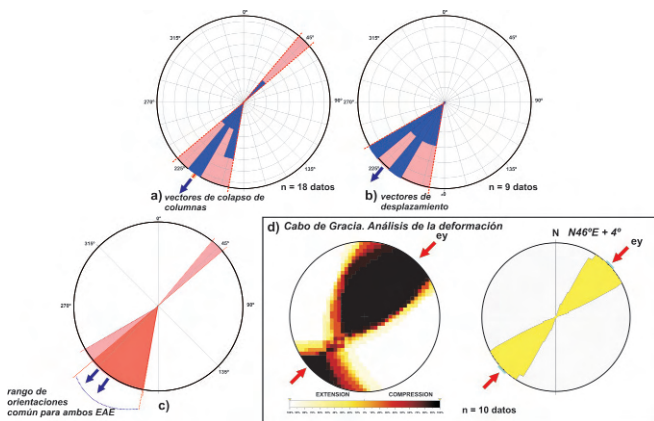


Figura 7.42. Análisis conjunto de los resultados individuales de deformación obtenidos en el yacimiento arqueológico (resultados del análisis de *Baelo Claudia*). Resultados medios del análisis individual de EAE: a) vectores de colapso de columnas, b) vectores de desplazamiento de bloques de sillaría. c) Resultados comunes para ambos EAE, se cuantifica un rango de orientaciones de máximo acortamiento horizontal para el conjunto de EAE. d) Resultados del análisis de estructuras geológicas (fallas), en las proximidades el yacimiento (Cabo de Gracia): Método de los Diedros Rectos (Angelier y Mechler, 1977) y Modelo de Deslizamiento (Reches, 1989).

Una vez obtenidas esas direcciones individuales o rango de orientaciones de los distintos EAE es necesario-compararlas para intentar obtener un rango de orientaciones comunes que pueda aportar información sobre el tensor de deformación que ha producido el conjunto de las estructuras analizadas (Figura 42c). Es importante también comparar estos datos con otros análisis de la deformación en estructuras geológicas en zonas próximas (Figura 42d). Esta comparación de datos puede aportar información sobre la relación entre las deformaciones del yacimiento arqueológico y el tensor de deformación local y regional.

Otra de las actuaciones importantes es determinar la homogeneidad espacial en el yacimiento, con el análisis anterior determinamos una orientación común de ey para

todo el yacimiento, pero es imprescindible determinar como varían esas orientaciones de ey localmente en el yacimiento, para poder interpretar correctamente los resultados (ver punto 7.2). Para ello utilizamos las trayectorias de deformación.

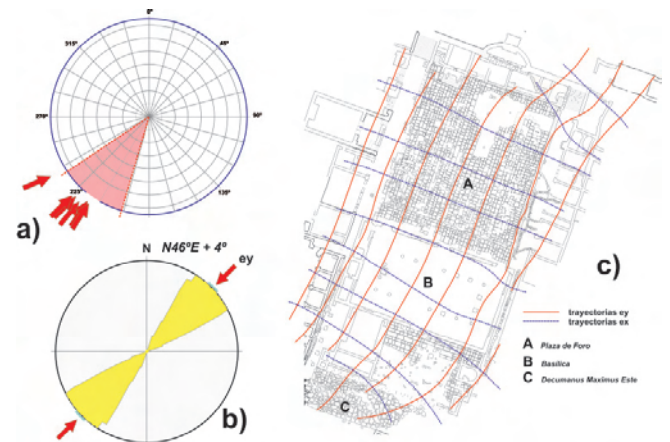


Figura 7.43. Resultados del análisis de la deformación en el Foro y en la zona este del *Decumanus Maximus* de *Baelo Claudia*. a) Resultados individuales de diferentes EAE. b) Resultado común para todos los EAE para la zona considerada. Representación de las trayectorias de deformación para la zona considerada, nótese las variaciones en la zona del *Decumanus Maximus* y el zona del enlaso de la Plaza del Foro (ver capítulo 7.2).

7.3. Anisotropía vs deformación

7.3.1. Deformación vs anisotropías previas.

En el análisis de la deformación debemos tener en cuenta la escala de trabajo y de representación de los resultados. El tensor de deformación/esfuerzo puede sufrir variaciones importantes tanto en su forma como en su orientación en función de la escala de análisis y representación.

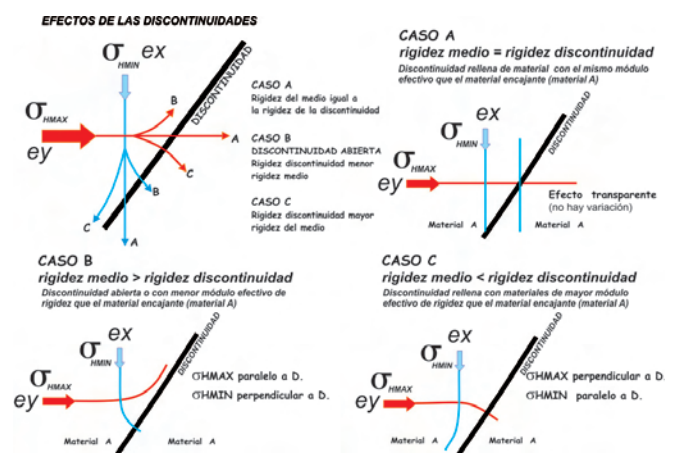


Figura 7.44. Esquema de la respuesta de las trayectorias de esfuerzo/deformación en presencia de una discontinuidad en el terreno. Se pueden establecer tres casos en función de la diferencia de rigidez entre el medio y la discontinuidad (Modificado de Harrison y Hudson, 1997): caso A (rigidez medio = rigidez discontinuidad), no hay variación en las trayectorias de esfuerzo/deformación; caso B (rigidez medio > rigidez de la discontinuidad) ey/SHMAX se sitúa paralela a la discontinuidad y ex/SHMIN se sitúa perpendicular a la discontinuidad; y caso C (rigidez del medio < rigidez de la discontinuidad) ey/SHMAX se sitúa perpendicular a la discontinuidad y ex/SHMIN se sitúa paralelo a la discontinuidad.

En geología estructural es muy importante considerar que las anisotropías pueden variar el estado de deformación de una zona, ya que la presencia de cualquier anisotropía (e.g. fallas preexistentes, cambios de litologías) pueden variar el estado de deformación en pocos kilómetros o incluso en centenares de metros. En función de las características de rigidez del medio y de la discontinuidad, es posible definir como se producen las variaciones en las trayectorias de deformación y de esfuerzo (Figura 7.44).

7.3.2. Anisotropías inducidas por las estructuras arqueológicas

En un yacimiento arqueológico, es posible encontrar numerosas discontinuidades (e.g. cloacas, canalizaciones, cimientos lineales, rellenos). En el análisis es muy importante considerar la posible presencia de elementos estructurales previos (e.g. muros, pavimentos) que se comporten como anisotropías frente a la deformación sísmica. Estas estructuras pueden producir rotaciones en las trayectorias de ϵ_y y producir cambios locales en la forma del tensor de deformación.

En un yacimiento arqueológico y a escala de detalle, estas variaciones pueden producirse por numerosos factores tan aparentemente simples como la presencia de un drenaje o alcantarillado, que las losas de un pavimento sean regulares o irregulares (Figura 7.45), la presencia de cimentaciones anteriores, las diferencias en la calidad de las construcciones, etc.

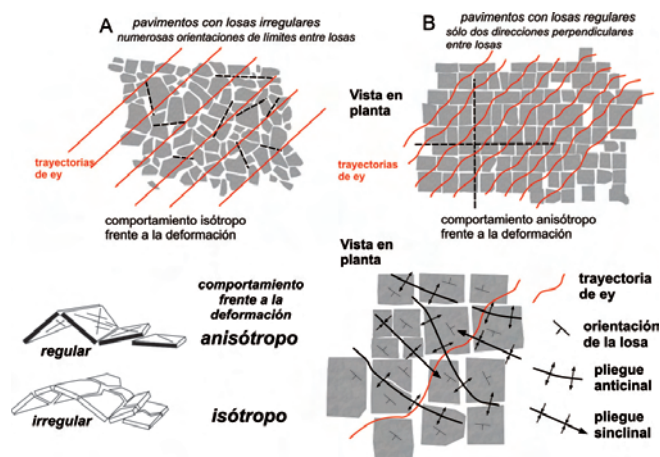


Figura 7.45. Diferente comportamiento ante la deformación de enlosados: a) enlosados irregulares, y b) enlosados regulares. En el caso de los enlosados irregulares existen muchas orientaciones diferentes entre losas, esta característica le confiere al conjunto del enlosado un comportamiento isotrópico frente a la deformación. En cambio, en el caso de los enlosados regulares, existen dos direcciones principales entre losas, esta anisotropía inherente a la estructura le confiere un comportamiento anisotrópico frente a la deformación.

Por lo tanto, a la hora de asignar las deformaciones presentes en un yacimiento arqueológico a un proceso, hay que tener en cuenta todos los factores que puedan influir en los parámetros de forma y orientación del tensor de deformación, considerando además la posible dispersión de los datos al analizarlos (Figura 7.45b).

Por todo ello, en este tipo de estudio, es necesario realizar un análisis estadístico de los datos que puedan aportar información sobre el tensor de deformación. En consecuencia, un mínimo de 30 datos totales confiere suficiente representatividad para caracterizar una deformación por terremoto. Además este análisis debe realizarse sectorizando el yacimiento (ver figura 7.43).

De esta forma, al dividir la zona analizada en sectores que presenten un comportamiento similar frente a la deformación, es posible caracterizar de forma más adecuada las deformaciones para el conjunto del complejo arqueológico analizado.

En algunos casos la proximidad de las estructuras puede hacer muy difícil esta sectorización. En ese caso es necesario caracterizar de forma muy detallada las deformaciones de cada estructura teniendo en cuenta el contexto arquitectónico que pueda influir en los resultados. Un ejemplo de ello son los muros. Los muros son las estructuras más comunes que pueden conferirle a un yacimiento un comportamiento anisotrópico frente a la deformación. Si el complejo arqueológico presenta una distribución regular de calles y edificios, tendremos una importante anisotropía del yacimiento frente a la deformación (e.g. ciudad romana de Baelo Claudia, Cádiz, España). En el caso en que el complejo presente una distribución irregular con diferentes orientaciones de calles, se comportará como conjunto de forma isotrópica frente a la deformación.

En el siguiente ejemplo se observa como la misma presencia de los muros puede producir la rotación de las trayectorias de ϵ_y , orientándose prácticamente perpendiculares al muro y transmitiendo el movimiento de forma perpendicular al mismo (Figura 7.46).

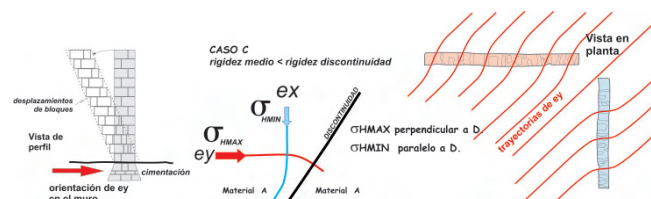


Figura 7.46. Ejemplo de reorientación de trayectorias de máximo acortamiento horizontal (ϵ_y) por la presencia de muros con una cimentación reseñable. Esta cimentación actúa como una anisotropía con mayor rigidez que el resto del subsuelo. Este cambio, desde el material con menor rigidez, a una zona de discontinuidad con mayor rigidez, produce la reorientación de las trayectorias de ϵ_y disponiéndose perpendiculares a las trazas de las cimentaciones de los muros.

No obstante, es importante recordar que existen otros factores como las limitaciones de libertad de movimientos de un muro, que pueden variar las reorientaciones de las trayectorias (Figura 7.18). También hay que señalar que cualquier estructura subterránea, menos visibles en un primer momento, como drenajes, alcantarillados, o antiguas cimentaciones, van a influir de forma significativa en la reorientación de las trayectorias (Figura 7.47).

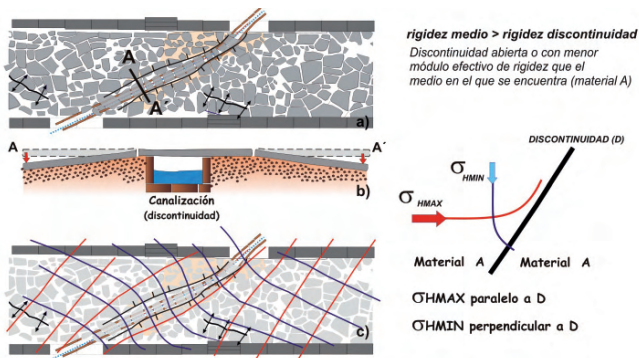


Figura 7.47. Reorientación de las trayectorias de deformación en un enlosado irregular con una canalización de desagüe subterránea. La presencia de esta estructura produce la reorientación de las trayectorias de máxima deformación horizontal, disponiéndose subparalelas a la orientación de la canalización.

En otros casos podemos observar como este tipo de estructuras subterráneas pueden llegar a producir asentamientos diferenciales del terreno que se muestran como plegamientos en superficie. En estos casos, si no tenemos una distribución adecuada de EAE en el yacimiento, no podemos asegurar el origen sísmico de las estructuras (Figura 7.48).



Figura 7.48. Enlosados irregulares plegados en el yacimiento romano de Itálica en Santiponce (Sevilla, España). Las estructuras plegadas parecen estar relacionadas con el sistema de alcantarillado subterráneo que discurre debajo de las calles. La ausencia de otros efectos claros en el yacimiento, no permite asignar estas deformaciones a un origen sísmico.

8. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CUANTIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN

En la mayoría de los casos, la cuantificación de la deformación está supeditada a la información histórica y/o arqueológica del yacimiento. Como ya hemos ido señalando a lo largo de este volumen, la aparición de estructuras puntuales por sí solas no nos permite definir el origen sísmico de las deformaciones.

Además, es importante recordar que cualquier análisis arqueosismológico debe contar con estudio multidisciplinar (i.e. arqueológico, histórico, geológico) que permita establecer un origen sísmico de las deformaciones con una incertidumbre aceptable. Sin un estudio completo, y debido a los múltiples orígenes que pueden tener algunos

de los daños, es difícil establecer inequívocamente el origen sísmico de las estructuras observadas.

En este capítulo se va a aplicar la metodología propuesta en diferentes situaciones que pueden darse al afrontar un inventario y análisis de los efectos arqueológicos de terremotos:

8.1. *Análisis de estructuras individuales.* Este análisis incluye edificaciones en las que sólo se observa una estructura.

8.2. *Análisis de sitios.* Este tipo de análisis incluye una sola edificación en la que se observan diversos efectos.

8.3. *Análisis de yacimientos/ciudades.* Incluye zonas relativamente extensas (yacimientos, ciudades) que incluyen edificaciones que presentan diversos efectos.

8.4. *Análisis conjunto de sitios.* Ese tipo de análisis incluye el análisis de diferentes sitios (con diversos efectos inventariados) cuyas deformaciones están producidas por el mismo evento sísmico.

8.1. Análisis de estructuras individuales.

En muchos casos, se puede inventariar alguna estructura puntual identificable como resultado del efecto de un terremoto (Figura 8.1) (cosísmico o post sísmico). Normalmente, estas estructuras individuales están relacionadas con efectos post sísmicos, en concreto con estructuras de reconstrucción o de construcción sismorresistente y, en algunos casos, estas estructuras también pueden estar asociadas a daños en la fábrica asimilables a algunos de los EAE descritos (ver figura 6.1).

No obstante, hay que tener en cuenta que este tipo de estructuras (e.g. engatillados) han sido utilizadas sistemáticamente para reforzar estructuras o para reparar daños (ver figuras 6.18 y 6.18), y por lo tanto no permiten, sin el apoyo de otros datos, reconocer daños o estructuras asimilables a un EAE con suficiente certidumbre (caso 1, Carmona, Cantabria) (Figura 8.2).

En otros casos (caso 2, Caballerizas del Castillo de Ponferrada, León) (Figura 8.3), la presencia sistemática de estructuras de construcción sismorresistente (e.g. engatillados), así como la datación y el conocimiento del origen de las estructuras, permite inferir un posible origen relacionado con la actividad sísmica, aunque, bien es cierto que si carecemos de documentación histórica que corrobore los datos, este tipo de casos deben ser considerados como datos inventariables, pero no analizables.

En otros casos (caso 3, Navarrete, La Rioja) donde si disponemos de documentación histórica que pueda corroborar la ocurrencia de daños por sismicidad, se puede realizar un análisis e interpretación de las estructuras (Figuras 8.4-8.8). Esta documentación histórica puede no estar referida directamente a las estructuras inventariadas, pero si la datación de los daños y/o reconstrucciones es coherente con la ocurrencia del sismo se pueden analizar las estructuras y comparar los datos obtenidos con los de otras poblaciones para determinar la coherencia de resultados.

A continuación se describen tres ejemplos que ilustran algunas de las posibilidades descritas, en función de si

disponemos de información sobre la datación de las estructuras y la constancia del evento sísmico en documentación histórica y/o datos arqueológicos (Figura 8.1).

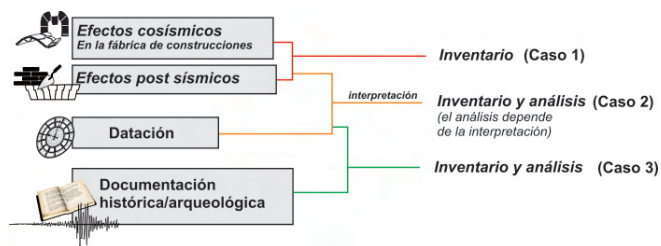


Figura 8.1. Esquema en el que se muestran algunos de los casos más comunes que podemos encontrarnos a la hora de afrontar el inventario y análisis de estructuras individuales de efectos de terremotos en yacimientos arqueológicos o edificios históricos.

Caso 1. Carmona (Cantabria, España)

En esta población cántabra del Municipio de Cabuerniga, se ha inventariado una estructura en que se observa la reconstrucción/reparación de una puerta en la que se reutilizan bloques, y se transforma la estructura de la puerta, desde un arco de medio punto, a un dintel con las dovelas engatilladas (Figura 8.2).

En el resto de la población no se observa la utilización de este tipo de técnica constructiva, ni tenemos datos históricos de la ocurrencia de daños importantes en esta población por la ocurrencia de sismicidad.

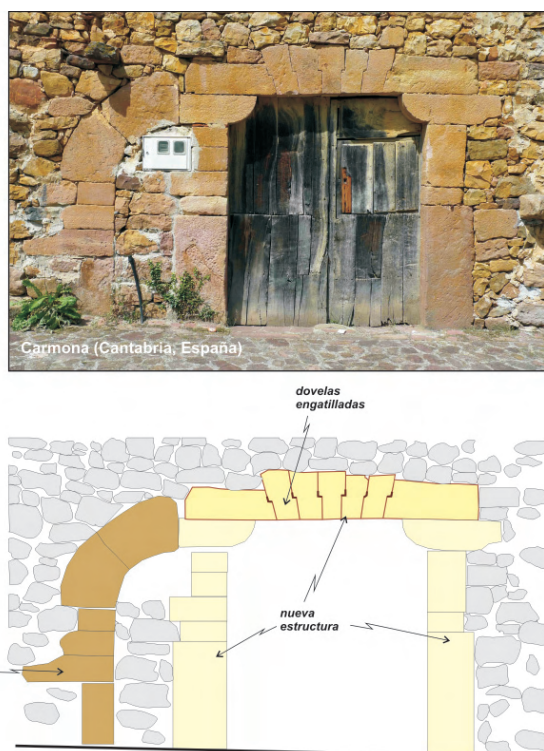


Figura 8.2. Estructura dañada y reparada en la población de Carmona (Cantabria, España). En este ejemplo se puede observar la modificación de un arco en una puerta de uno de los edificios de la población. Se repara la puerta sustituyendo el arco por un dintel con dovelas engatilladas. En este caso no podemos asegurar el origen sísmico de los daños sufridos por el arco de la puerta, pero la utilización de este tipo de engatillados en los dinteles de puertas y ventanas esta descrito como una medida de construcción sismorresistente al evitar desplazamientos horizontales de la estructura que desestabilice la carga vertical (ver capítulo 6).

La presencia de esta estructura, de la que carecemos de datación tanto de la parte dañada como de la reparada, no permite abordar ningún tipo de análisis sin la presencia de otro tipo de estructura. En este caso, la interpretación del origen de la deformación es muy dudosa y por tanto, no se debería aplicar ninguna metodología de análisis. Esta estructura se podría inventariar como dudosa en el análisis realizado.

Caso 2. Caballerizas del Castillo de Ponferrada (León, España)

Otro ejemplo de este tipo de estructuras, son las observadas en las caballerizas del Castillo de Ponferrada (León, España). Este castillo iniciado en el siglo XII, presenta numerosas ampliaciones y obras hasta bien entrado el siglo XIX.



Figura 8.3. Dinteles engatillados en puertas y ventanas de las caballerizas del Castillo de Ponferrada (León, España). En la fachada de este edificio, datado en 1845, se observa la utilización de engatillados en las dovelas de puertas (f y g) y ventanas (a y b). Estos dinteles pueden ser materiales reutilizados de estructuras anteriores del castillo, ya que a mediados del siglo XIX y propiciado por el propio ayuntamiento, se produjo un expolio sistemático de la sillería del castillo para su utilización en diferentes obras civiles. d) Hundimiento de dovelas en la puerta central.

Las caballerizas, extramuros del castillo, fueron construidas con sillería procedente del castillo en 1845. En la fachada se puede observar dos tipos de sillería y estructuras en puertas y ventanas: la primera de ellas más tosca, presenta dinteles con las dovelas engatilladas en ventanas (Figura 8.3a y b) y puertas (Figura 8.3f y g); y la segunda, mucho más elaborada muestra arcos rebajados y dovelas sin engatillar en puertas (Figura 8.3d y e) y ventanas (Figura 8.3c). En el periodo de construcción de este edificio (mediados del siglo XIX) se empezó a expoliar sistemáti-

camente la sillería del Castillo de Ponferrada, para diversas obras, entre ellas la construcción de estas cuadras. La diferencia entre las sillerías utilizadas permite considerar que las estructuras engatilladas provienen directamente del expolio del castillo, en cambio la sillería utilizada para el resto de puertas y ventanas es una sillería elaborado ex profeso para este edificio (nótese la inscripción en la sillería de la puerta principal, figura 8.3d). En el arco de esa puerta se puede observar el movimiento vertical de las dovelas centrales, efecto asimilable a uno de los efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones definido por Rodríguez-Pascua et al. (2009, 2011).

Independientemente del uso de los engatillados en los dinteles (efectos post sísmicos) y el hundimiento de las dovelas centrales de la puerta principal (sin engatillamiento, efecto cosísmico), no disponemos de información histórica o de la presencia de otras estructuras que nos permita inferir el origen sísmico de las deformaciones observadas.

No obstante, la presencia de los engatillados, aunque fuera en la fábrica original del castillo, nos permite establecer la presencia de medidas de construcción sismorresistente en esta zona, ya que si bien el uso de engatillados en estructuras murarias puede ser bastante común y tener diferentes utilidades, no lo es tanto la utilización de dinteles o arcos engatillados que se pueden relacionar directamente con estructuras de construcción sismorresistente (ver figuras 6.14 y 6.15). La presencia de engatillados en esta zona puede estar relacionada con las técnicas constructivas importadas desde medio oriente por la Orden del Temple, orden que ocupó el Castillo de Ponferrada entre los siglos XII y XIV.

Caso 3. Navarrete (La Rioja, España)

Esta población riojana documentó diferentes daños producidos por el terremoto de Lisboa de 1755. Martín Escorza (2006), a partir de varios escritos de la época, refiere para esta población daños estructurales referidos a “caída de fragmentos trozos de mampostería o de obra menor”. La intensidad del sismo para esta zona es de III-IV EMS Martínez Solares (2001) y de V EMS para Martín Escorza (2006).

En esta población se han inventariado diferentes efectos, tanto cosísmicos (desplazamiento de dovelas de arco), como post sísmicos (aplicación de técnicas de construcción sismorresistente); y gracias al Plan General del ayuntamiento de esta localidad es posible establecer la datación y cronología de todas las construcciones afectadas (Plan General de Navarrete).

El único efecto cosísmico observado en la actualidad es el hundimiento de las dovelas de un arco (Figura 8.4b) y el colapso de otro (Figura 8.4a). Los arcos afectados, que se localizan en una de las principales calles del casco antiguo de la localidad, datan del siglo XVI y presentan reparaciones realizadas durante el siglo XVIII. La orientación de los muros que contienen los arcos afectados presentan una orientación NNE-SSO (N51°E).

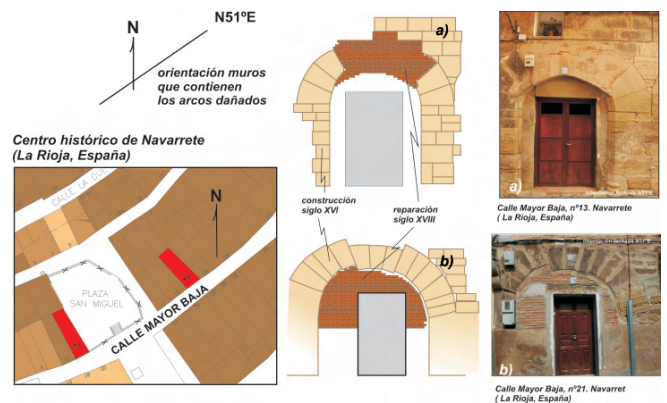


Figura 8.4. Ejemplos de arcos de puertas del siglo XVI colapsados o con hundimientos de dovelas, con reparaciones que datan del siglo XVIII (Navarrete, La Rioja). Las estructuras de hundimiento de dovelas se pueden considerar como efectos cosísmicos (ver figura 6.1). Es importante definir la orientación de las estructuras murarias que contienen los daños.

Las estructuras post sísmicas inventariadas en la ciudad son dos dinteles engatillados en dos puertas (Figura 8.5) de la misma calle en la que se encuentran las estructuras cosísmicas descritas.

La utilización de dovelas en dinteles o arcos es una estructura relativamente poco común (Figura 8.6), que puede ser interpretada como técnica de construcción sismorresistente utilizada por la población afectada por un evento sísmico.

Una vez inventariados los efectos observados, debemos interpretarlos y analizarlos para poder establecer la coherencia de las fechas de los daños y de las reparaciones con la fecha del evento sísmico descrito en la población. En este caso la correlación entre las edades y los efectos observados es coherente con la ocurrencia del terremoto de Lisboa a mediados del siglo XVIII (Figura 8.7). No obstante hay que tener en cuenta que este paso tiene un carácter interpretativo, ya que, aunque estén documentados daños en la población por el terremoto de Lisboa de 1755, no tenemos constancia directa de que los daños observados sean resultado directo de este terremoto.

Una vez establecida la coherencia de los datos con la ocurrencia del sismo, el siguiente paso es determinar del estado de deformación a partir del estudio de las únicas estructuras susceptibles de ser analizadas mediante esta metodología: los efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones.

Como ya hemos comentado los únicos efectos cosísmicos inventariados en la población de Navarrete son los desplazamientos en dovelas de arcos (Figura 8.4a y b). Si aplicamos la interpretación de la cinemática para este tipo de estructuras (Figuras 7.38 y 7.40), podemos establecer un intervalo de orientaciones para la dirección de máximo acortamiento horizontal (ϵ_y) para la estructura (Figura 8.8) (tipo de dato: L1, rango de orientaciones, dato único, ver capítulo 7).

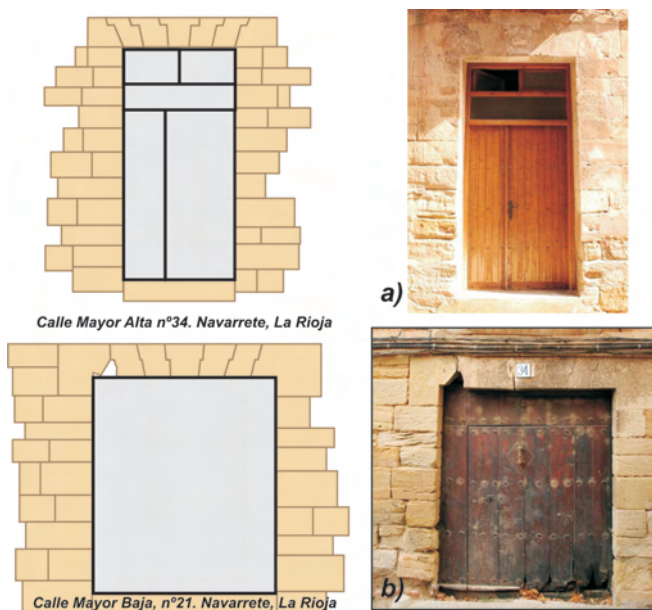


Figura 8.5. Ejemplos de utilización de engatillados en dinteles de puertas fechadas a finales el siglo XVIII en la población de Navarrete (La Rioja, España). La construcción de estas puertas con la utilización de este tipo de dovelas, considerada uno de los sistemas de construcción sismorresistentes más utilizados, es posterior a la ocurrencia del terremoto de Lisboa (1755) que causó daños en esta población.



Figura 8.6. Detalles de las estructuras de sillares engatillados en dinteles de puertas en la zona del casco antiguo de la población de Navarrete (La Rioja, España).

El rango de orientaciones de *ey* definido para la estructura no presenta direccionalidad ya que el dato obtenido es una dirección, sin sentido definido (línea L1). No obstante diferentes estudios consideran que la orientación de la deformación en el yacimiento esta relacionada con la posición del epicentro del terremoto. Muchos autores consideran que la orientación de las deformaciones está relacionada con la llegada de la onda sísmica, y la direccionalidad indicaría la posición del epicentro del terremoto (ver capítulo 10). En este caso, el intervalo de orientaciones de *ey* comprende la posición más aceptada del epicentro del terremoto de Lisboa (Figura 8.8), dato que corroboraría la calidad del análisis.

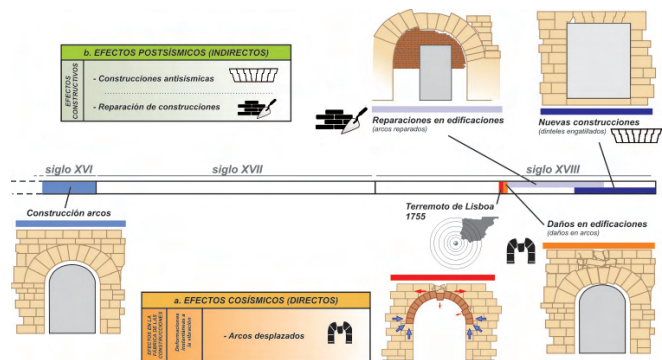


Figura 8.7. Esquema temporal en el que se muestra la interpretación de las diferentes estructuras observadas en el casco histórico de la población de Navarrete (La Rioja, España). El terremoto de Lisboa de 1755 produjo desperfectos en la fábrica de algunas construcciones de la ciudad. Actualmente son visibles arcos de puertas con daños importantes (hundimientos de dovelas o colapso del arco) (efectos cosísmicos directos). También se observa la reparación de estas estructuras, y la aplicación de sillares engatillados en dinteles de puertas construidas hacia finales del siglo XVIII, con posterioridad al terremoto de Lisboa (efectos post sísmicos).

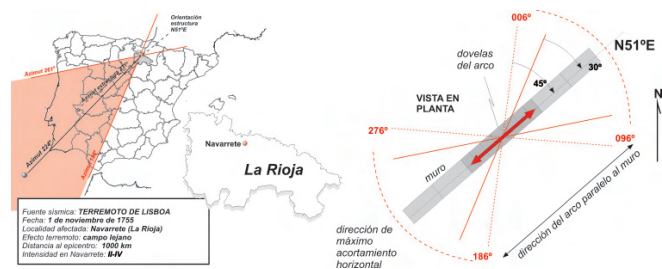


Figura 8.8. Determinación de la dirección de máximo acortamiento horizontal (*ey*) a partir del análisis de las dovelas de arco hundidas en la población de Navarrete. La dirección de *ey* presenta un ángulo de aproximadamente de 12° a cada lado de la orientación del plano del muro que contiene el arco (ver figura 7.40). El intervalo definido por esta estructura comprendería el acimut de la localización más aceptada del terremoto de Lisboa (1755). En este tipo de estructura no se puede establecer la direccionalidad de los daños.

8.2. Análisis de sitios

Es muy común contar con documentación histórica de los daños sísmicos sufridos por una edificación concreta (e.g castillos, iglesias, catedrales). Esta información permite discriminar claramente los daños sufridos por la edificación como consecuencia de un terremoto concreto. Normalmente estos daños están definidos por varios efectos analizables, lo que permite un análisis conjunto más detallado de las deformaciones que han producido los daños en la estructura (Figura 8.9). El análisis es muy similar al que se aplica en el caso 3 del análisis de estructuras individuales.

1. Catedral de Astorga (León, España)

Esta catedral que empezó a construirse en el siglo XV sufrió importantes daños como consecuencia del terremoto de Lisboa de 1755 (todos los textos entrecomillados corresponden a la misiva del Alcalde Mayor de Astorga

describiendo los daños del terremoto de Lisboa enviada a la corte el 21 de noviembre de 1755, 20 días después del terremoto, en Martínez Solares, 2001).

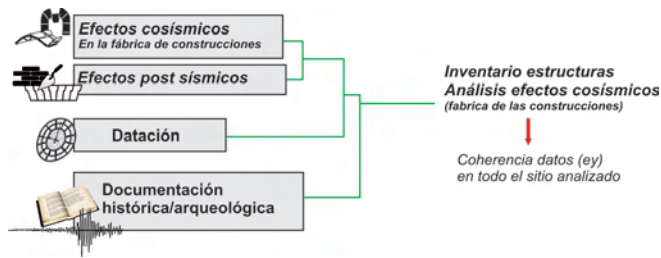


Figura 8.9. Metodología de análisis de los efectos de un sismo documentado en una estructura concreta, en que podemos realizar un análisis de la deformación a partir de varios efectos cosísmicos descritos (un sitio, diversas estructuras).

Muchos de ellos ya no son visibles porque fueron reparados, como por ejemplo el claustro que fue reconstruido totalmente después del terremoto (Figura 8.10b y c), o la reconstrucción de muros en el edificio de la catedral, en el que se observa la variación del color de la sillería utilizada. Incluso una de las torres de la fachada principal, la denomina “torre vieja” (torre norte), que fue construida en 1679, fue muy dañada en el terremoto, y no se terminó de reparar hasta 1856: “(...) Y en una de sus dos torres se abrió por dos partes a plomo y otras muchas quebras en sus cuerpos (...)”.



Figura 8.10. Efectos post sísmicos: a) reconstrucción de un muro en una de las capillas laterales. Nótese el cambio de color de la sillería utilizada en la reconstrucción, así como la utilización de sillares engatillados para reforzar la estructura y disminuir las cargas horizontales inducidas por sismicidad. b) y c) Reconstrucción del claustro en 1755 con posterioridad al terremoto. Se observan las marcas de la estructura previa colapsada por el terremoto.

Entre los efectos post sísmicos que se pueden observar en muchas zonas de la catedral, cabe destacar la utilización sistemática de engatillados en el exterior de la catedral, sobre todo en los contrafuertes del ábside (Figura 8.11c y d), y en la zona inferior de las ventanas (lunetos) de la nave central (Figura 8.11b).

En el interior de la catedral también se observan engatillados, sobre todo en las estructuras murarias de las capillas laterales de la nave central, capillas que fueron muy dañadas durante el terremoto de Lisboa por la caída de los pináculos exteriores (Figura 8.11a) sobre el techo de las mismas (Figura 8.12): “(...) y los remates que cayeron hicieron bastante destrozo en las naves bajas (...)”.

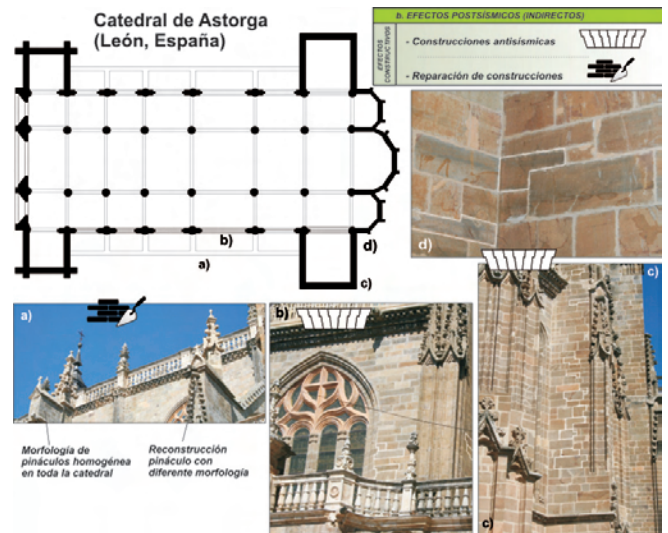


Figura 8.11. Efectos post sísmicos en el exterior de la catedral de Astorga (León, España). Uso de sillares engatillados (b, c y d) en la estructura de la catedral de forma sistemática, aunque no homogénea. Reparaciones de pináculos en el lateral sur (a). Las estructuras de los pináculos fueron reconstruidas con posterioridad a los daños producidos por el terremoto de Lisboa de 1755. Se puede observar como uno de los pináculos presenta una morfología notablemente diferente al resto de los pináculos de la catedral.

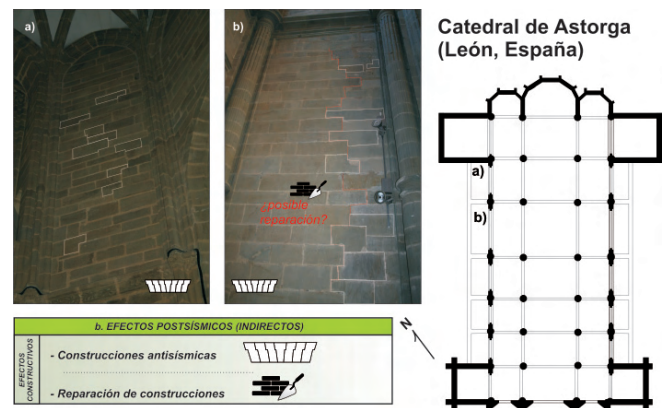


Figura 8.12. Efectos post sísmicos en el interior de la catedral de Astorga (León, España). Uso de sillares engatillados en la estructura de la catedral de forma sistemática en algunos de los muros, sobre todo en estructuras murarias de las capillas laterales.

Como ya hemos dicho, muchos de los daños del terremoto del Lisboa descritos en la documentación de la época fueron reparados (Figura 8.13). Incluso con las reparaciones efectuadas, todavía son visibles estructuras cosísmicas susceptibles de ser analizadas mediante la metodología expuesta en el capítulo 7.

Entre ellas cabe destacar el desplazamiento de sillares muy visible en las columnas laterales que sustentan la nave central (Figura 8.13b), sobre todo en una de ellas en la que el desplazamiento es más que evidente (Figura 8.13c), daños de los que se tiene constancia histórica: “(...) y una pilastra de la nave mayor (...) se reconoce una quiebra en el arco toral y (...) manifiestan el empuje que hizo hacia la parte contraria (...)”. Estos desplazamientos se pueden analizar como vectores de desplazamiento (L3)

(ver figura 7.36), determinando directamente la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) (paralela al vector), e incluso la direccionalidad de los daños (en estos casos hacia el suroeste) (Figura 8.14).

Otro de los efectos visibles es el hundimiento de las dovelas superiores de un pequeño rosetón situado el luneto de la capilla norte del crucero de la catedral (Figura 8.13a): “(...) Las dos capillas que hacen figura de crucero se hallan atormentados estos, y sus lunetos, y se reconocen se han descolgado y bajado de su centro, como también dos arcos formas de la capucha, se hallan arruinados en sus claves (...)”. El análisis de la deformación para esta estructura es el mismo que se aplica a los desplazamientos de dovelas en arcos y dinteles (figuras 7.38 y 7.40). Este tipo de análisis proporciona datos de orientación de ey, pero no de direccionalidad de los daños (L1, rango de orientaciones, dato único) (Figura 8.14).

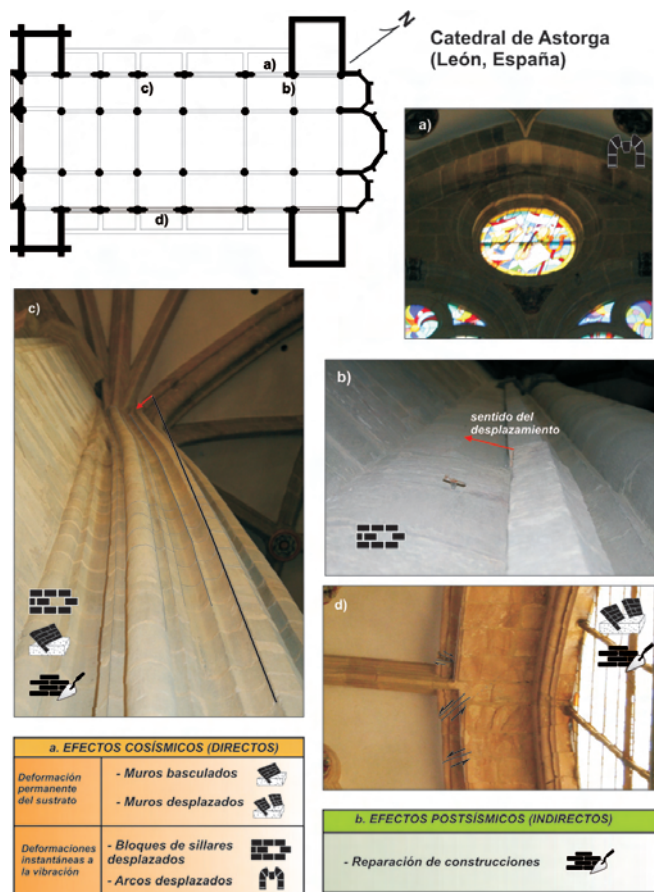


Figura 8.13. Efectos cosísmicos en el interior de la catedral de Astorga (León, España). a) deslizamiento de las dovelas de un pequeño rosetón en una de las capillas laterales. b) Desplazamiento decimétrico de los sillares de una de las columnas que separa la nave de crucero de la nave central de la catedral. c) desplazamiento acumulado de los sillares que conforman una de las columnas, desplazamiento visible incluso con evidencias de reparaciones importantes. d) desplazamientos de sillares en la conexión de la nave central con uno de los ventanales orientados al sur.

También se observa una serie de fracturas reparadas en la conexión del muro sur con una de las bóvedas de la nave principal, de las ocho bóvedas de esta nave, siete fueron muy afectadas por el terremoto: “(...) En la nave mayor, de ocho bóvedas (...) sólo la capilla mayor (...) sin

lesión alguna, y las siete restantes se hallan con muchas quiebras de cruceros que se han descolgado al suelo (...)”. Estas fracturas presentan un desplazamiento claro analizable con técnicas clásicas de análisis estructural geológico (Figura 8.13d). El análisis de estas fracturas proporciona un intervalo de orientaciones de ey (L1, rango de orientaciones, dato único).

El análisis de las estructuras cosísmicas nos proporciona una serie de orientaciones de máximo acortamiento horizontal (ey) (orientaciones únicas y rangos de orientaciones) (Figura 8.14). La representación conjunta de estas orientaciones nos permite establecer un rango de orientaciones comunes de ey para las estructuras cosísmicas analizadas en este sitio. Este rango común de orientaciones comprende la posición más aceptada del epicentro del terremoto de Lisboa (Figura 8.8), dato que corroboraría la calidad del análisis (ver capítulo 10).

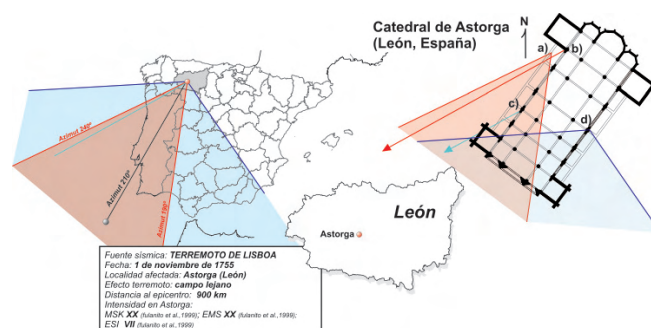


Figura 8.14. Determinación de la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) a partir del análisis de las estructuras cosísmicas observadas en la Catedral de Astorga (León). El rango de orientaciones rojo corresponde con el hundimiento de las dovelas de (a). El intervalo azul representa las posibles direcciones de ey deducidas de las fracturas en la nave central (d). Las letras corresponden a las fotos de la figura 8.13.

2. Coria (Cáceres, España)

La Catedral de Santa María de la Asunción de Coria (Cáceres, España) (siglos XV-XVIII) sufrió graves daños por el terremoto de Lisboa de 1755.

En algunos casos las descripciones históricas son tan detalladas que nos permite reconstruir algunos eventos relacionados con el sismo que pueden proporcionar mucha información, y puede incluso permitirnos mejorar el análisis de los efectos cosísmicos visibles.

En el caso de esta catedral, la descripción del colapso de la linterna y media naranja de la torre detalla claramente los daños (carta del Obispo de Coria remitida a la corte el 7 de noviembre de 1755 describiendo los daños en la catedral) (Martínez Solares, 2001) (Figura 8.15):

a) “(...) media naranja, se abrió por la parte superior y cayendo perpendicularmente su coronación y linterna con la campana del reloj, rompió tres bóvedas que había hasta el pavimento de dicha capilla (...)”. Entendemos que cuando dice perpendicularmente se refiere a que colapsó hacia el interior de la torre y que la linterna llegó hasta el suelo de la Capilla Parroquial (actualmente Capilla de los Maldonado).

b) “(...) El cuerpo de la media naranja se derramó parte de él a la Capilla mayor, cuya bóveda de cantería cedió del golpe, y se arruinó enteramente (...)”.

c) “(...) Otra parte de dicha media naranja (y fue la mayor) cayó a la puerta principal (...)”.

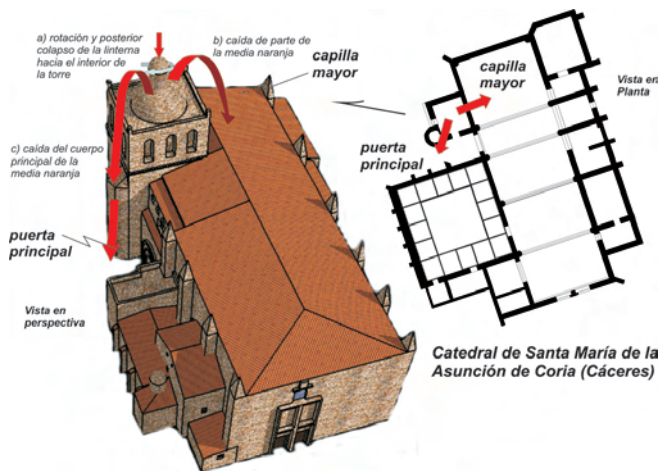


Figura 8.15. Interpretación de los daños sufridos por la estructura superior (linterna y media naranja) de la torre de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria (Cáceres, España) como consecuencia del terremoto de Lisboa. Sin la descripción histórica de los daños, no podríamos determinar el rango de orientaciones de máximo acortamiento horizontal (ey) para este colapso, al no contar con efectos cosísmicos visibles en la actualidad, ya que muchos de ellos han desaparecido como consecuencia de las reparaciones realizadas con posterioridad al sismo.

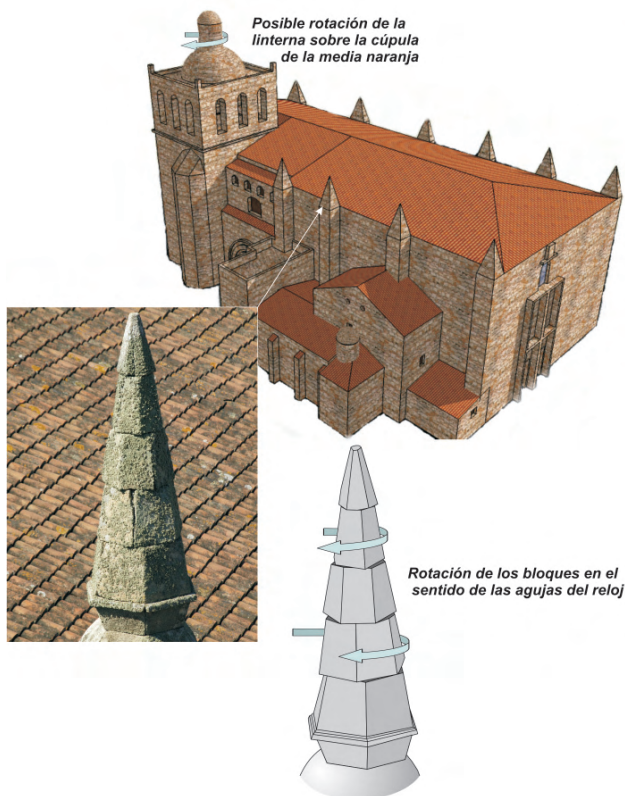


Figura 8.16. Estructura de rotación presente en uno de los pináculos de la Catedral de Coria (Cáceres, España) (Martínez Vázquez, 1999). Se observa la rotación siniestra (en sentido contrario a las agujas del reloj) de los sillares que conforman este pináculo. La descripción del colapso de la linterna de la torre nos hace pensar que se debió a la rotación previa de la linterna sobre la cúpula de la media naranja.

La presencia de estructuras de rotación en alguno de los pináculos de la catedral (Figura 8.16) (Martínez Vázquez, 1999) nos hace pensar que el colapso de la linterna se debió a la rotación de la misma con respecto a la cúpula de la media naranja, provocando el colapso vertical de la misma (Figura 8.15).

Esta descripción detallada nos permite establecer un intervalo de orientaciones de ey para el colapso de esta estructura, intervalo definido por las dos orientaciones principales de caída de la media naranja: hacia la capilla mayor (acimut 120°) y hacia la puerta principal (acimut 280°) (Figura 8.17). Al igual que en caso del análisis de la Catedral de Astorga. Este rango común de orientaciones comprende la posición más aceptada del epicentro del terremoto de Lisboa de 1755 (Figura 8.17).

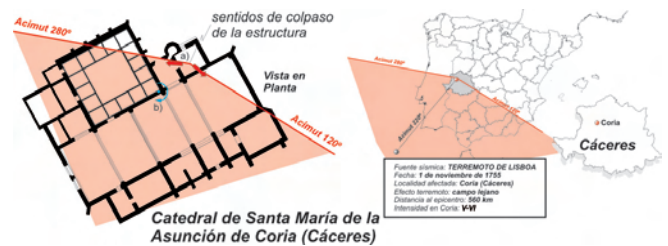


Figura 8.17. Determinación del intervalo de ey deducido del análisis de la documentación referida al colapso de la linterna y de la media naranja de la torre de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria (Cáceres) (ver texto).

8.3. Análisis de yacimientos/ciudades

En el análisis de yacimientos o poblaciones se aplica una metodología ligeramente distinta a la aplicada en sitios o en lugares donde aparecen estructuras individuales. En estos casos, las zonas a analizar suelen ser zonas que no han sufrido muchas modificaciones a lo largo del tiempo (e.g. ciudades abandonadas, yacimientos arqueológicos). Y en estos casos se suelen preservar mucho mejor los efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones porque no se realizan las reparaciones posteriores a la ocurrencia del sismo.

En este tipo de casos es importante realizar un análisis pormenorizado de los diferentes efectos que aparecen en el yacimiento (Figura 8.18). En primer lugar se deben inventariar los diferentes efectos y analizarlos individualmente. En segundo lugar, y suponiendo que tengamos el mismo efecto cosísmico en varias zonas del yacimiento/ciudad, debemos analizar conjuntamente los resultados obtenidos para cada uno de los EAE inventariados. Con ello podremos establecer la homogeneidad de los resultados considerando un mismo daño, y así descartar la posibilidad de que se hayan producido por diferentes procesos.

Posteriormente, debemos realizar un análisis con los resultados de todos los EAE para el conjunto del yacimiento, y observar si los daños presentan orientaciones de máximo acortamiento horizontal comunes o por lo menos coherentes, para así poder asignar un único proceso generador de los daños para todo el yacimiento (análisis conjunto de los datos). Y por último, debemos realizar una sectorización del

yacimiento, y construir las trayectorias de máximo acortamiento horizontal que nos permitan observar las variaciones en el estado de deformación producidas por las diferentes anisotropías presentes en el yacimiento (ver capítulo 7.2).

Estos datos de deformación se tienen que comparar con los obtenidos del análisis de los efectos geológicos que permiten determinar un estado de deformación (e.g. análisis estructural geológico de planos de falla en trincheras).

Una vez realizado el análisis de la deformación, se puede asignar los daños a un evento determinado e intentar establecer la intensidad macrosísmica a partir de los daños geológicos y ambientales (escala ESI-07) (ver capítulo 8).

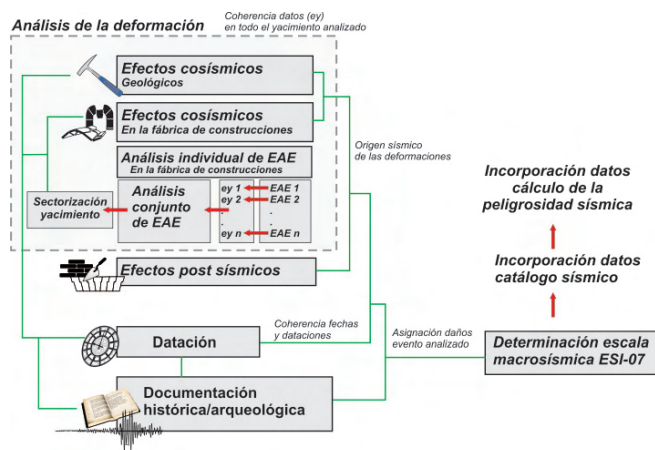


Figura 8.18. Esquema metodológico del estudio de un yacimiento/ciudad a partir de los efectos arqueológicos de terremotos (EAE), con la inclusión de posibles efectos geológicos (primarios y secundarios), y la posible determinación de escalas macrosísmicas (ESI-07), para la incorporación del evento a catálogos sísmicos y al cálculo de la peligrosidad en la zona considerada.

No obstante, en la mayoría de los casos encontramos ciudades que han sufrido grandes terremotos en época histórica, y en las que es realmente complejo localizar efectos cosísmicos, ya que las reparaciones en los edificios afectados se realizaban con relativa rapidez, eliminando casi por completo cualquier daño visible. En estos casos el análisis debe centrarse en el inventario de los diferentes efectos post sísmicos en las construcciones (e.g. utilización sistemática de elementos constructivos antisísmicos, reparaciones de daños).

A continuación se presentan dos ejemplos de este tipo de casos: 1) yacimientos o ciudades en los que el abandono de la ciudad ha hecho posible la conservación de muchos efectos cosísmicos (yacimiento de Baelo Claudia en Cádiz, España), y 2) ciudades en las que la ocupación continua ha impedido la conservación de este tipo de estructuras, pero que presenta una gran cantidad de efectos post sísmicos, fundamentalmente en los aplicados a la construcción de edificios y estructuras (Morelia, Michocan, México).

1. Baelo Claudia (Cádiz, España)

En el yacimiento romano de Baelo Claudia (Cádiz, España) estudios previos habían definido la ocurrencia de dos sismos sin referencia histórica en el periodo compren-

dido entre los siglos I y III AD (Silva et al., 2005). Este reconocimiento se ha llevado a cabo mediante la colaboración multidisciplinar entre diferentes expertos (arqueólogos, historiadores, geólogos, arquitectos,...), colaboración que ha permitido el reconocimiento de diferentes daños y efectos asimilables a la ocurrencia de sismos próximos a este enclave, en especial los datos arqueológicos (e.g. abandonos de partes de la ciudad, presencia de horizontes de destrucción).

Entre los efectos reconocibles en el yacimiento, se encuentran tanto efectos cosísmicos, como post sísmicos. Los efectos cosísmicos observados muestran casi la totalidad de los representados en la clasificación propuesta por Rodríguez-Pascua et al. (2009, 2011) (Figuras 8.19 y 8.20). En este yacimiento también aparecen efectos post sísmicos, entre los más extendidos se encuentra la presencia de estructuras de reconstrucción y de horizontes de destrucción (Figura 8.21).



Figura 8.19. Efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones inventariados en el yacimiento romano de Baelo Claudia (Cádiz, España). a) **Caída orientada de columnas** afectando a los muros de la basilica en la zona del Foro de Baelo Claudia (Silleries, 1997). En muchos casos es necesario consultar el material original de las excavaciones arqueológicas para poder definir los diferentes efectos correctamente. b) En este caso, la zona de la basilica ha sido restaurada, situando a las columnas en su posición original antes del colapso. c) Fragmento de **muralla** oriental de la ciudad **plegada y basculada**. En algunas ocasiones podemos encontrar dos efectos en una misma estructura. d) **pliegues y pop up** en el **enlosado regular** de la plaza del Foro. e) Fragmento de la **muralla occidental basculada**. f) **dovelas hundidas y desplazadas** en una ventana adintelada en uno de los edificios públicos del Foro.



Figura 8.20. Efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones inventariados en el yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz, España) (continuación). a) Acueducto **desplazado y colapsado** en la zona extramuros oriental. b) Impactos de caída de bloques en el enlosado del *Decumanus Maximus*. c) **Plegamientos en el enlosado irregular** del *Decumanus Maximus*. d) **Pliegues en pavimentos de argamasa** en el *Macellum* de la ciudad. e) **Pliegues en la escalera** que une la Basílica y el *Decumanus Maximus*. f) **Bloques desplazados** en una de las esquinas de la plaza interior del *Macellum*.

El análisis de la deformación presente en los EAE localizados en este yacimiento, responde a la necesidad de cuantificar estas deformaciones para poder corroborar la hipótesis de la ocurrencia de sismos destructivos en este yacimientos enunciada a partir de otras técnicas y análisis multidisciplinarios.

La aplicación del análisis de la deformación al enclave de *Baelo Claudia* se ha centrado en primer lugar en el inventario de todos los EAE de la zona del yacimiento. La gran cantidad de estructuras presentes hace necesaria la utilización de una cartografía específica para poder situar todos los efectos de forma correcta (Figura 8.22). Esta simbología ha sido diseñada para poder representar todos los datos necesarios para la posterior aplicación del análisis de la deformación. Es decir, esta simbología representa la localización geográfica de los efectos inventariados, y los datos de orientación necesarios para afrontar el análisis de la deformación.

La aplicación del análisis de la deformación al enclave de *Baelo Claudia* se ha iniciado realizando un inventario de todos los EAE sobre la cartografía del yacimiento (Figura 8.23).

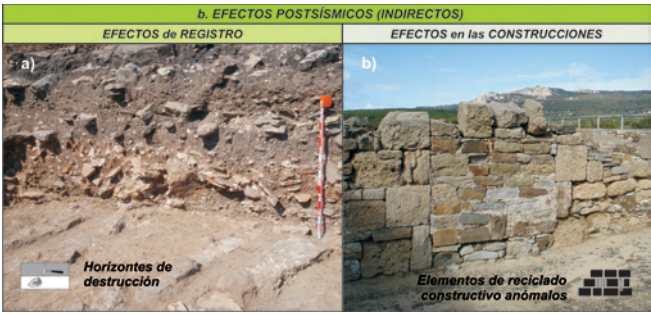


Figura 8.21. Efectos post sísmicos en el yacimiento de *Baelo Claudia*. a) Horizonte de destrucción en la zona este del *Decumanus Maximus* (campana de excavación septiembre de 2009). b) Elementos de construcción anómalos en la zona del puerto de la ciudad.

a. EFECTOS COSÍSMICOS (DIRECTOS)		Simbología cartográfica y de análisis	
EFECTOS EN LA FÁBRICA DE LAS CONSTRUCCIONES	Por deformación permanente del sustrato	<ul style="list-style-type: none">- Pavimentos de argamasa plegados- Fracturas y pliegues en enlosados regulares- Fracturas y pliegues en enlosados irregulares- Impactos entre el enlosado- Contrafuerzos desplazados y girados- Muros basculados- Muros desplazados- Muros Plegados	<ul style="list-style-type: none">la traza del pliegue marca la orientación del ejeel valor numérico marca el acimut de la superposición de losas.el valor numérico marca el acimut del impacto entre las losas, paralelo a la dirección de ejela línea define la orientación sobre la cual se ha producido el desplazamiento, la flecha marca el sentido relativo del movimiento.la dirección marca la orientación del muro, el acimut define el sentido hacia el cual bascula el muro, el valor numérico representa el ángulo de basculamiento.la línea define la orientación sobre la cual se ha producido el desplazamiento, la flecha marca el sentido relativo del movimiento.la traza del pliegue marca la orientación del eje
	Deformaciones instantáneas a la vibración	<ul style="list-style-type: none">- Fracturas penetrativas en bloques de sillera- Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo- Columnas caídas y orientadas- Giros en bloques de sillera y columnas- Bloques de sillares desplazados- Arcos desplazados- Escalones y líneas de bordillo plegadas- Muros colapsados- Bóvedas colapsadas- Marcas de Impacto- Roturas en esquinas de bloques	<ul style="list-style-type: none">el símbolo debe situarse encima del muro afectadola dirección marca la orientación del murola línea define el acimut de caída de la columna, se puede poner también el valor numéricogiro en sentido contrario a las agujas del reloj (dextro) / giro en sentido contrario a las agujas del reloj (sinistro)el vector marca el sentido de movimiento del bloque más alejado del suelo, el valor numérico representa el desplazamiento en cmmovimiento vertical de dovelas / movimiento horizontal de dovelasla traza del pliegue marca la orientación del ejela dirección marca la orientación del muro, el acimut define el sentido hacia el cual colapsa el murola dirección marca la orientación del muro del que se supone que ha caído el bloque que define el impacto, en el caso de conocerloel valor numérico define el sentido de buzamiento de la fractura

Figura 8.22. Simbología cartográfica y de análisis propuesta para la representación de los efectos cosísmicos en un yacimiento arqueológico. Muchos de los símbolos utilizados representan orientaciones de las estructuras susceptibles de ser analizadas para la determinación de la deformación.

Una vez inventariados todos los efectos, se ha procedido a realizar el análisis de la deformación de las estructuras presentes en la fábrica de los materiales. Los efectos geológicos localizados en las zonas próximas al yacimiento se han analizado utilizando las metodologías clásicas de análisis estructural geológico.

En total se han realizado más de 600 medidas estructurales en todo el yacimiento para caracterizar los distintos tipos de efectos visibles en las edificaciones y estructuras principales del mismo.

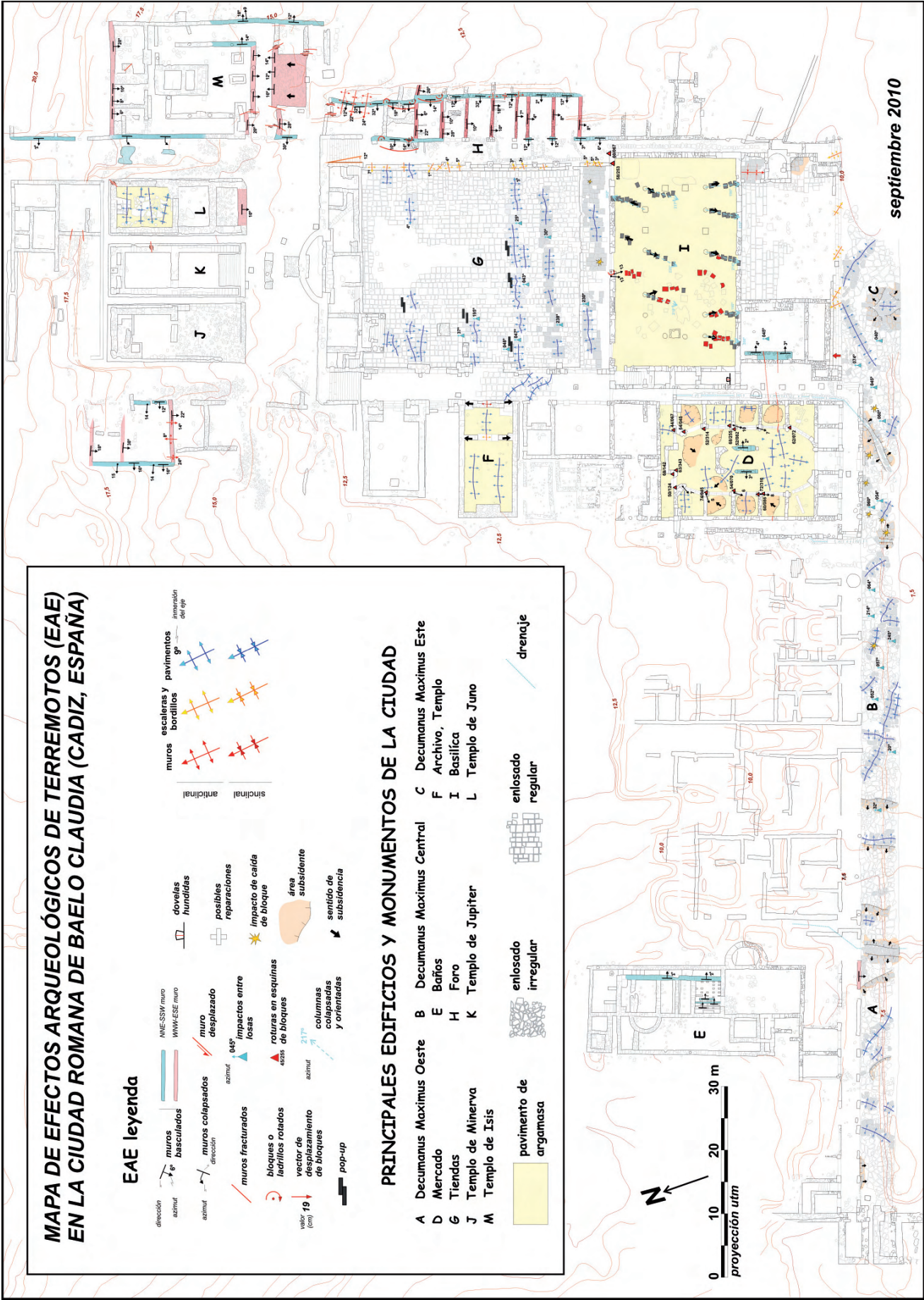


Figura 8.23. Mapa de los efectos arqueológicos de terremotos inventariado en la zona este del yacimiento romano de Baesolaudia (Cádiz, España). Se han utilizado la simbología propuesta en la figura 8.22.

Para cada una de las estructuras se determinó la orientación del tensor de deformación en la horizontal, definiendo la dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) teniendo en cuenta la interpretación cinemática de cada una de las estructuras (ver capítulo 7). No obstante, hay que tener en cuenta que independientemente de que el análisis de los EAE se realice en un primer momento individualmente, nunca se deben obviar las relaciones genéticas entre diferentes EAE (Figura 8.24). Estas relaciones genéticas pueden inducir cambios en la interpretación de la cinemática de las estructuras, como es el caso de la figura 8.24. Los posibles movimientos de la muralla están condicionados por la presencia de estructuras adosadas en el interior de la ciudad, por lo que la muralla tiende a bascular hacia el lado con más libertad de movimientos, es decir hacia el exterior de la misma.

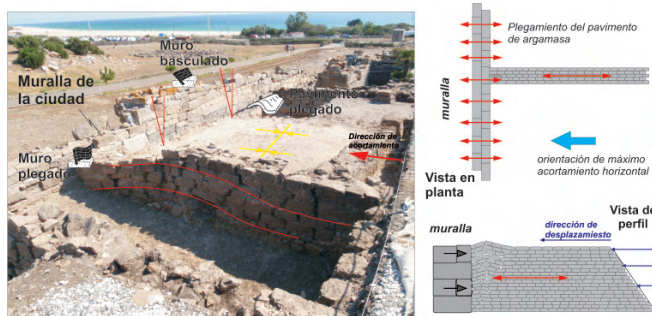


Figura 8.24. Ejemplo de la zona oriental de la muralla oriental de *Baelo Claudia* donde se puede observar como las tres estructuras definidas tienen una relación genética clara: las ondas sísmicas producen un acortamiento horizontal. La presencia de la muralla reduce la libertad de movimiento del muro y del pavimento. Como consecuencia de esa reducción se produce el plegamiento de ambas estructuras (ver capítulo 7). La muralla al tener muy limitados sus movimientos por el lado del muro y pavimento, bascula en sentido contrario.

Posteriormente, y para comprobar la homogeneidad en la orientación de máximo acortamiento horizontal (ey), se analizaron los resultados obtenidos para cada uno de los EAE analizados, es decir se analizaron conjuntamente todos los resultados obtenidos del mismo tipo de estructura (Figura 8.25). Los resultados muestran una homogeneidad evidente en la totalidad de EAE's considerados, mostrando una dirección de ey común según NE-SW. En los casos en los que debido a las características de la estructura se ha podido determinar la direccionalidad de los daños, ésta parece mostrar un sentido desde SO a NE.

Si analizamos los resultados obtenidos de forma conjunta para el todo el yacimiento se puede definir una dirección de máximo acortamiento horizontal para el conjunto arqueológico según N35°-N40°E (Figura 8.26a). Esta orientación homogénea para todo el yacimiento corrobora, de forma cuantitativa, la hipótesis propuesta por otros autores sobre el origen sísmico de las deformaciones presentes en este yacimiento (Menanteau et al., 1983; Sillères, 1997; Silva et al., 2005; Silva et al., 2009). Las dataciones arqueológicas de los diferentes efectos extraídas de volúmenes temáticos (e.g. Sillères et al., 1997) y de los diferentes informes de las excavaciones arqueológicas publicadas

por la institución francesa de la Casa de Velázquez (Madrid) nos permite establecer la edad de los sismos que han afectado a este enclave romano en los siglos I y III AD (Silva et al., 2005; Silva et al., 2009).

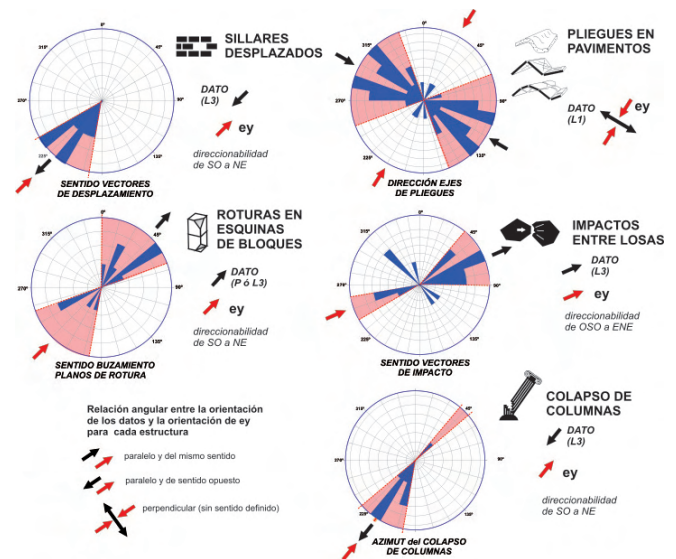


Figura 8.25. Resultados conjuntos para algunos de los tipos de estructuras analizadas (flechas negras orientación de los datos, flechas rojas orientación de máximo acortamiento horizontal (ey) deducida para cada estructura. Nótese que la orientación de los datos no tiene por qué ser paralela o del mismo sentido que la orientación de ey deducida de su análisis. La relación angular entre la orientación de los datos y la orientación de ey deducida de su análisis depende de la interpretación cinemática teórica de cada una de las estructuras (ver capítulo 7).

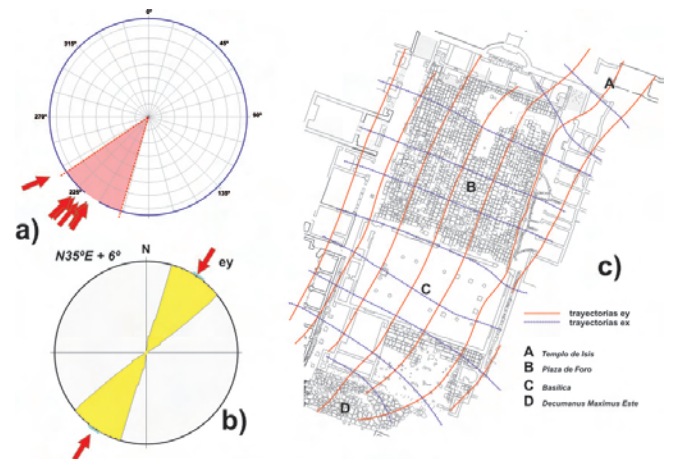


Figura 8.26. Análisis conjunto de los resultados obtenidos del análisis individual de los EAE que aparecen en el yacimiento de la ciudad romana de *Baelo Claudia* (Cádiz, España). a) Representación de las orientaciones de máximo acortamiento horizontal (ey) deducidas del análisis individual de EAE. b) Resultado común de la orientación de ey para todo el yacimiento. c) Representación de las trayectorias de deformación (ey líneas rojas; ex líneas azules) en la zona del Foro. Las trayectorias presentan reorientaciones en: la zona del *Decumanus Maximus* (D) producida por la existencia de drenajes subterráneos; en la zona de la plaza del *Foro* (B) producidas por la existencia de un enlosado regular; y en la zona del *Templo de Isis* (A), esta última relacionada con un proceso gravitacional cosísmico muy superficial que afecta a esa parte del yacimiento (Silva et al., 2009).

Es interesante comparar las orientaciones de máximo acortamiento horizontal obtenidas del análisis de los efectos en la fábrica de los edificios, con los obtenidos del análisis de estructuras geológicas (efectos geológicos) que se pueden localizar en las cercanías del yacimiento. En muchos casos no será posible inventariar efectos geológicos relacionados con el mismo sismo, no obstante siempre es interesante relacionar los datos de deformación del yacimiento con estados de deformación obtenidos del análisis de estructuras geológicas recientes.

A pocos kilómetros al este del yacimiento de Baelo Claudia se encuentra el Cabo de Gracia (ver figura 8.28). En esta zona se ha realizado el análisis de la deformación de una población de fallas relacionada con las principales estructuras que definen la zona de falla en su sector litoral. La dirección de máximo acortamiento horizontal deducida es coherente con la obtenida del análisis del yacimiento (Figuras 8.26 y 8.27).

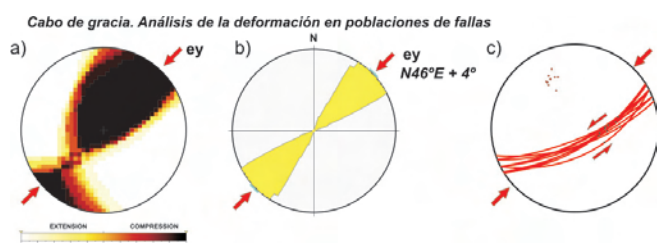


Figura 8.27. Resultados del análisis de una población de fallas en el Cabo de Gracia mediante técnicas de determinación del tensor de deformación: a) método de los Diedros Rectos (Angelier y Mechler, 1977), b) Modelo de Deslizamiento (Reches, 1989), c) proyección estereográfica de los planos de falla analizados.

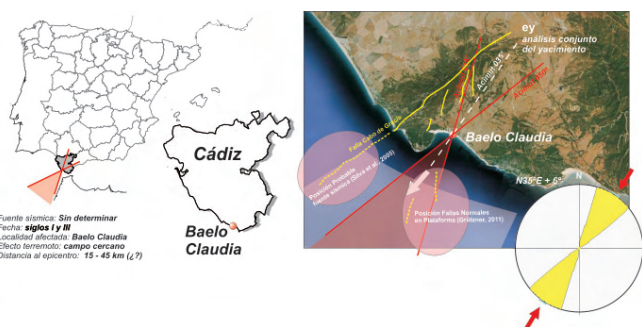


Figura 8.28. Definición del intervalo de orientaciones de máximo acortamiento horizontal (ey) deducido del análisis conjunto de todos los EAE definidos en la ciudad romana de Baelo Claudia. Se representa la dirección media obtenida (línea blanca discontinua) con las dispersiones posibles (líneas rojas continuas). El intervalo definido contiene el área de la posible fuente propuesta por Grützner (2011), está muy próxima al área propuesta por Silva et al. (2005) para los sismos que afectaron a este enclave romano (superficie gris), así como las nuevas fallas NNE-SSO identificadas en plataforma por Grützner (2011). La flecha blanca marca la direccionalidad de los daños deducida del análisis de los EAE.

Si representamos en el mapa de la zona el intervalo de orientaciones definido por el análisis de las estructuras del yacimiento (Figura 8.28), observamos que ese intervalo comprende parte del área probable de la fuente sísmica

(Grützner, 2011; Silva et al., 2005) que ha producido el sismo responsable de los daños en la ciudad romana de Baelo Claudia (Figura 8.28). No obstante, trabajos más recientes (Silva et al., 2009) indican que los sistemas de fallas con mayores evidencias geológicas y geomorfológicas de actividad reciente, son fallas normales N-S a NNE-SSO que segmentan el frente montañoso del Cabo de Gracia y que presentan registro morfológico en la topografía y deformaciones registradas en la plataforma litoral de la zona mediante sísmica de reflexión (Grützner, 2011). En cualquier caso la fuente sismogénica se situaría en el cuadrante SSO de Baelo Claudia en la zona de plataforma.

2. Morelia y Patzcuaro (Michoacán, México)

Existen muchos casos en los que los efectos cosísmicos de un terremoto desaparecen casi por completo por las reparaciones y/o nuevas construcciones, sobre todo en ciudades que no han sufrido abandono después de la ocurrencia de un evento sísmico importante. No obstante, en este tipo de ciudades podemos encontrar gran cantidad de efectos post sísmicos en obras anteriores o posteriores a la ocurrencia del sismo. Estos datos nos impiden realizar un análisis adecuado de la deformación, pero pueden aportarnos muchos datos con respecto a la historia sísmica de una zona.

Un ejemplo claro de este tipo de poblaciones es la ciudad de Morelia (antigua Nueva Valladolid), en el estado de Michoacán (México), en la que se ha podido establecer la utilización sistemática de medidas de construcción sismorresistente en la reconstrucción de edificios de sillería. Existe documentación de terremotos destructivos que afectaron a extensas zonas de Michoacán, entre ellas la ciudad de Morelia entre los siglos XVI y XIX. El terremoto mejor documentado es el terremoto de Patzcuaro de 1856, con una intensidad de intensidad IX MSK.

En la ciudad de Morelia se han inventariado numerosos ejemplos de reconstrucciones de daños por sismicidad y la utilización de engatillados (efectos post sísmicos en las construcciones). La utilización sistemática de engatillados como medida de construcción sismorresistente es visible en más de 120 edificios de la ciudad de Morelia, la mayoría de ellos de carácter civil, datados entre los siglos XVII y XVIII, época de expansión urbanística colonial en esta ciudad.

En muchos de estos edificios se observan numerosos engatillados, sobre todo en las plantas inferiores, asociados a las zonas inferiores, medias y superiores de puertas y ventanas (Figura 8.29).

El edificio barroco del Palacio de Gobierno de la ciudad (1760 – 1770) es un ejemplo claro de este método de construcción (Figura 8.30). Aparecen sistemáticamente engatillados en las puertas y ventanas de la planta baja del edificio. En algunas ocasiones, la utilización sistemática de este tipo de sillares es considerado por algunos autores como una medida de construcción sin relación con medidas de construcción sismorresistente.



Figura 8.29. Ejemplo de la sistematicidad y simetría en la utilización de engatillados en el patio interior del Palacio de Clavirejo (finales del XVIII y principios del XIX) (Morelia, México). Estas estructuras suelen estar relacionadas con ventanas y puertas, para evitar su colapso por cizalla en caso de movimientos horizontales de origen sísmico.



Figura 8.30. a) Fachada principal del Palacio de Gobierno de la ciudad de Morelia (Michoacán, México) (1760-1770). En este palacio barroco se observa la utilización sistemática de sillares engatillados en puertas y ventanas en la planta baja del edificio. b) Detalle de la puerta principal del palacio. c) Detalle de una de las ventanas con engatillados en la parte superior e inferior. Esta distribución de engatillados en las ventanas se observa en la misma posición en prácticamente todas las ventanas de la planta baja del edificio.

No obstante, en esta ciudad mexicana se observan algunos ejemplos que ilustran el verdadero objetivo de la utilización de sillares engatillados en esta ciudad: la reducción de los daños en infraestructuras inducidos por cargas horizontales de origen sísmico.

En concreto podemos destacar la reparación del antiguo convento de San Diego en la ciudad de Morelia, capital del estado de Michoacán. Este edificio que data de mediados del siglo XVIII (1768), presenta en toda su fachada la utilización sistemática de sillares engatillados, rompiendo completamente la horizontalidad de las hileras, sobre todo en la planta baja (Figura 8.31).



Figura 8.31. Vista de la fachada principal del antiguo convento de San Diego en la ciudad de Morelia (siglo XVIII) (actual facultad de derecho de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo), reconstruido a finales del siglo XIX, con posterioridad al terremoto de Patzcuaro de 1856. Nótese que la utilización masiva de engatillados sobre todo en la planta baja del edificio.

Este edificio fue reconstruido a finales del siglo XIX (1895) con posterioridad al gran terremoto de Patzcuaro de 1856 (intensidad IX MSK), que provocó grandes daños en las ciudades de Patzcuaro y Morelia. Esta reconstrucción es un claro ejemplo de la utilización de este tipo de medida constructiva para reducir los daños en caso de ocurrencia de un terremoto (Figura 8.32).



Figura 8.32. Esquema de la cronología de la construcción y posterior reconstrucción del ex convento de San Diego (Morelia, México)

Algunas de las estructuras engatilladas son de gran complejidad, como las inventariadas en el antiguo mesón de San Agustín (siglo XVII) (Figura 8.34). Esta complejidad evidencia un claro objetivo en su utilización, la disminución de los daños frente a esfuerzos horizontales inducidos por sismicidad. Hay que destacar que muchos de los edificios con este tipo de estructuras en la ciudad de Morelia, datan del siglo XVII, es decir anteriores al terremoto de Patzcuaro; lo que nos permite inferir que alguno de los terremotos históricos anteriores al de Patzcuaro produjo suficiente daños en la ciudad como para que se adoptaran este tipo de medidas constructivas sismoresistentes.



Figura 8.33. a) Detalle de la reconstrucción (1884) de la fachada del ex convento de San Diego con aplicación de medidas constructivas sismorresistentes; (b) la reconstrucción del mismo data de finales del siglo XIX (1895) (c) posterior al gran terremoto de Pátzcuaro de 1856 que asoló las poblaciones de Pátzcuaro y Morelia. En la reconstrucción de la fachada se observa la utilización sistemática de sillares engatillados (d).

También hay que tener en cuenta que este tipo de medidas constructivas son comunes en muchas culturas, como muestra claramente los restos de edificaciones (yacatas) de la cultura Tarasca (cultura precolombina, siglo XIV) en el estado de Michoacán (México) (Figura 8.35).

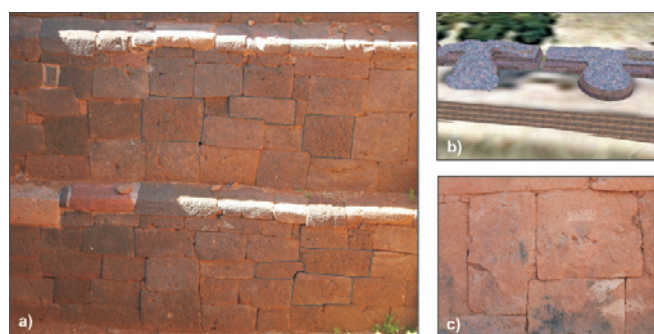


Figura 8.35. Yacatas de Tzintzuntzan, asentamiento de la cultura Tarasca (siglo XIV), en el estado de Michoacán (México). a) Muros exteriores de las yacatas más antiguas, en los que se aprecia el tipo constructivo con numerosos engatillados en las pirámides. b) Modelo tridimensional en donde se aprecia la forma de estas estructuras, con algunos derrumbamientos de posible origen sísmico. c) Estructuras engatilladas en los bloques que conforman la cubierta de las yacatas más modernas.



Figura 8.34. Ejemplos (a, b, c y d) de la complejidad en el diseño de alguno de los engatillados inventariados en la ciudad de Morelia (México) en el antiguo mesón de San Agustín (siglo XVII). e) foto y esquema de una de las puertas de este edificio.

En las proximidades de la ciudad de Patzcuaro, también se observa algunos efectos del terremoto de 1856, como utilización de elementos de reciclado anómalos en la reconstrucción de una iglesia afectada por el terremoto (Figura 8.36).



Figura 8.36. Reconstrucción de los daños de una iglesia de principios del siglo XIX (Patzcuaro, México) producidos como consecuencia del terremoto del Pátzcuaro de 1856. En la imagen se observa como se reutilizaron las dovelas del arco de la puerta principal como sillares del muro frontal de la iglesia. También se observa la colocación invertida del sillar que mostraba el año de construcción de la iglesia (1823).

Y la misma ciudad de Patzcuaro muestra algunos efectos post sísmicos (Figura 8.37) y cosísmicos (Figura 8.38) de este evento, y aunque la mayoría de sus edificios son de adobe, son numerosos los efectos del terremoto de 1856 inventariados en la ciudad.

Es de destacar la utilización de técnicas sismorresistentes a la construcción con adobe, incluyendo una capa formada por cañas para darle mayor resistencia a la estructura frente a las cargas horizontales (Figura 8.37b).

También se pueden observar algunas estructuras cosísmicas, no obstante el tipo de material en el que están localizadas (estructuras de adobe), y la falta de una datación inequívoca nos impide aplicar un análisis más exhaustivo.

8.4 Análisis conjunto de sitios

El análisis conjunto de sitios consiste en realizar un análisis conjunto de los resultados obtenidos en diferentes sitios afectados por un mismo evento sísmico. Normalmente, este tipo de análisis sólo se puede realizar con terremotos que tienen una amplia documentación de los daños en diferentes poblaciones. El análisis se realiza de forma individual para cada sitio, yacimiento o ciudad; y posterior-

mente se realiza un análisis conjunto estableciendo la coherencia entre los resultados (e.g. orientación de ey con respecto a la posición probable del epicentro, mapa de intensidades macrosísmicas) (Figura 8.39).

El terremoto de Lisboa

En este tipo de análisis podemos enmarcar el terremoto de Lisboa del 1 de noviembre de 1755, que afectó a prácticamente toda la Península Ibérica. Gracias a la encuesta solicitada por el rey a todas las poblaciones importantes de España, tenemos gran cantidad de información macrosísmica que nos permite asignar los daños actualmente observables (efectos cosísmicos) al evento (Martínez Solares, 2001).

En este capítulo se han presentado algunos resultados referidos a los daños y efectos asignables a este terremoto, y aunque el objetivo de este trabajo no es analizar en detalle el terremoto de Lisboa de 1755, podemos utilizar esos datos para mostrar los resultados de realizar un estudio superficial sobre la coherencia de los resultados obtenidos en cada uno de esos sitios afectados por este terremoto (e.g. Navarrete, Catedral de Astorga, Catedral de Coria).



Figura 8.37. Estructuras post sísmicas de la ciudad de Patzcuaro. a) estructura de reconstrucción de arcos en una de las casas de la plaza. En la parte superior izquierda del arco se observa la inscripción de la fecha de reconstrucción de la estructura (1859), tres años después de la ocurrencia del terremoto. b) Estructura de construcción sismorresistente en un muro de adobe, para reforzar estos muros frente a deformaciones horizontales se incluía una capa de caña que le daba mayor consistencia frente a las deformaciones paralelas al plano de muro. Nótese que se ha sustituido en una parte por tela metálica. c) Reparación de un dintel en una de las puertas del museo de la ciudad.



Figura 8.38. En la ciudad de Patzcuaro se pueden observar algunas estructuras cosísmicas posiblemente relacionadas con el terremoto de 1856, no obstante la falta de una datación inequívoca nos hace imposible la asignación clara de estos efectos al evento. a) y b) Movimientos verticales de las dovelas en arcos. c) y d) En muchos casos el adobe se comporta de forma menos rígida frente a la deformación que las estructuras de sillería, lo que produce que las estructuras de adobe sufran deformación por cizallamiento, deformación muy evidente en las estructuras más rígidas contenidas en esos muros (e.g. marcos de madera en puertas (c), dinteles de sillería (d)).

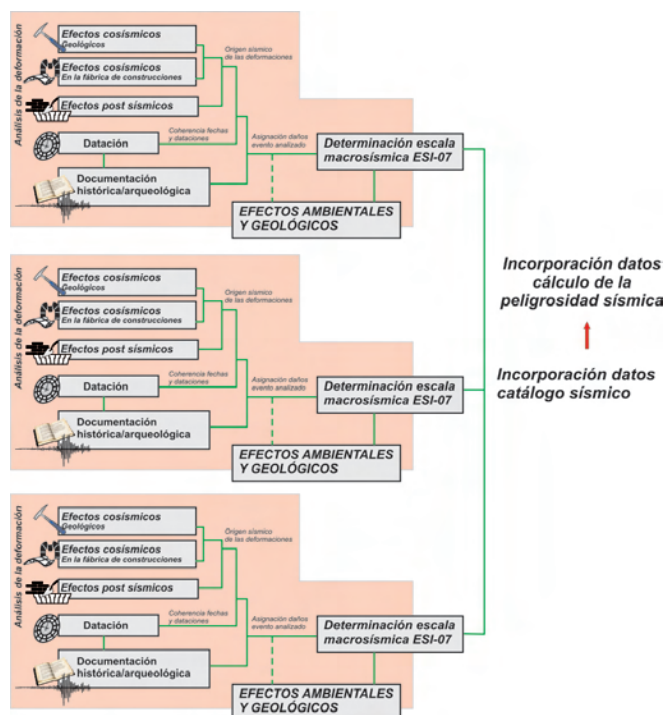


Figura 8.39. Esquema metodológico para el análisis conjunto de sitios, yacimientos o ciudades que han sufrido daños por un mismo terremoto. Se realiza una análisis individual de cada uno de los sitios, y después se realiza un análisis conjunto para establecer la coherencia de los resultados con respecto a un origen común (terremoto objeto del análisis).

Los resultados obtenidos del análisis de estos sitios nos permiten comparar los resultados de intervalos de máximo acortamiento horizontal deducidos en cada uno de ellos, y la coherencia de los mismos con respecto a la posición más aceptada del epicentro de este terremoto (Figura 8.40).

Como se puede observar en la figura 8.40, los intervalos de orientación de e_y de los tres puntos considerados muestran una coherencia aceptable con respecto al epicentro del terremoto.

No obstante, son pocos datos y de campo lejano, como para poder obtener conclusiones fiables de estos datos, pero en conjunto se muestra que las orientaciones de direcciones e_y a partir del análisis de efectos arqueosismológicos permite deducir las orientaciones preferentes del movimiento del terreno durante ese terremoto. Este movimiento, relacionado con los frentes de propagación de ondas sísmicas superficiales, permite evaluar la coherencia de las deformaciones con respecto a las probables fuentes sismogénicas ya sean fallas activas conocidas o desconocidas.

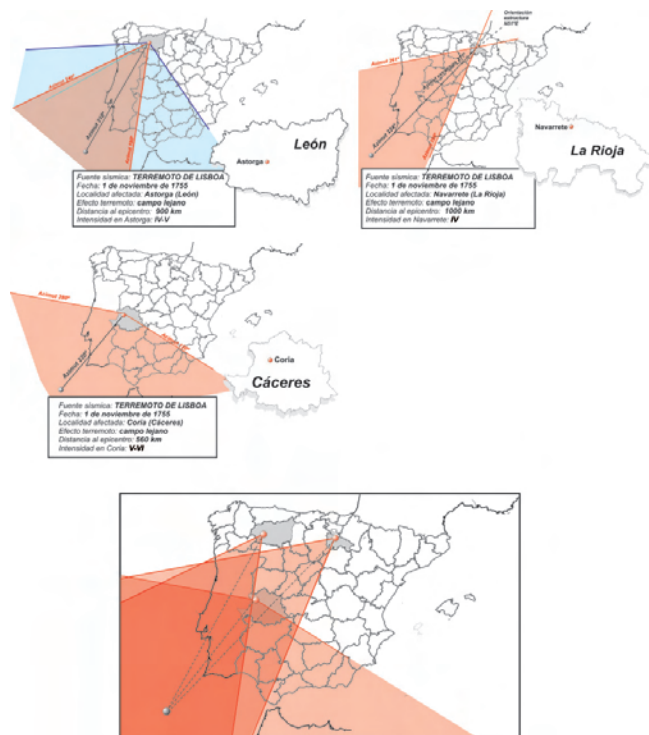


Figura 8.40. Comparación de los resultados de orientación de e_y deducidos de los resultados puntuales obtenidos de tres poblaciones: Navarrete (La Rioja), Catedral de Astorga (Astorga, León) y Catedral de Coria (Coria, Cáceres). Los resultados muestran coherencia con la posición más probable del terremoto de Lisboa de 1755.

En la actualidad la aplicación de estas técnicas a terremotos históricos documentados y catalogados, podría suponer un importante avance en cuanto a la posición y localización más realista de los epicentros macrosísmicos actualmente listados en los catálogos sísmicos existentes. Estos, por lo general hacen referencia a las coordenadas centrales de la localidad que sufrió los mayores daños (mayor intensidad), o bien se posicionan en las coordenadas obtenidas para los primeros terremotos registrados instrumentalmente en las proximidades de dichas localidades (e.g. coordenadas del epicentro de Lisboa de 1755; coordenadas de terremotos históricos de la ciudad de Lorca, Murcia).

Por tanto estas localizaciones no presentan ningún sostén científico razonado. La aplicación de las metodologías que se proponen en este volumen podrían ayudar a solucionar este importante *gap* en la información macrosísmica de la Península Ibérica, pudiéndose seguidamente evaluar la localización de las probables fuentes sismogénicas responsables de tales eventos, materia que a día de hoy continua siendo un tema de debate y "materia incógnita" incluso para los terremotos históricos más recientes ocurridos durante el siglo XIX.

9. INCORPORACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL REGISTRO HISTÓRICO Y GEOLÓGICO A LOS CATÁLOGOS SÍSMICOS

9.1. Los efectos ambientales y geológicos de los terremotos: la escala de intensidades ESI- 07.

Recientes revisiones de los efectos ambientales y geológicos producidos por los terremotos (Environmental Earthquake Effects: EEE) en las diferentes escalas de intensidades sísmicas, así como su catalogación y clasificación, permitirán relacionar los catálogos de terremotos instrumentales e históricos con la creciente cantidad de datos

provenientes de los estudios paleosismológicos y arqueosismológicos (Michetti et al., 2004, 2007). Desde el año 2007 se encuentra disponible la Escala de Efectos ambientales de los terremotos (ESI-2007), elaborada por la Subcomisión de Paleosismología y Tectónica Activa de la Comisión de Procesos Terrestres de INQUA (International Union for Quaternary Research) (Figura 9.1).

La Escala ESI-2007 (Environmental Seismic Intensity – 2007; Michetti et al., 2007) constituye una nueva escala de intensidades macrosísmica definida a partir en los efectos ambientales de los terremotos. Esta nueva escala pretende clasificar los efectos de los terremotos sobre el terreno y el ambiente con una doble intención: (a) poder relacionar el registro histórico con el paleosísmico, y (b) poder incluir los datos procedentes de los estudios paleosísmicos en los estudios de peligrosidad sísmica.

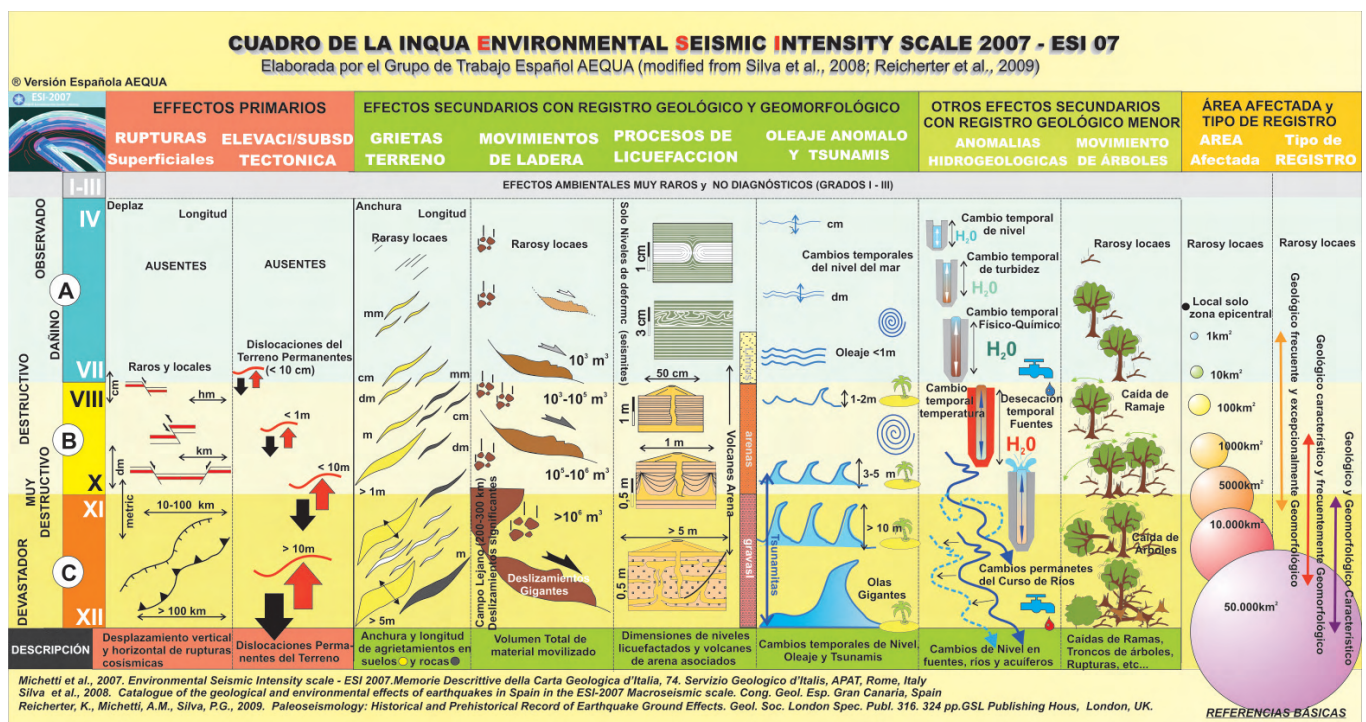


Figura 9.1. Esquema gráfico de los diferentes efectos geológicos y ambientales cosísmicos considerados en la Escala Macrosísmica ESI-2007. Se indica el tipo de registro geológico y/o geomorfológico más normal en cada uno de los grupos de categorías de intensidades. Figura actualizada de la original según la versión internacional publicada en Reicherter et al. (2009).

La escala ESI-2007 se actualizará y comprobará periódicamente en base a los datos procedentes de terremotos actuales. En definitiva se pretende ampliar el periodo de observaciones sísmicas desde unos cuantos miles, a decenas de miles de años atrás (Holoceno y final del Pleistoceno Superior). Este hecho es indispensable para poder analizar científicamente un proceso geológico (Ciclo Sísmico) que sobrepasa las escalas temporales que recogen los catálogos sísmicos convencionales. En el caso de España, este se extiende como mucho hasta el año 800 A.C. (ca 2800 años BP), aunque los datos son medianamente fiables a partir de los siglos XIV o XV (Martínez

Solares y Mezcuá, 2002), lo que supone unos 500 – 600 años de registro macrosísmico fiable.

La arqueosismología, participa doblemente de los análisis geológicos de índole paleosismológico y de los análisis estructurales de los daños sufridos por edificios y zonas urbanas durante terremotos históricos. De esta forma la arqueosismología constituye el puente fundamental que permite ligar el análisis histórico y geológico de los terremotos, además de ofrecer la posibilidad de complementar dicho análisis, comprobar y re-evaluar las intensidades sísmicas asignadas a terremotos históricos. En determinados casos, el análisis arqueosismológico de

yacimientos arqueológicos visigodos, árabes, romanos e incluso más antiguos, puede sacar a la luz terremotos locales de los que no se tenían constancia documental escrita (i.e. Silva et al., 2005; 2009).

Al igual que ocurre durante los terremotos actuales, durante los históricos la destrucción provocada en edificaciones y zonas urbanas puede ser debida a efectos primarios o secundarios de los terremotos. Los efectos primarios se relacionan con la propia dinámica de la fuente sísmica (falla o estructura tectónica) que ha generado el terremoto, e incluyen rupturas de falla y elevación/subsidencia tectónica del terreno (ver figura 6.1).

Estos efectos primarios son característicos en las zonas epicentrales macrosísmicas. Los efectos secundarios constituyen todos aquellos efectos sobre el terreno provocados por la propagación de los trenes de ondas sísmicas (e.g. agrietamientos, caídas de rocas, deslizamientos, liquefacción). Estos efectos son tanto mayores en número y dimensión cuanto más cerca estén a la fuente sísmica, aunque pueden extenderse fuera de las zonas epicentrales decenas o incluso centenas de kilómetros en función de la magnitud del evento. Tanto distribución espacial como las dimensiones de tales efectos secundarios dependen en gran medida de la susceptibilidad del terreno en función de factores orográficos, geológicos, geomorfológicos, e incluso climatológicos u oceanográficos. Por ejemplo la respuesta del terreno no será la misma en verano con niveles de acuíferos bajos (terreno seco) que durante el invierno (terreno húmedo).

En cualquier caso, los efectos secundarios de los terremotos son, en la mayor parte de los casos, partícipes importantes de los daños registrados en zonas urbanas, infraestructuras e instalaciones de ingeniería, e incluso durante terremotos actuales es difícil extraer la contribución de estos de la generada por la propia sacudida sísmica. Para terremotos históricos la situación es similar, pero mucho más complicada, sobre todo cuanto más antiguos son los terremotos, ya que en ellos las descripciones documentales son muy genéricas o vagas.

Por este motivo, las nuevas clasificaciones de efectos arqueológicos de los terremotos (i.e. Rodríguez Pascua et al., 2009, 2011), también subdividen éstos en primarios y secundarios, haciendo especial hincapié en los efectos geológicos secundarios cosísmicos catalogados en la Escala ESI-2007 (ver figuras 6.1 y 9.1), que permite cuantificarlos para la asignación de intensidades. Por otra parte el análisis de los efectos ambientales de los terremotos, posee especial importancia ya que las nuevas escalas de intensidades promovidas por la Unión Europea (European Macroseismic Scales, EMS) no codifican los efectos ambientales de los terremotos para la evaluación de intensidades, hecho que puede llevar a diferentes situaciones de subvaloración o sobrevaloración de la peligrosidad sísmica de una zona determinada.

Los datos sobre los que se ha diseñado la ESI-2007 indican que los efectos geológicos de los terremotos comienzan siendo patentes a partir de intensidad VI-VII, pero únicamente son relevantes a partir de intensidad IX y sólo

imprimen cambios permanentes en el paisaje a partir de intensidad X.

La ESI-2007 clasifica los terremotos en tres grandes grupos de intensidades en grado creciente según los efectos geológicos y ambientales que se producen en ellos: A) IV-VII (efectos observables); B) VIII-X (efectos permanentes y diagnósticos), y C) XI-XII (efectos característicos). Los efectos cosísmicos que se consideran se pueden dividir en primarios y secundarios. Los primarios atienden a las rupturas superficiales de falla (en sus diferentes órdenes) y son geometrías 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, liquefacciones y agrietamientos del terreno. El área máxima en la cual han podido observarse los dos primeros se utiliza como diagnóstica para asignar la Intensidad máxima macrosísmica del paleoevento y/o sismo histórico.

Dentro de los efectos secundarios no permanentes se consideran, anomalías hidrológicas (e.g. cambios de nivel de pozos, caudal de las fuentes, aparición y desaparición de manantiales, cambios de propiedades físico-químicas, enturbiamiento y temperatura del agua), 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 únicamente un registro geológico excepcional de los efectos primarios y los efectos secundarios sólo 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, como escarpes de falla, ríos represados, terrenos extensos hundidos, etc.

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.

9.1.1. Las escalas de intensidades

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 (Figura 9.2).

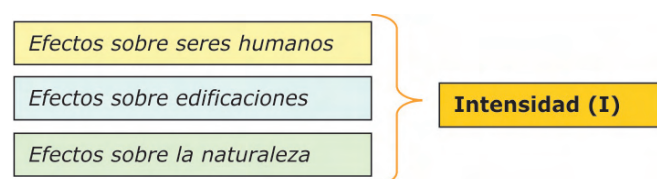


Figura 9.2. De acuerdo con la definición original de intensidad sísmica en escalas de doce grados, i.e., Escala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), Escalas Mercalli Modificadas (MM-31 y MM-56) y la Escala Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK-64). La evaluación de intensidades se basa en sus efectos sobre las personas, edificaciones y la naturaleza.

Cuando las primeras 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 sobre: seres humanos, edificaciones y 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 el 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 la 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), siendo de hecho 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; Michetti et al., 2007; Reichert et al., 2009), ofrecen evidencias sustanciales sobre el potencial informativo de los efectos ambientales y geológicos cosísmicos sobre el terreno 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 y de la arqueosismología como disciplinas científicas nuevas e independientes permite en la actualidad una cuantificación detallada sin precedentes de los efectos de los terremotos sobre la naturaleza.

Por lo tanto, hoy día, es posible incorporar características diagnósticas de los efectos naturales de los terremotos para la asignación de intensidades, el objetivo primordial de la escala ESI-2007. Su uso, junto con las escalas macrosísmicas convencionales (ver punto 9.2) 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.

Los efectos de terremotos sobre el terreno pueden ser comparables para diferentes ventanas temporales en función de la escala, ya se trate de eventos de tipo instrumental (recientes), históricos o paleosísmicos, ampliando nuestro registro 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, del desarrollo urbanístico y de los tipos de edificaciones, todos ellos presentes en diferentes zonas del planeta. Este hecho es fundamental para poder asignar intensidades sísmicas en zonas despobladas o escasamente pobladas, así como comparar eventos sísmicos en zonas densamente urbanizadas, con otras zonas de características más rurales o forestales. También posee su peso específico para poder comparar sismos de diferentes épocas históricas en las que la densidad de población y características de las zonas urbanas eran diferentes incluso para un mismo lugar.

9.1.2. 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 cual-

quier fenómeno de carácter cosísmico que perturbe el medio natural en cualquier aspecto. Es decir, se refieren 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 y a partir de un cierto umbral de intensidad. La magnitud de este tipo de deformaciones se encuentra directamente condicionada por el tamaño, y de la energía liberada, de los terremotos.

Este tipo de efectos, no sufren (en principio) ningún tipo de saturación, ya que por ejemplo se saturarían exclusivamente 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 (intensidad VIII) y el pánico generalizado (intensidad IX) que describe la escala MSK, o de la dificultad para mantenerse en pie (intensidad VIII) o algunas personas pueden ser lanzadas al suelo (intensidad 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. Estos efectos se observan comúnmente asociados a un determinado rango de intensidades en relación a sacudidas moderadas e 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 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 punto 9.3.2.

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 (poca energía) y son muy superficiales, generalmente entre 1 y 4 km, pero pueden dar lugar a efectos primarios (e.g. 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 a partir de los VIII grados. El contenido de los apartados 9.2 y 9.3 es una transcripción de la normativa de utilización, líneas guía y estructura de la Escala ESI-2007 publicada por Michetti et al. (2007).

9.2. La utilización de la escala de intensidades ESI-2007

En aquellas ocasiones en 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 específica (Figura 9.3), 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 denominados “híbridos”.

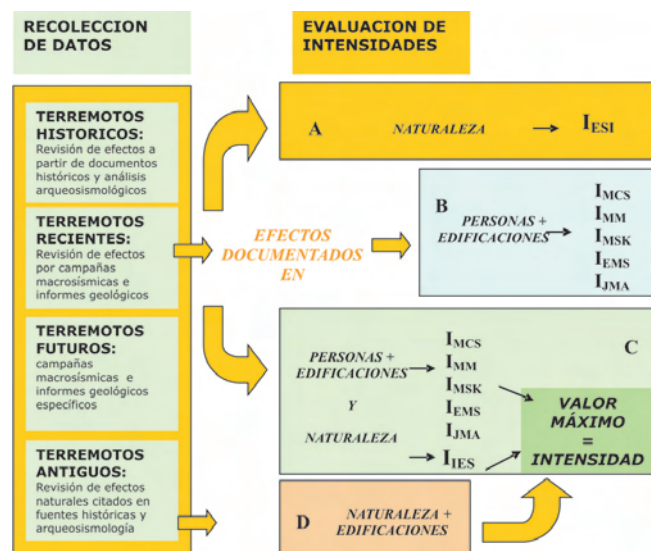


Figura 9.3. Esquema tanto para el uso individual de la Escala ESI 2007, como de uso conjunto con las escalas macrosísmicas tradicionales, basadas en los niveles de daños. Se consideran únicamente aquellas escalas macrosísmicas de uso común a nivel global, no obstante cualquier escala podría integrarse en este esquema, siguiendo una metodología similar (consultar apartado 9.2.1). Se ha incluido el análisis arqueosismológico para terremotos antiguos en los que los efectos se encuentren pobremente documentados y las descripciones sean vagas (Modificado de Michetti *et al.*, 2007).

El uso de la escala ESI-2007 como herramienta independiente (Caso A; Figura 9.3) únicamente se recomienda cuando los efectos sobre los seres humanos y/o sobre las edificaciones sean inexistentes, o que sean muy escasos (áreas despobladas, entornos rurales débilmente poblados), o bien que dichos efectos 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.

Como resultado del procesamiento de datos procedente de múltiples terremotos a nivel mundial, la escala ESI-2007 únicamente define intensidades con un nivel de confianza aceptable (superior al 90%) a partir de intensidad VII, cuando los efectos sobre el terreno comienzan generalmente a ser diagnósticos. Este nivel de confianza se 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 \geq VIII). Así la resolución de esta escala macrosísmica es progresivamente mayor cuanto mayor es la intensidad sísmica que se analiza (i.e. 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; Figura 9.3).

Cuando los efectos se encuentren documentados tanto para seres humanos y edificaciones como en la naturaleza (Caso C; Figura 9.3) de tal forma que sea posible evaluar los dos tipos de intensidades independientemente (intensidad clásica y escala ESI-2007), el valor máximo de la intensidad debe de corresponder con el valor máximo resultante de la aplicación de ambas 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 resultado 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.

Este último escenario, también es adecuado para su uso en el registro arqueosismológico de terremotos antiguos (Caso D; Figura 9.3) escasamente documentados o con pocas referencias. En este supuesto la aplicación de la escala ESI-2007 debe complementarse adecuadamente con los análisis de niveles de daños observados y analizados en los yacimientos arqueológicos.

9.2.1. Procedimiento para el uso de la escala ESI-2007 como herramienta sísmica independiente.

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

9.2.1.1. 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 presente tres puntos de información diferentes”.

Los parámetros de las rupturas superficiales de falla (efecto primario) así como el área total afectada por los 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 9.1 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 sencilla tabla (Tabla 9.1) 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, puesto que el salto entre dos intensidades distintas es de un orden de magnitud.

I_0	EFECTOS PRIMARIOS		EFECTOS SECUNDARIOS
	LONGITUD DE LA RUPTURA SUPERFICIAL	MÁXIMO DESPLAZAMIENTO O DEFORMACIÓN	ÁREA 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 9.1. Rango de los valores de asignación de los parámetros de rupturas de falla (efectos primarios) y extensión superficial típica del registro de los efectos secundarios, para cada uno de los grados de intensidad ESI-2007. (*) 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.

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 9.1 sólo 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, sólo un examen realizado por especialistas puede establecer cuales y qué tipo de efectos deben de ser incluidos o excluidos al definir el área total afectada por los efectos secundarios de un terremoto en concreto.

9.2.1.2. Intensidad Local (IL).

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 a partir de dos aproximaciones distintas:

a) Localidad-Sitio: Este tipo de aproximación se aplica cuando las descripciones de los efectos sísmicos sobre el terreno no han sido analizados de una manera homogénea a lo largo de toda la zona afectada, lo cual se encuentra comúnmente relacionada con los terremotos históricos, ya que presentan documentación puntual de efectos en localidades concretas. La principal ventaja de este tipo de aproximación es que permite comparar la escala ESI 2007 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.

b) Análisis en Malla Regular: En el caso de investigaciones de campo muy sistemáticas sobre el área afectada por un terremoto, ésta puede proporcionar datos suficientes para establecer una distribución homogénea de los

efectos ambientales cosísmicos. Esta situación es todavía infrecuente para el estudio de los 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, principalmente debido al diferente mecanismo de obtención de los mapas y a la posibilidad de que los datos “tradicionales” presenten tendencias.

9.2.2. 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 necesario 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) utilizan los “efectos máximos”, resultando ser escalas de Orden. Como consecuencia del mecanismo de definición de estas escalas, 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 obtendrá valores de intensidades más significativos físicamente hablando, que aquellos procedentes de otras escalas. Debido precisamente a esto, es muy útil el desarrollo de este tipo de escalas relacionadas con los efectos ambientales y geológicos de los terremotos.

En la práctica y 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 entre escalas, como las propuestas por Krinitzky Y Chang (1978), Reiter (1990) y Panza (2004). Por otro lado, la aplicación de estas tablas de conversión provoca frecuentemente la introducción de numerosas incertidumbres adicionales, como es el caso del uso de los “medios grados” o “fracciones de grados”, valores que no

hacen más que confundir las lecturas macrosísmicas convencionales.

MCS, MM-31, MM-56, MSK, EMS, Escala CHINA	ESI 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	

Tabla 9.II. Tabla de Correlación entre la ESI-2007 y otras escalas macrosísmicas convencionales de doce grados y la Escala Japonesa JMA (modificado de Krintzsky and Chang, 1977; Reiter, 1990; Hancox et al., 2002); “n.a.” significa “no aplicable”.

Para evitar estos inconvenientes la correlación entre las escalas macrosísmicas más importantes 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 9.II).

9.3. Estructura de la escala de intensidades ESI-2007.

La Escala ESI-2007 ha sido desarrollada para ser consistente con la Escala Macrosísmica Mercalli Modificada (MM-31, Wood y 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 in-

terna 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 qué definir cambios muy drásticos. La Escala ESI-2007 es por tanto, especialmente útil para la evaluación de intensidades en el rango de sus valores más altos y para evitar confusiones, se ha mantenido la numeración clásica en números romanos y escalada en 12 valores I-XII.

9.3.1. Principales grupos de grados de intensidad.

La Escala ESI-2007 comienza allí donde los efectos ambientales cosísmicos comienzan a ser observarse regularmente en condiciones favorables, en términos prácticos 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 y Manga, 2003 y referencias incluidas), así como las deformaciones tectónicas primarias detectadas instrumentalmente (Amoroso y 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 un grupo de datos diagnóstico.

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

I-III: No existen efectos ambientales o geológicos que puedan ser utilizados como elementos diagnósticos.

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.

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.

9.3.2. Descripción de los efectos ambientales de los terremotos.

En la descripción, se describe en primer lugar las características, la escala y el tamaño de los efectos primarios asociados a cada uno de los niveles de intensidad sísmica. 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 categorías (consultar el punto 9.2 y Tabla 9.III) ordenados por su grado inicial de ocurrencia.

Las descripciones detalladas de los tipos de efectos, dimensiones y distribución areal se puede consultar en la publicación oficial de la Escala ESI 2007 (Michetti et al., 2007) o en Reicherter et al. (2009).

EPI F	Efectos ambientales	Rango Diagnóstico de Intensidad	
	RUPTURAS SUPERFICIALES DE FALLA	VIII (*)	XII
EPI	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

Tabla 9.III. Rango diagnóstico de intensidad para cada uno de los efectos ambientales considerados por la ESI-2007. (*) 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.

9.3.2.1. Efectos Primarios.

Las dimensiones o escala de los efectos primarios se expresan en términos de dos parámetros diferentes: i) La longitud de ruptura total (SRL); y ii) Desplazamiento máximo a lo largo del plano de falla (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 ESI-07.

9.3.2.2. Efectos Secundarios.

Los efectos secundarios se clasifican en ocho grandes categorías para esta escala (Tabla 9.III). 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, para definir un valor razonable de área total afectada por efectos secundarios se recomienda la descripción y cartografía del conjunto de efectos secundarios catalogados, incluyendo aquellos que todavía no han

sido incorporados en las descripciones de los diferentes grados de intensidad de la escala (e.g. colapsos kársticos).

A. Anomalías Hidrológicas.

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

Efectos sobre las superficies 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 *run-up*, 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 dentro del rango de IX a XII. La definición del grado de intensidad es más ventajosa que aquellas propuesta para las intensidades de tsunami por Papadopoulos e Imamura (2001) y para la mayor parte de descripciones de este tipo de efectos planteadas a nivel global (e.g. 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 diagnósticos 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 se 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 determinado.

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 entre al deslizamiento y la hora origen del terremoto.

E. Agitamiento de árboles y vegetación.

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

F. Procesos de Licuefacción 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 (Rodríguez Pascua, et al. 2003, 2010).

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 consideradas como elementos diagnósticos para la asignación de intensidades.

9.4. Efectos 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 cosísmicos secundarios. Éstos poseen un grado de preservación local (deslizamientos rotacionales y escarpes de falla, terremoto de Arenas del Rey, 1884: X MSK), o prácticamente nulo (licuefacción en el terremoto de Torrevieja, 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.



Figura 9.4. 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 (Torrevieja, 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 Peca (2005). Modificado de Silva et al. (2008).

Los datos paleosísmicos y sísmicos recopilados en España (Silva et al., 2008) se centran fundamentalmente en tres zonas (Figura 9.4): (1) Las Cordilleras Béticas Orientales; (2) las Islas Baleares; (3) El sector central de las Béticas alrededor de la Cuenca de Granada y del sector central del Estrecho de Gibraltar. En el conjunto de todas estas zonas se llevan practicadas diferentes trincheras de falla así como una multitud de trabajos sobre efectos geológicos de los terremotos en diferentes tipos de ambientes geomorfológicos y escalas temporales que abarcan desde el Neógeno superior (5,5 millones de años) a la 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.

Por otro lado, los eventos instrumentales (> 1950 AD) de mayor tamaño registrados en la Península Ibérica 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 exclusivamente relacionado con el tamaño de la fuente sísmica que la genera, sino más bien 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 en estas zonas, no parece lo más adecuado ya que precisamente fueron los efectos secundarios los que amplificaron y magnificaron los daños que se encuentran tras su catalogación.

CALIDAD DE LA INFORMACION (Qg)	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	Torre Vieja, 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 9.IV. Resumen de los datos analizados para diferentes eventos sísmicos en España. En los eventos analizados sólo se muestran aquellos de los que se poseen más datos. Modificado de Silva et al. (2008).

Un resumen del estado actual del catálogo se presenta en la tabla 9.IV. En ella se muestra el nuevo índice implementado (Qg) 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 y arqueológicos (Tobarra, Albacete y Baelo Claudia, Bolonia, Cádiz). 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 bien documentadas 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 parámetros han sido implementados en la base de datos EEE (Environmental Earthquake Effects) de la Escala ESI-2007 de INQUA. En la actualidad, se encuentran en proceso de revisión y catalogación nuevos terremotos como los de Lorquí-Ceuti (1991), Jacarilla (1952), y la serie sísmica de Adra (1993-1994) (Tabla 9.V).

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 9.V. Resumen de los diferentes tipos de efectos geológicos de los terremotos analizados y catalogados para diferentes eventos sísmicos en España. Modificado de Silva et al. (2008).

10. ALCANCE Y EVOLUCIÓN FUTURA DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo trataremos aquellas cuestiones relacionadas con la aplicación de la arqueosismología y de su evolución futura, dentro de la investigación en peligrosidad sísmica y en el estudio de los yacimientos arqueológicos. Para ello, se resumen brevemente las ideas principales que se han desarrollado a lo largo de los capítulos precedentes.

Este volumen pretende introducir, desde una forma sistemática, el análisis arqueosísmico en cualquier región del mundo. Sin embargo y debido a la escasez de información sobre terremotos históricos en zonas tectónicamente moderadas (terremotos destructivos de magnitud superior a 6 cada cientos a miles de años), pensamos que su utilidad es mayor en estas zonas estables, por otro lado zonas muy bien representadas en el territorio de la Península Ibérica.

La Península Ibérica es una región rica en el desarrollo cultural del periodo arqueológico e histórico del Medi-

terráneo Occidental. Múltiples culturas se han establecido a lo largo de sus costas, adentrándose en la meseta y estableciendo diferentes asentamientos. El patrimonio cultural y arqueológico ibérico destaca por su riqueza arquitectónica, tanto de estilo constructivo defensivo (i.e. fortalezas, atalayas, castillos, etc.) como de culto (e.g. catedrales, ermitas, cruces en caminos). Este bien representado periodo cultural, arqueológico e histórico, comprende los últimos 4000 años, periodo de tiempo suficiente para reflejar en sus yacimientos la ocurrencia de antiguos terremotos que, sin duda, resultaron auténticos cataclismos en la cultura pretérita ibérica.

10.1. Alcance del análisis. Aportaciones de la metodología al conocimiento sísmico.

Este trabajo propone una metodología completa, sistemática y estructurada, para el análisis de terremotos en yacimientos arqueológicos (ver capítulos 6 y 7), así como varias aplicaciones en la Península Ibérica (ver capítulo 8). Dicha metodología comprende una serie de protocolos sencillos, de aplicación de técnicas bien conocidas y descritas en la geología estructural y que han probado, ampliamente, su valía en el estudio de la deformación sísmica a partir de datos cinemáticos y dinámicos.

Además, en este libro se han identificado y planteado los problemas principales que surgen al llevar a cabo un análisis de esta índole, sobre todo con el objetivo último de situar un terremoto antiguo a partir de los efectos en un yacimiento concreto y para un periodo cultural determinado.

La metodología aquí expuesta propone un estudio particularizado de los denominados efectos arqueológicos de terremotos (EAE) (Rodríguez-Pascua et al., 2009 y 2010). Dichos efectos arqueológicos describen estructuras de deformación en edificaciones antiguas y que responden, o bien a la sacudida sísmica (deformaciones transitorias), o bien a la deformación permanente del sustrato donde se apoyan. Las deformaciones sísmicas transitorias pueden afectar a la fábrica de los edificios, quedando reflejada en aquellos elementos estructurales que son más difíciles de re-aprovechar o reparar después de un terremoto. Como ejemplo, se han descrito con profundidad la utilización de los engatillados en los dinteles de las ventanas y en las dovelas de los arcos asociados a un periodo cultural comprendido entre el siglo XII y el siglo XIX, y particularmente en el terremoto del 1 de noviembre del año 1755, cuando ocurrió el devastador terremoto de Lisboa que asoló y destruyó parcialmente esta ciudad debido a la sacudida sísmica, al posterior tsunami y a los incendios que finalmente remató la zona.

Cuando se inicia un análisis arqueosísmico es importante conocer el alcance y las posibles limitaciones del mismo. Un análisis precipitado, con interpretaciones basadas en datos poco fiables y sin contrastar con otras fuentes o metodologías, puede llevar a banalizar estudios de estas características.

Por ello, es conveniente tener muy en cuenta el alcance del análisis, sus limitaciones, y las diferentes fuentes de información que pueden aportar datos contrastados para la interpretación de los resultados. En general desaconsejamos de forma rotunda el uso indiscriminado y particularizado del estudio de EAEs en un yacimiento concreto. Se ha reiterado constantemente a lo largo de este volumen, la mala praxis de interpretar terremotos antiguos a partir de una única estructura deformada, la cual podría tener un amplio abanico de interpretaciones y causas posibles.

Tampoco es aconsejable proponer un número mínimo de estructuras EAEs que asegure con una probabilidad elevada, que nos encontramos ante un terremoto destructivo y que aun no ha sido reconocido por estudios arqueológicos previos. Insistimos en un estudio multidisciplinar, en el criterio experto y sobre todo, en el sentido común.

Dicho sentido común emergerá con la experiencia y el estudio continuado de diferentes yacimientos arqueológicos y periodos culturales, pero sobre todo surgirá como una curiosidad científica bien entendida y una aplicación correcta de técnicas bien contrastadas: geología de terremotos, arqueología, geofísica, arquitectura, etc.

Aplicaciones de la ARQUEOSISMOLOGÍA.

La mayor aportación de la metodología propuesta en este trabajo, es la cuantificación de las deformaciones presentes en yacimientos o enclaves arqueológicos y que puedan aportar nuevos datos sobre terremotos destructivos. Esta cuantificación conlleva un análisis de la direccionalidad de los daños en relación con la localización del epicentro, definiendo un intervalo de acimuts de situación del paleoepicentro.

La aplicación de la arqueosismología a terremotos históricos bien documentados y catalogados (fecha, intensidad máxima, mapa de isosistas, etc.), podría suponer un importante avance en cuanto a la localización del epicentro, dejando de depender exclusivamente de la distribución espacial de las isosistas o líneas de misma intensidad sísmica. Ya hemos visto en el capítulo 9 como dichos datos aparecen sesgados por la presencia de poblaciones, tipo de construcción e incluso percepción del terremoto por el conjunto de una población urbana o rural.

Otra de las aportaciones de este trabajo es servir como guía básica de descripción y catalogación de datos sensibles de ser protegidos en un yacimiento arqueológico, los EAEs y que sean tenidas en cuenta para futuras actuaciones en yacimientos arqueológicos.

En algunas ocasiones, la poca información disponible para los distintos profesionales y científicos responsables de las actuaciones y estudios en yacimientos arqueológicos, produce una pérdida irreparable de información importante sobre las consecuencias del fenómeno sísmico en estos enclaves. La adopción de una perspectiva arqueosismológica en el análisis de yacimientos, edificios o conjuntos históricos abre la posibilidad de utilizar estos sitios como antiguos *seismoscopios*

(Sintubin, 2010), ofreciendo a la comunidad científica una nueva herramienta a incorporar en la ciencia de la sismología *sensu lato*.

Actualmente, el desconocimiento de las metodologías asociadas a esta nueva rama emergente de la ciencia y la falta de métodos de análisis sistemáticos como el que aquí se propone, ha hecho que la mayor parte de los yacimientos excavados en zonas tectónicamente activas de la Península Ibérica hayan pasado por alto el carácter de *seismocopios* potenciales de los sitios excavados.

En muchas ocasiones, el desconocimiento y la poca información disponible sobre estas nuevas metodologías han dado lugar a una importante pérdida de información sísmica en las propias labores de excavación, restauración o reconstrucción de yacimientos y enclaves arqueológicos. En otras ocasiones, simplemente por lo “excepcional” que puede parecer la ocurrencia de un evento sísmico destructivo en España (percepción errónea a nuestro parecer), directamente se descarta la posibilidad de asignar los daños o anomalías geoarqueológicas documentadas a un terremoto antiguo, sin siquiera realizar un análisis detallado que pudiera corroborar o no el origen de los daños observados.

Esta situación aún es más relevante, cuando en los alrededores de los yacimientos estudiados no se han catalogado sismos históricos importantes. Como norma general la comunidad científica, que incluye arqueólogos, geólogos y sismólogos, es bastante cauta y escéptica ante este tipo de logros, poniendo siempre en cuarentena y a la sombra de la duda los resultados obtenidos, más si estos conllevan una perspectiva de índole catastrófica en la interpretación de los registros geológicos recientes, arqueológicos e incluso históricos.

En España la primera noticia del posible registro arqueológico de un terremoto antiguo, aparentemente no catalogado, data del trabajo de Menateau et al. (1983) referente a las ruinas de la antigua ciudad romana de Baelo Claudia, que en aquellos momentos relacionaban tentativamente con el gran terremoto-tsunami de Creta del año 365 AD, o con posibles grandes terremotos ocurridos en la zona del Cabo de San Vicente (Portugal) entre los años 260-290 AD.

No es hasta unos doce años más tarde (Goy et al., 1995) cuando los estudios de tectónica cuaternaria realizados para el Proyecto del Enlace Fijo África-Europa a través del Estrecho de Gibraltar comienza a estudiarse el yacimiento de Baelo Claudia desde las perspectivas paleosismológicas y arqueosismológicas que se estaban aplicando ya en el Mediterráneo Oriental (e.g. Stiros y Jones, 1996). Posteriormente los trabajos de Silva et al., (2005; 2009) llevan a cabo el estudio sistemático de las deformaciones en el registro arqueológico, al que sigue la elaboración de una primera guía para el análisis de la cuantificación de las deformaciones (Giner Robles et al., 2009).

No obstante, y a pesar de todos los análisis realizados en este yacimiento, la no existencia de sismos fuertes en la zona del Estrecho, hace que los eventos sísmi-

cos detectados sean aceptados con escepticismo por mucha de la comunidad científica, fundamentalmente geológica y sismológica.

Los autores de este libro creemos firmemente que la arqueosismología puede ayudar a que se planteen otras posibilidades en el análisis de daños o estructuras en yacimientos o enclaves arqueológicos, susceptibles de tener un origen sísmico.

Y es importante destacar que, no solamente estamos hablando de hechos que aportan información para el estudio de la peligrosidad sísmica, sino que también estamos hablando de una parte de la historia del yacimiento, de catástrofes naturales asociadas a nuestra historia que podrían haber afectado al desarrollo e identidad de las diferentes culturas y sociedades que se han desarrollado en nuestro país.

Memoria histórica y patrimonio: la percepción del peligro como medida de mitigación del daño sísmico.

Como se ha introducido brevemente, el análisis arqueosismológico presenta otro tipo de connotación importante a la hora de prevenir el riesgo sísmico en zonas con periodos de retorno elevados (de cientos a miles de años para terremotos destructivos de magnitud superior a 6), como es el caso de la Península Ibérica. En estas *zonas lentas*, los periodos de retorno de grandes terremotos hace que la sociedad no sea consciente de la peligrosidad sísmica de la zona en la que reside, ya que el último terremoto destructivo pudo ocurrir hace centenares o incluso miles de años. Ese lapso de tiempo tan elevado reduce la percepción del peligro por parte de la población, y la falta de preparación de la sociedad frente a este tipo de eventos.

En nuestra opinión, la identificación e inventario de efectos de terremotos y EAEs en el patrimonio histórico y arqueológico puede concienciar a la población de la peligrosidad sísmica existente en determinadas zonas de la Península Ibérica, así como su grado de exposición a terremotos destructivos.

Esta información sobre el peligro sísmico percibida por la población, es de gran ayuda a la hora de mitigar posibles daños, diseñando planes de emergencias por parte de las administraciones públicas. Esta información no sólo contempla la mitigación del daño reduciendo la vulnerabilidad y la exposición, sino que también evalúa la pérdida de patrimonio cultural, que al fin y al cabo son las señas de identidad de un pueblo y una sociedad determinada, más aún en el caso de la sociedad mediterránea que tan bien representada está en la Península Ibérica.

Actualmente, aún son visibles efectos de terremotos destructivos, como el terremoto de Lisboa de 1775, en muchos monumentos y yacimientos arqueológicos de España. En muchos casos actuaciones de restauración sobre este patrimonio elimina por completo estos efectos que creemos tan relevantes y pedagógicos, y porque no decirlo, parte de nuestro patrimonio cultural.

Limitaciones de la metodología: ciudades “vivas” vs ciudades “muertas”.

Durante la aplicación de un estudio arqueosismológico en yacimientos o poblaciones afectadas por un terremoto, hay que tener en cuenta la historia y la cronología principal de sus periodos culturales, así como los estudios sobre la estimación de la demografía del lugar a lo largo de dichos periodos. Los datos que puede aportar el enclave pueden variar mucho dependiendo de si estamos bien en un sitio que ha tenido una ocupación continuada en el tiempo y sin abandonos (ciudad “viva”), o bien en otro sitio donde se interpretan abandonos parciales o totales como consecuencia de un terremoto (ciudad “muerta”).

Consideramos **ciudades vivas** a aquellas que no han sufrido abandonos de importancia producidos por los daños sísmicos, este tipo de asentamientos presentan una serie de características propias a la hora de realizar un análisis arqueosismológico, ya que presentan efectos post sísmicos claros y generalizados (i.e. reparaciones y construcciones antisísmicas) pero, presentan menor cantidad de efectos cosísmicos debido a la propia actividad del asentamiento. Posteriormente al terremoto, se producen numerosas reparaciones de los daños, y el asentamiento evoluciona en el tiempo eliminando gran parte de los edificios coetáneos con la actividad sísmica. Una de las ventajas de este tipo de asentamientos, es que suelen contar con abundante información histórica de los daños producidos por la actividad sísmica, aunque muchas veces no sean lo suficientemente detalladas para las necesidades en el estudio de la peligrosidad moderna. En este tipo de asentamientos es bastante complejo asignar efectos cosísmicos de forma directa a un terremoto determinado, a no ser que contemos con una detallada documentación de la época sobre el sismo.

Consideramos **ciudades muertas** a aquellas que han sufrido uno o varios abandonos a raíz de los daños sufridos por un sismo. Este tipo de asentamientos presentan un buen registro cosísmico y, en la mayoría de los casos, unos registros relativamente escasos de efectos post sísmicos en las construcciones. Este hecho es debido a que, normalmente, no se reparan los daños producidos por el terremoto. Este tipo de yacimientos, suele presentar otros problemas añadidos, y es la falta de registro histórico y la complejidad de la datación de alguno de los efectos observados, sobre todo aquellos que pueden tener diferentes orígenes genéticos distintos a la ocurrencia de un terremoto.

Todo ello influye, sobre todo, en el trabajo previo a realizar y el diseño de la campaña de recogida de datos, en cada uno de los tipos de yacimiento: en las ciudades “vivas” normalmente deberemos utilizar las fuentes de información histórica, y en el caso de las ciudades “muertas” en las que no se tenga constancia escrita de la ocurrencia del terremoto, deberemos revisar los informes de las excavaciones arqueológicas realizadas, con el fin de documentar todos los posibles efectos arqueosismológicos y que han sido eliminados, debido principalmente a la

rehabilitación o a trabajos de reconstrucción del yacimiento, en cualquier caso siempre bien intencionados.

10.2. Aplicaciones y desarrollo futuro de la metodología. Nuevas líneas de investigación. Análisis de terremotos actuales.

Todas las metodologías descritas y desarrolladas en este trabajo pueden ser mejoradas sensiblemente a partir del análisis de los efectos sobre las edificaciones provocadas por sismos recientes (o por ocurrir) registrados instrumentalmente. Este análisis cruzado puede mejorar de forma exponencial el conocimiento sobre terremotos históricos, antiguos y paleoterremotos, refinando las técnicas de cuantificación de la deformación expuestas en este volumen, evaluando su significado genético y chequeando la validez de la variable de direccionalidad en distintos tipos de escenarios sísmicos generados por fallas normales, inversas o en dirección.

De esta forma los datos arqueosismológicos podrán ser utilizados para conocer de forma más adecuada el ciclo sísmico en zonas de periodos de recurrencia elevados como es el caso de la Península Ibérica, complementando y/o ampliando los catálogos existentes (Figura 10.1). Esta mejora del conocimiento sísmico permitiría definir de forma más precisa la peligrosidad sísmica en este tipo de áreas.

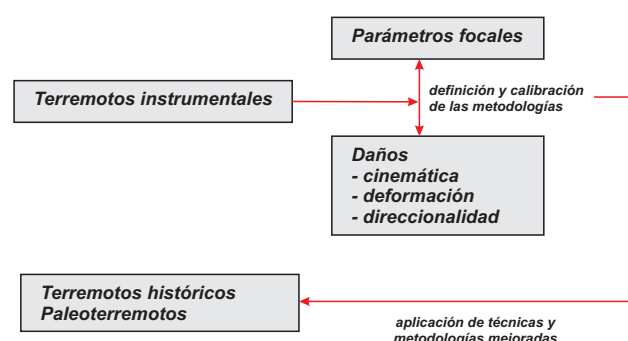


Figura 10.1. Esquema de posible mejora de las metodologías propuestas en este trabajo a partir del análisis de sismos instrumentales.

Análisis de la deformación y de los daños producidos por sismos instrumentales. Aplicación de la Escala Macrosísmica de efectos geológicos y ambientales ESI-07.

Una de las líneas de investigación con mayor proyección de futuro en relación a la metodología presentada en este proyecto, es el análisis de los efectos de los terremotos actuales (e.g. terremoto de Chistchurch 2010, de magnitud 7,1, Nueva Zelanda). Las características de la deformación (e.g. orientación, magnitud y direccionalidad) presente en enclaves afectados por terremotos recientes registrados instrumentalmente aportaría gran cantidad de información de la cinemática de los procesos. Al conocer con la instrumentación los parámetros focales del sismo, es posible calibrar los EAEs de forma que su aplicación inversa a la paleosismología y a los terremotos arqueoló-

gicos, permita reducir el grado de incertidumbre de los resultados (ver punto 6.3).

Además, la aplicación de la escala macrosísmica ESI07 a terremotos instrumentales de tamaño superior a magnitud 6, permitirá, en el futuro poder establecer una relación adecuada entre dicha escala y las diferentes escalas de intensidades utilizadas en terremotos históricos y/o instrumentales (e.g. EMS, MMS, MSK, entre otras), de forma que se puedan conocer mejor terremotos pasados (paleoterremotos, terremotos arqueológicos, e incluso históricos), e incluirlos en los catálogos históricos para su utilización en el análisis de la peligrosidad sísmica (ver capítulo 9).

Por otro lado, el hecho de que, tanto la escala arqueosísmica de los EAEs, como la escala macrosísmica ESI07, se estructuren a partir del estudio de efectos directos (cosísmicos) y efectos indirectos (post-sísmicos), permite una correlación directa entre el campo de intensidades de deformación que puedan definir. Sin embargo, este es un punto que todavía se encuentra en fase de desarrollo y serán necesarios muchos más estudios y en distintos ambientes tectónicos de todo el mundo, para poder acometer con éxito dicha empresa.

Direccionalidad de los daños: Llegada onda sísmica vs estado de deformación.

Actualmente empiezan a publicarse diferentes trabajos sobre la direccionalidad de los daños producidos por terremotos instrumentales, es decir se analizan cuales son las direcciones preferentes de los daños aunque obviando, en un principio la magnitud, de los mismos (e.g. Ghayamghamian et al, 2007; Konagai et al., 2005; Motoki y Seo, 2000).

El análisis de la direccionalidad de los daños se realiza de forma similar a la descrita a lo largo de este trabajo, aunque se consideran otros elementos estructurales más acordes con la los elementos arquitectónicos y urbanos actuales (e.g. basculamiento de farolas o semáforos, tendidos eléctricos y ruptura de carreteras asfaltadas, etc.).

En general podemos considerar que la magnitud y direccionalidad de los daños sufridos en una localidad como resultado de la acción de un terremoto están supeditados a dos factores principales (Figura 10.2): **a)** la transmisión de las ondas sísmicas desde el epicentro del sismo, que comprende la profundidad del foco sísmico, el tipo de onda transmitida, la energía liberada y las propiedades mecánicas del sustrato que atraviesa, y **b)** al comportamiento anisótropo de medio frente a las deformaciones inducidas por la energía emitida por el sismo.

Es evidente que la magnitud de los daños suele estar acorde con la distancia del enclave al epicentro (intensidad sísmica) y con la magnitud del evento ocurrido, pero en muchos casos la direccionalidad de los daños suele presentar variaciones importantes en función del acimut con respecto al epicentro y al comportamiento anisótropo del medio (e.g. efecto sitio) frente a la deformación:

- a)** La transmisión de las ondas define las orientaciones de máximo acortamiento horizontal (e_y) en el yacimiento y por tanto la orientación de los daños (direccionalidad), además de otros factores como la profundidad del hipocentro y la energía liberada que son importantes a la hora de caracterizar el tipo de onda generada.
- b)** Comportamiento anisótropo del medio. Es este punto se pueden establecer tres categorías en función de que factor induce la anisotropía y de la escala de esa anisotropía:
 - b1)** Estado de esfuerzo/deformación previo (memoria del sistema). Escala regional.
 - b2)** Efecto sitio (amplificación de las ondas por el sustito, sobre todo asociado a sustratos sedimentarios). Escala regional/local.
 - b3)** Discontinuidades arquitectónicas locales. Escala local

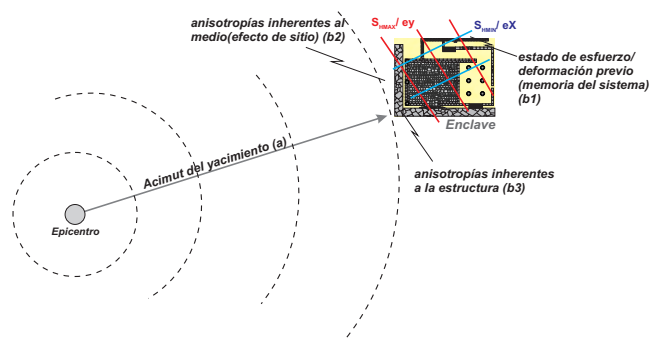


Figura 10.2. Esquema en el que se muestra los diferentes factores que influyen en la direccionalidad de los daños sufridos en un enclave como consecuencia de la ocurrencia de un terremoto: **a)** acimut del yacimiento con respecto al epicentro del terremoto; **b)** comportamiento anisótropo del medio: **b1)** estado de esfuerzo/deformación previo, **b2)** efecto de sitio y **b3)** discontinuidades arquitectónicas.

El **acimut del epicentro** con respecto a un enclave analizado **(a)**, es considerado actualmente como el factor principal que define la direccionalidad de los daños. Algunos autores (e.g. Giner et al., 2009; Silva et al., 2010; Rodríguez-Pascua et al., 2010) consideran que la direccionalidad de los daños observados en yacimientos arqueológicos, define el acimut del epicentro con respecto al enclave; siendo el sentido de los daños (ver capítulo 7) de la misma orientación pero de sentido contrario a este acimut.

El **efecto de sitio (b2)** (escala local/regional), se refiere al comportamiento del suelo/sustrato frente a las deformaciones inducidas por el paso de las ondas sísmicas, este factor es uno de los más importantes a tener en cuenta en análisis de la peligrosidad sísmica, ya que un sustrato puede aumentar la magnitud de los daños por la amplificación de la señal recibida. Este es el caso del elevado daño y múltiples muertes sufridas en México DF por el terremoto de Michoacán de 1985, o por el terremoto de Kobe en Japón, en 1996. En ambos casos, el relleno

sedimentario de tipo detrítico aumentó la respuesta del terreno al paso del tren de ondas sísmicas, junto con el elevado número de licuefacciones que se dieron a lo largo de ambas zonas urbanas, por otro lado densamente pobladas.

Sin embargo el efecto sitio no influye necesariamente en la direccionalidad de los daños observados, al contrario que la presencia cercana de grandes fracturas, o de diferencias litológicas que si pueden llegar a producir variaciones importantes en la orientación de e_y , y por tanto, en la direccionalidad de los daños (escala regional).

El **efecto de las discontinuidades locales (b3)** (escala local) tiene un efecto muy local dentro del yacimiento y es difícilmente extrapolable a otros yacimientos lejanos, aunque en algunas ocasiones puede ser determinante a la hora de interpretar los resultados (ver punto 7.2). Este tipo de efectos produce la reorientación de las trayectorias de deformación en el yacimiento y por tanto definirá la direccionalidad de los daños exclusivamente en ese punto. Este hecho puede inducir una gran cantidad de ruido en un análisis arqueosísmico, aunque con la aplicación sistemática de la metodología propuesta en este trabajo, dicha incertidumbre puede ser reducida de forma que, el resultado del análisis conjunto del enclave pueda aportarnos resultados coherentes y congruentes que permitan definir un terremoto arqueológico con garantías.

Independientemente de los factores anteriores, y como hipótesis a desarrollar en futuras investigaciones sobre terremotos antiguos, consideramos que el **tensor de esfuerzos** y la **deformación presente** en la zona analizada (**b1**) (escala regional), es un factor determinante a la hora de establecer la direccionalidad de los daños producidos por un sismo. Esta hipótesis abre nuevas líneas de investigación en lo referente a la caracterización de los daños potenciales en un enclave, ya que hasta el momento este tipo de parámetros se ha considerado de forma escasa e incompleta en los análisis de peligrosidad sísmica e influencia del efecto de sitio.

Este hecho se ha tenido en cuenta de alguna forma considerando la presencia de macroestructuras geológicas como anisotropías, y que pudieran canalizar la transmisión de la energía en la dirección de la estructura, aunque nunca se ha contemplado la posibilidad de la influencia de la anisotropía inducida por el campo de esfuerzo/deformación presente en las zonas afectadas.

En las siguientes figuras se ilustran las variaciones en la orientación y la magnitud de la deformación inducida por un terremoto, considerando la influencia del estado de esfuerzo/deformación de una zona (escala regional).

Sea un área cualquiera donde se conoce el campo de esfuerzo/deformación previo, el cual es considerado como la anisotropía más importante donde se localizan tres enclaves (Figura 10.3a). En un momento dado, se produce un terremoto en una de las fallas activas cercana (Figura 10.3b). Si consideramos que el medio por el cual se transmite esa energía es un medio homogéneo para un tren de ondas típico de un sismo (ondas P, S, L, Lg, etc), la orientación de llegada del rayo sísmico (orientación de e_y) a

cada enclave estará relacionada únicamente con el acimut de ese enclave con respecto al epicentro del terremoto. Aunque es evidente, y no debemos olvidar que en la zona del enclave esta orientación de e_y estará condicionada localmente por el efecto de sitio (b2) y por las discontinuidades arquitectónicas del enclave (b3).

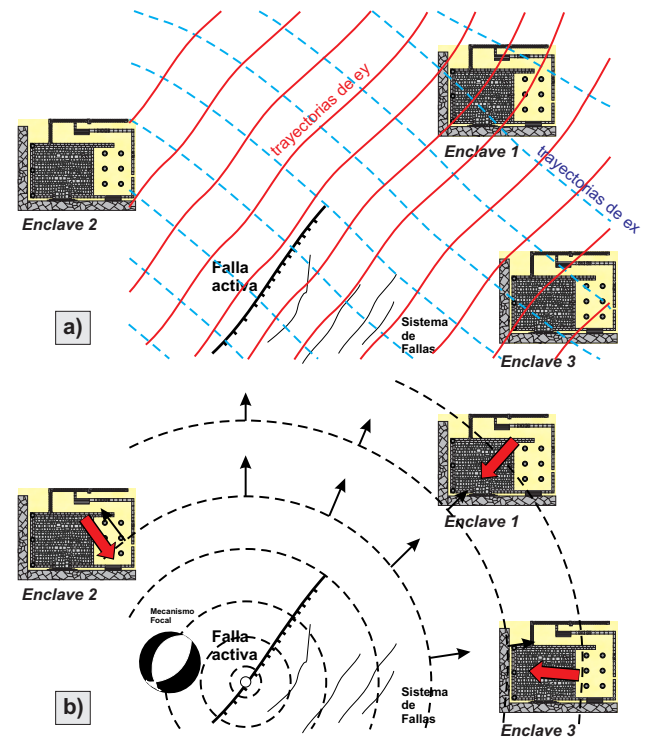


Figura 10.3. Esquema interpretativo de la influencia del campo de esfuerzo/deformación previo (líneas rojas: trayectorias de e_y , líneas azules: trayectorias de e_x) de una zona cualquiera, indicando la direccionalidad de los daños que produce un terremoto. a) estado inicial y campo de esfuerzo/deformación de la zona (campo de deformación de origen tectónico). b) transmisión teórica y simplista de la energía liberada por el sismo como un tren de ondas sencillo transmitiéndose a través un medio homogéneo. Las flechas rojas indican la direccionalidad de los daños en el yacimiento.

No obstante, si consideramos que el medio por el cual se transmite la energía liberada por el sismo no se comporta de forma homogénea, sino que esta influido por el estado de esfuerzo/deformación previo (Figura 10.4c), podemos suponer que esa deformación inducida por la sismicidad, se reorienta en función de las trayectorias de los ejes principales de deformación en cada uno de los enclaves considerados (Figura 10.4c).

Este hipotético hecho produciría la “canalización” de la deformación, y por tanto de los daños en orientaciones distintas a las definidas únicamente por el acimut del epicentro para cada enclave (Figura 10.4d). Pudiendo incluso llegar a variar la magnitud de los daños en un enclave en función de la orientación con respecto al sismo y no sólo por su distancia al epicentro. Como puede observarse en las figuras anteriores en algunos enclaves la variación de la direccionalidad de los daños es mínima (enclaves 1 y 2), pero en otras zonas (enclave 3) puede ser determinante a la hora de establecer relaciones entre los daños producidos por un mismo terremoto.

El análisis de terremotos instrumentales, considerando tanto los parámetros focales como la direccionalidad de los daños sufridos por los diferentes enclaves afectados, nos permitirá, en un futuro, calibrar el efecto del campo de esfuerzos/deformación en la direccionalidad de los daños producidos por un sismo.

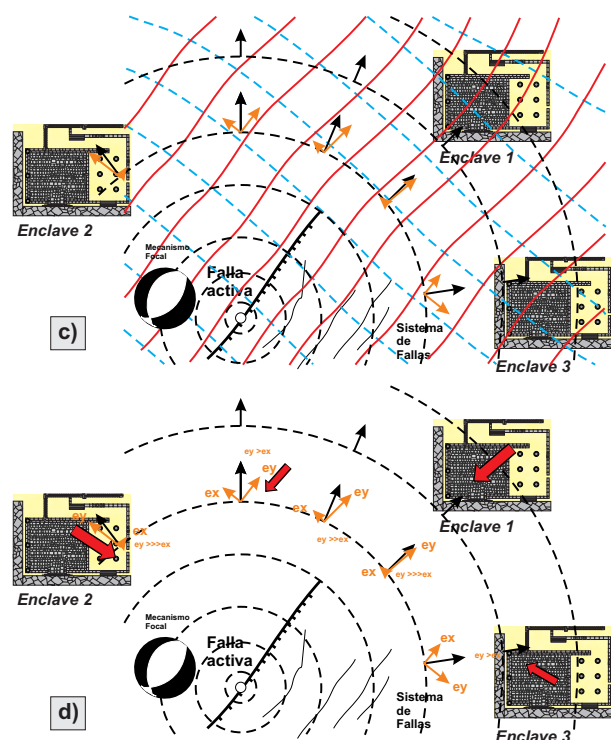


Figura 10.4. Esquema interpretativo de la influencia del campo de esfuerzo/deformación previo de una zona en la direccionalidad de los daños que produce un terremoto (continuación figura 10.3). c) Orientación resultante de la dirección de máximo acortamiento horizontal considerando la influencia del campo de esfuerzo/deformación previo. d) Variaciones en la orientación y magnitud de los ejes principales de deformación (ey máximo acortamiento horizontal; ex mínimo acortamiento horizontal) para distintos puntos a una distancia equivalente del epicentro del terremoto. La orientación de las flechas rojas define la direccionalidad de los daños, y su tamaño la magnitud en función del valor relativo de ey con respecto a ex.

Independientemente del carácter hipotético o interpretativo de la variable de direccionalidad en los efectos arqueológicos de los terremotos en relación a la orientación de los campos de esfuerzo/deformación vinculados a eventos sísmicos destructivos, desde comienzos de las década de 1990 existen análisis de teledetección que gráficamente identifican el carácter anisótropo y asimétrico de la distribución de la deformación durante un terremoto. La Interferometría Satélite Radar (InSAR) es una de las técnicas más reveladoras y prometedoras en la cuantificación de la distribución de la deformación del terreno tras un terremoto fuerte. Es conocida la ya “histórica” imagen InSAR obtenida mediante el cruce de imágenes radar tomadas antes y después del terremoto de Landers (Mw 7.3), California en junio de 1992 (Massonnet, et al., 1993). Esta imagen muestra como la distribución de la deformación sigue patrones similares a los de radiación de ondas sísmicas en campo cercano, asumiendo fuentes sísmicas

móviles (rupturas), distintos a los modelos más convencionales que consideran focos sísmicos de carácter puntual (la típica esfera focal).

Posteriormente, imágenes similares en cuanto a la distribución asimétrica de la deformación han sido obtenidas para distintos terremotos recientes, como por ejemplo los de Kobe (Mw 7.2), Japón, 1995 (Ozawa et al., 1997); Colfiorito (Mw 6.0), Italia, 1997; (Salvi et al., 2000); Hector Mine (Mw 7.1), California, 1999 (Peltzer et al., 2001); e Izmit (Mw 7.4) Turquía, 1999 (Stramondo et al., 2002). Estos ejemplos ilustran claramente que las imágenes multitemporales InSAR, representan fielmente los campos de deformación cosísmica del terreno y que estos presentan una distribución asimétrica coherente con los patrones de radiación de las ondas sísmicas y la cinemática de la fuente sísmica.

Por tanto, con este tipo de trabajos queda gráficamente demostrada la íntima relación entre los patrones de deformación del terreno y la orientación, dimensiones y cinemática de la fuente sismogénica responsable. Estos datos indican que, al menos en campo cercano (ca. 50 - 100 km alrededor del epicentro) es esperable encontrar una distribución de la deformación coherente con los análisis de cuantificación de la deformación y direccionalidad expuestos en este volumen. En campo lejano la direccionalidad de la deformación estará impuesta por el acimut del emplazamiento o sitio a analizar respecto a la localización más o menos lejana del epicentro, como se ha expuesto en capítulos anteriores.

11. CONCLUSIONES

La arqueosismología es una rama emergente de la paleosismología que combina técnicas de geología, arqueología, arquitectura, e ingeniería del terreno, cuyos resultados proveen una información muy valiosa para su implementación en los estudios de peligrosidad sísmica en España. Son precisamente las características tectónicas y sísmicas de la Península Ibérica las que la hacen muy útil para la identificación de terremotos antiguos desconocidos, y para mejorar del análisis de aquellos terremotos históricos ya catalogados. En conjunto, los datos resultantes del análisis arqueosismológico completan la historia sísmica de nuestro territorio para el periodo en que se solapan datos históricos y datos geológicos de los terremotos (ca. > 1.000/2.000 años BP).

Hoy en día es posible encontrar efectos de terremotos sobre edificios, conjuntos históricos y yacimientos arqueológicos en España y que aportan una información sísmica imprescindible, que debería implementarse adecuadamente en los catálogos existentes. A partir de lo expuesto en este volumen, se sugiere la realización de una catalogación y preservación sistemática de dichos efectos por parte de las instituciones patrimoniales españolas.

En este trabajo se han descrito un gran número de efectos de terremotos sobre edificaciones y construcciones, y se ha procedido a su clasificación sistemática agrupándolos en dos categorías: efectos cosísmicos y post

sísmicos. Ambas categorías consideran efectos primarios y secundarios sobre el terreno (geológicos) y sobre la fábrica de las construcciones. Los efectos post sísmicos también incluyen como evidencias sísmicas los procesos de reconstrucción, abandono y horizontes de destrucción evidenciados en los registros geoarqueológicos de yacimientos.

En detalle, se han considerado los efectos sobre los arcos y los dinteles de catedrales y edificios de época, así como deformaciones en pavimentos, muros, contrafuertes, estructuras columnares y bloques de sillería en yacimientos arqueológicos. Y se ha desarrollado la aplicación de técnicas de geología estructural que permite evaluar la congruencia entre los campos de deformación, que definen dichos efectos con las trayectorias de esfuerzos tectónicos y campos de deformación teóricos, y las estructuras de daños observas.

La implementación de este tipo de análisis sobre las edificaciones a terremotos recientes permitirá evaluar la congruencia de las orientaciones resultantes con los parámetros focales de los terremotos disponibles, para así poder refinar y validar las técnicas de cuantificación que se proponen en este volumen. Por otro lado, la aplicación de este tipo de análisis a terremotos históricos, permitirá obtener datos de direccionalidad para poder evaluar desde un punto de vista más realista, la localización de los epicentros macrosísmicos listados en los catálogos convencionales y, en su caso, poder identificar posibles estructuras tectónicas activas responsables de los eventos analizados. Esta metodología de análisis arqueosismológico puede aplicarse a una única construcción o edificio histórico cuando reúna una cantidad suficiente los efectos cosísmicos y/o post-sísmicos documentados. También puede aplicarse a un conjunto de construcciones (sitio) que registren varios efectos, y a una escala más amplia, sería deseable su aplicación a un conjunto de sitios (ciudades y/o yacimientos) que registren este tipo de efectos para un evento sísmico común.

En su mayoría, los efectos de los terremotos analizados en este volumen referentes a edificios históricos son consecuencia del terremoto de Lisboa de 1755, que causó la destrucción parcial de dicha ciudad y se sintió ampliamente en la mayor parte de la Península Ibérica. También se han descrito efectos de terremotos de época romana (Siglos I – III AD) en el Conjunto Histórico de Baelo Claudia (Tarifa, Cádiz) perteneciente a la Junta de Andalucía. El estudio de la deformación en dicho yacimiento muestra una amplia variedad de efectos y que cartografiados indican una clara direccionalidad de los daños que pueden ser relacionados directamente con la localización paleoepicentral ligada a estructuras tectónicas activas en la zona.

Por otro lado, los estilos arquitectónicos que se encuentran en la Península Ibérica en relación a los engatillados en arcos y dinteles pueden responder a la ocurrencia de terremotos históricos o antiguos. En muchos casos constituyen por si mismos una evidencia de carácter post sísmico, en la reconstrucción y reparación de los daños

causados por un evento. Por supuesto no es la única causa que motivó la construcción con engatillados, aunque si bien es cierto que los engatillados responden a una solución estructural para evitar que se desplacen los elementos arquitectónicos, como claves y dovelas, debido a movimientos horizontales del terreno, sean del tipo que sean.

En cualquier caso, en el ánimo de los estudios de arqueosismología está el poder utilizar los yacimientos arqueológicos de distintas épocas como verdaderos “antiguos seismoscopios”. La puesta en valor de los efectos de los terremotos en el registro arqueológico y arquitectónico histórico, servirá para que las administraciones públicas, y la sociedad en general, tomen conciencia de la inevitable convivencia de las sociedades modernas (actuales y futuras) con el fenómeno sísmico, para así poder adaptar su desarrollo de la mejor manera posible que permita mitigar los daños que necesariamente se producirán.

Finalmente, animamos a todos los científicos que trabajan en los estudio sobre peligrosidad sísmica y arqueología a que incorporen dichas técnicas en los futuros estudios con el fin de entender la historia de dichos yacimientos, y evidentemente también para mejorar el diseño de los mapas de peligrosidad sísmica en la Península Ibérica.

BIBLIOGRAFÍA

- Altunel, E. Evidence for Damaging Historical Earthquakes at Priene, Western Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 7.1998; 25-35.
- Ambraseys E. Earthquakes and archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 2006, 33: 1008-1016.
- Amoruso A. y Crescentini L. Coseismic and aseismic strain offsets recorded by the Gran Sasso Strainmeter. *Phys.Chem. Earth (A)*. 1999; 24, 2, 101-104.
- Angelier, J., y Mechler, P. Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalement utilisable en tectonique et sismologie: La methode des diedres droits, *Bull. Soc. Geol. Fr.* 1977; 19(6): 1309-1318.
- Asensio Esteban, J.A. El gran aparejo en piedra en la arquitectura de época romana republicana de la provincia hispania citerior: el opus siliceum y el opus quadratum. *Saldvie*. 2006; nº6, pp. 117-159.
- Arcos, H. y Portu M. C. Movimientos sísmicos y estructuras murarias, Consorcio de Compensación de Seguros. Madrid. 2003; 323 pp.
- Azzaro R. Earthquake surface faulting at Mount Etna Volcano (Sicily) and implications for active tectonics. *Journal of Geodynamics*. 1999; 28 (2-3), 193 – 213.
- Bendala M. y Blázquez, J. Arquitectura militar púnico-helenística en Hispania. *CuPAUAM* 28-29. 2003; pp. 145-158.
- Boer J.Z. and Hale, J.R. The geological origins of the oracle at Delphi, Greece. In: McGuire, W.J., Griffiths, D.R.. 2000.
- Buck, V. & Stewart, I. A critical reappraisal of the classical texts and archaeological evidence for earthquakes in the Atalanti region, central mainland, Greece. In: McGuire, W.J., Griffiths, D.R., Hancock, P.L. and I.S. Stewart. *The Archaeology of Geological Catastrophes*. Geological Society of London Special Publication. 2000, 171, 33-44.

- Carreño E., Benito, B., Martínez Solares, J. M., Cabañas, L., Giner, J., Murphy, P., López, C., Del Fresno, C., Alcalde, J. M., Gaspar-Escribano, J. M., Antón, R., Martínez-Díaz, J., Cesca, S., Izquierdo, A., Sánchez Cabañero, J. G. y Expósito, P. The 7 June 2007 mbLg 4.2 Escopete Earthquake: An event with significant ground motion in a stable zone (Central Iberian Peninsula). *Seismological Research Letters*; November/December. 2008; v. 79; no. 6; p. 820-829.
- Cassinello Plaza, M. J. Trazado y Estabilidad de la Arquitectura Gótica. Tesis doctoral. 2003
- Cassinello Plaza, M. J. Racionalidad sísmica en la arquitectura ojival: tipos estructurales y constructivos. En: actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz. 2005.
- Cejka, J. Tonnengewölbe und Bogen islamischer Architektur. Wölbungstechnik und Form. Dissertation: München. Techn. Univ. Fachbereich Architektur. 1978.
- Davison, C. On scales of seismic intensity and on the construction of isoseismal lines. *Bull. Seis. Soc. Am.* 1921; 11, 95-129.
- Dengler L. & McPherson R. 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.* 1993; 83, 4 1081-1094.
- Dowrick D. J. The Modified Mercalli earthquake intensity scale-Revisions arising from recent studies of New Zealand earthquakes. *Bull. Of new Zeal. Nat. Soc. For earthquake Engineering.* 1996; vol 29, n.2, 92-106.
- Durán, F. Estudio sobre las bóvedas de los puentes romanos. Nuevos elementos de Ingeniería Romana. III congreso de obras públicas romanas. Astorga (León). 2006; pp.131-142.
- Esposito E., Porfido S., Mastrolorenzo G., Nikonov A.A. & Serva L., Brief review and preliminary proposal for the use of ground effects in the macroseismic intensity assessment. *Proc. 30th International Geological Congress, Beijing, China, vol 5. Contemporary lithospheric motion seismic geology, the Netherlands, VSP ed., ISBN: 90-6764-269-X.* 1997; 233-243.
- Evans, A. The Palace of Minos at Knossos II. MacMillan. London. 1928.
- Galadini, F., Hinzen, K.-G. and Stiros, S.C. Archaeoseismology at the Beginning of the 21st Century. *Journal of Seismology*, 10 (4), Special Issue.2006; pp: 393-537.
- Galadini, F., K. G. Hinzen, and S. C. Stiros. Archaeoseismology: methodological issues and procedure. *Journal of Seismology.* 2006; 10: 395-414.
- Ghayamghamian, M.R., Tobita, T., Iai, S., Kang, G. Direccionalidad Reconnaissance Report of July 16, 2007 Niigata-Ken Chuetsu-Oki, Japan, Earthquake. Technical Note (Archive of SID). Spring and Summer. 2007; Vol. 9, No. 1, 2 / 73.
- Giner-Robles, J.L M.A. Rodríguez-Pascua, R. Pérez-López, P.G. Silva, T. Bardají, C. Grützner & K. Reicherter (Eds.). Structural analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain), J.L. Giner-Robles, 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th- 13th September, p. 47. Baelo Claudia, Spain. 2009.
- Grützner, C. The Baelo Claudia earthquake problem. PhD Thesis. RWTH Aachen University (Germany). 2011; 139 pp.
- Guerrieri, L., Vittori, E., Comerci, V., Esposito, E., Porfido, S., Michetti, A.M., Serva, L., Silva, P.G. Mapping and cataloguing earthquake environmental effects for seismic hazard assessment: the contribute of remote sensing techniques. 33rd Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE). Stressa, Italia. 2009.
- Guidoboni, E. I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area Mediterranea: storia, archaeologia, sismologia Bologna. SGA-Instituto Nazionale di Geofisica. 1989.
- Guidoboni, E., Muggia, A. & Valensise, G. Aims and methods in territorial archaeology: possible clues to a strong fourth-century AD earthquake in the Straits of Messina (southern Italy). In: McGuire, W.J., Griffiths, D.R., Hancock, P.L. and I.S. Stewart. The Archaeology of Geological Catastrophes. Geological Society of London Special Publication. 2000; 171, 45-70.
- Hancock, P.L. and I.S. Stewart. The Archaeology of Geological Catastrophes. Geological Society of London Special Publication. 2001; 171, 45-70.
- Hancox G.T., Perrin N.D. & Dellow G.D. Recent studies of historical earthquake-induced landsliding, ground damage, and MM intensity in New Zealand. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering.* 2002; 35 (2), 59-95, ISSN 1174-9857.
- Harrison John P y Hudson John A. Engineering rock mechanics: An introduction to the principles. Pergamon. 1997; 445 pp.
- Hinzen, K.G. Dynamic response of simple structures. In: R. Pérez-López, C. Grützner, J. Lario, K. Reicherter and P.G. Silva (eds). Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone. Abstracts Volume of the 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th- 13th September. 2009; p. 47. Baelo Claudia, Spain.
- Hinzen, K.G., Fleischer, C., Reamer, S.K., Schreiber, S., Schütte, S. and Yerli, B. Quantitative methods in archaeoseismology. In: R. Pérez-López, C. Grützner, J. Lario, K. Reicherter and P.G. Silva (eds). Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone. Abstracts Volume of the 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September. 2009; p. 50. Baelo Claudia, Spain.
- Huerta, S. Mecánica de las bóvedas de la Catedral de Gerona. En: Seminari sobre l'estudi i la restauració estructural de les catedrals gotiques de la corona catalano-araonesa. Miquel Llorens, Lluís Torres, Pere Roca i Josep L. Conzalez (eds.) 2001; pp. 179-204.
- INQUA Scale Project. Available online at http://www.apat.gov.it/site/en-GB/Projects/INQUA_Scale. 2007
- Iriarte, A. La muralla tardorromana de Iruña/Veleia. *Bliblid*, 1137-4489, 9, pp. 699-733.1997.
- Jones, R.E. y Stiros, S.C. The advent of archaeoseismology in the Mediterranean. In: McGuire, W.J., Griffiths, 2000.
- Karcz, I., Kafri, U. Evaluation of supposed archaeoseismic damage in Israel. *Journal Archaeological. Science.* 1978; 5: 237- 253.
- Kamai, R. and Hatzor, Y.H. Numerical analysis of block displacements in ancient masonry structures: a new method to estimate historic ground motions: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.* 2007; 32, 1321-1340.
- Konagai, K., Akbari, A., Oguni, K., Kodama, H., Ikeda T. Provisional report of the damage caused by muzaffarabad earthquake of october 8. 2005; Pakistan, 17 pp.
- Korjenkov, A. and Kaiser D. Historical-macroscopic study of the town church in Wittstock, northern Germany. In: Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece. 2003.
- Korjenkov, A., Baipakov, C. Chang, Y. Peshkov T. Savelieva. Traces of Ancient Earthquakes in Medieval Cities Along the Silk Road, Northern Tien Shan and Dzhungaria. *Turkish Journal of Earth Sciences.* 2003;12, 241-261.
- Kovach, R. L. Early earthquakes of the Americas. Cambridge University Press. Cambridge. 268 p. 2004.
- Krinitzky, E.L. & Chang, F.K. Intensity-related earthquake ground motions. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists.* 1988; 25, 425-435.

- Lanciani, R. Segni di Terremoti negli edifizii di Roma Antica. Bull. Della Comm. Arch. Comunale Roma, 1-30. 1918.
- Lander J.F., Whiteside L.S. & Lockridge P.A. Two Decades of Global Tsunamis 1982-2002. The International Journal of The Tsunami Society (21) 1, NOAA - NGDC, Boulder, Colorado USA. 2003; 73 pp.
- Laouami N., Slimani, A., Bouhadad, Y., Chatelain, J.L. y Nour, A. Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: Consequences on damage distribution and the Algerian seismic code. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26. 2006; pp. 991-1003.
- Luque, L., Zazo, C., Lario, J., Goy, J.L., Civis, J., González-Hernández, F.M., Silva, P.G., Dabrio, C.J.. El efecto del tsunami de 1755 en el litoral de Conil de la Frontera (Cádiz). In: Baquedano, E., Rubio, S. (Eds.), Miscelánea en Homenaje a Emiliano Aguirre, Volumen I, Geología, pp. 72-82. Museo Arqueológico Regional, Alcalá de Henares. 2004.
- Marco, S. (2008). Recognition of earthquake-related damage in archaeological sites: Examples from the Dead Sea fault zone. Tectonophysics, 453, 148-156.
- Martín Escorza, C. El gran terremoto de 1755 de Lisboa en la zona de la Rioja y regiones próximas. Kalakorikos, 11, 2006, pp.: 235-246.
- Martínez Solares, J.M. Los efectos en España del terremoto de Lisboa. Monografía nº 19. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 756 pp. 2001.
- Martínez Solares, J.M., Mezcua, J. Catálogo Sísmico de la Península Ibérica. Monografías IGN, 18. IGN, Madrid, 253 pp. 2002
- Martínez Vázquez, F. El terremoto de Lisboa y la Catedral de Coria (vicisitudes del Cabildo) 1755-1759. Ed. Ayto. Coria. 189 pp. 1999.
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., and Rabaute T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. Nature, 8 July.1993; 364, 138-142.
- McGuire, W.J., Griffiths, D.R., Hancock, P.L. and Stewart, I.S. The Archaeology of Geological Catastrophes. Geological Society of London Special Publication, nº 171. 417pp. 2000.
- Menanteau, L., Vanney, J.R. & Zazo, C. Belo II : Belo et son environment (Detroit de Gibraltar), Etude physique d'un site antique. Pub. Casa de Velazquez, Serie Archeologie 4., Ed. Broccard, París. 1983.
- Michetti, A.M. et al. Intensity Scale ESI-2007. Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia, 74. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia. 2007
- Michetti A. M., E. Esposito, Gürpınar, J. Mohammadioun, B. Mohammadioun, A., S. Porfido, E. Rogozhin, L. Serva, R. Tatevossian, E. Vittori, F. Audemard, V. Commerci, S. Marco, J. McCalpin & N.A. Möner. 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 LXVII. (E. Vittori & V. Commerci eds.), 115 pp. 2004
- Monaco, C. and Tortorici L. Faulting and effects of earthquakes on Minoan archaeological sites in Crete (Greece). Tectonophysics. 2004; 382, 103- 116.
- Montgomery D.R. & Manga M. (2003). Streamflow and Water Well Responses to Earthquakes. Science, 300, 27 June 2003, 2047-2049. 2003.
- Motoki, K y Seo, K. Strong Motion Characteristics Near The Source Region Of The Hyogoken-Nanbu Earthquake From Analyses Of The Directions of Structural Failures. 12WCEE, 959-965.2000.
- Nikonov, A. On the methodology of archaeoseismic research into historical monuments. In: Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites (G. Marinou and G. Koukis, Eds.). Balkema, Rotterdam. 1325-1320.1988.
- Noller, Wells, Reinhardt & Rothaus. Episodic Subsidence at Kenchrai, Greece. Recent Considerations and Concerns En: "Late Quaternary coastal changes in Samos Island, Greece. Morphotectonics, palaeoseismology, archaeology" Eds: Stiros, S.C. and Pirazzoli, P.A. Guide Book for the Gulf of Corinth Field Trip, Joint Meeting on Rapid Coastal Changes in the Late Quaternary. IGCP-367, INQUA Shorelines Comm. and INQUA Neotectonics Comm. 1988.
- Nur, A. and Ron, H. And the Walls Came Tumbling Down: Earthquake History in the Holyland. In: Stiros and Jones, Archaeoseismology. British School at Athens. Fitch Laboratory Occasional Paper nº 7. p. 75-86. 1996.
- Nur, A. and H. Ron. Armageddon's Earthquakes. International Geology Review. 1997; 39, 532-541.
- Nur, A. y Cline, E. H. Poseidon's horses: Plate tectonics and earthquakes storms in the Late Bronze Age Aegean and Eastern Mediterranean. Journal of Archaeology Science. 2000; 27, 43-63.
- Ozawa S., Murakami M., Fujiwara S. and Tobita T., Synthetic aperture radar interferogram of the 1995 Kobe earthquake and its geodetic inversion. Geophys. Res. Lett. 1997; 24, 2327-2330.
- Panza G.F. Correlation among intensity scales. Downloadable from http://www.apat.gov.it/site/en-GB/Projects/INQUA_Scale/Documents/, 15 p., Trieste. 2004.
- Papadopoulos, G.A. & F. Imamura. Proposal for a new tsunami intensity scale. Proc. Internat. Tsunami Conference, Seattle, 7 - 9 August 2001. 2001; 569 - 577.
- Peltzer G., Crampé F., and Rosen P. The Mw 7.1, Hector Mine, California earthquake: surface rupture, surface displacement field, and fault slip solution from ERS SAR data. Earth and Planetary Sciences 333. 2001; 545-555.
- Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Silva P. G., James L. Bischoff, Lewis A. Owen, Jorge L. Giner-Robles, and Andres Díez-Herrero. Lichenometry dating of rock collapse related to the great Lisbon Earthquake (1755) at the SE part of Spain. Geophysical Research Abstracts, ON-LINE Earth Journal, Vol.12: 1-2. EGU - Electronic abstracts of 7th European Geophysical Union, General Assembly. 2010.
- Pérez-López, R., C. Grützner, J. Lario, K. Reicherter and P.G. Silva (eds). Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone. Abstracts Volume of the 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September, p. 139. Baelo Claudia, Spain. ,2009
- Philip, H and Cisternas, A. El terremoto del Asnam del 10 de octubre de 1980. En: Mecanismo de los terremotos y tectónica. Eds: Udías, A.; Muñoz, A. y Buforn, E. Ed. U.C.M. 1983; 175-196. Madrid.
- Postpischl D. Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980. CNR-PFG 114-. 2B: 238 pp.1985
- Rapp, G. Earthquakes in the Troad. In: Troy: The archaeological Geology (G. Rapp and J.A. Gifford, Eds.). Princeton. 43-58. 1982
- Reches, Z. Faulting of rocks in three-dimensional strain fields, II, Theoretical analysis, Tectonophysics. 1989; 95, 133- 156.1989
- Reiter L. Earthquake Hazard Analysis. Issues and insights. Columbia University Press, New York, 254 pp. 1990.
- Richter C.F. Elementary Seismology, 768 p., W H Freeman & Co, San Francisco. 1958.
- Rodríguez-Pascua, Miguel Angel, Raúl Pérez-López, Jorge L. Giner-Robles, Pablo G. Silva, Victor H. Garduño-Monroy and Klaus

- Reicherter. (2009a). A comprehensive classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for structural strain analysis in Archaeoseismology. In: R. Pérez-López, C. Grützner, J. Lario, K. Reicherter and P.G. Silva (eds). Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone. Abstracts Volume of the 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September, p. 110. Baelo Claudia, Spain. 2009.
- Rodríguez-Pascua, M.A.; R. Pérez-López; J.L. Giner-Robles; P.G. Silva; V.H. Garduño-Monroy and K. Reicherter. A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) in Archaeoseismology: application to ancient remains of Roman and Mesoamerican cultures. *Quaternary International*. In press. QUATINT-D-10-00171R2. 2011.
- Rodríguez-Pascua, M.A.; R. Pérez-López; J.L. Giner-Robles; P.G. Silva; V.H. Garduño-Monroy; K. Reicherter. Nueva tabla de clasificación de Efectos Arqueológicos de Terremotos. *Tierra y Tecnología*. 2010; 38: 59-65.
- Rodríguez-Pascua M.A., De Vicente, G.; Calvo, J.P. y Pérez-López, R.. Similarities between Recent Seismic Activity and Paleoseismites during the Late Miocene in the External Betic Chain: Relationship by "b" Value and the fractal dimension. *JOURNAL OF STRUCTURAL GEOLOGY*. 2003; 25 (5): 749-763, doi:10.1016/S0191-8141(02)00078-0.
- Rodríguez-Pascua M. A., V. H. Garduño-Monroy, I. Israde-Alcántara, R. Pérez-López. Estimation of the paleoepicentral area from the spatial gradient of deformation in lacustrine seismites (Tierras Blancas basin, México). *Quaternary International*. 2010; 219: 66-78.
- Reicherter and P.G. Silva (eds). Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone. Abstracts Volume of the 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September, p. 132. Baelo Claudia, Spain. 2009.
- Salvi, S., Stramondo, S., Cocco, M., Tesauro, M., Hunstad, I., Anzidei, M., Briole, P., Baldi, P., Sansosti, E., Fornaro, G., Lanari, R., Doumaz, F., Pesci, A., Galvani, A., Modeling coseismic displacements resulting from SAR interferometry and GPS measurements during the Umbria-Marche seismic sequence. *Journal of Seismology*. 2000; 4, 479-499.
- Serva L. Ground effects in intensity scales. *Terra Nova*. 1994; 6, 414-416.
- Silva, P.G., Borja, F., Zazo, C., Goy, J.L., Bardají, T., De Luque, L., Lario J., Dabrio, C.J. Archaeoseismic record at the ancient Roman City of Baelo Claudia (Cádiz, south Spain). *Tectonophysics*. 2005; 408 (1-4): 129-146.
- Silva, P.G., Reicherter, K., Grützner, Ch., Bardají, T., Lario, J., Goy, J.L., Zazo, C. and Becker-Heidmann, P. Surface and subsurface palaeoseismic records at the ancient Roman city of Baelo Claudia and the Bolonia Bay area, Cádiz (south Spain). *Geological Society of London, Special Publication*. 2009; 316: 93-121.
- Silva, P.G., Rodríguez Pascua, M.A., Pérez López, R., Giner-Robles, J.L., Lario, J., Bardají, T., Goy, J.L. and Zazo, C. Geological and archaeological record of the 1504 AD Carmona earthquake (Guadalquivir Basin, South Spain): a review after Bonsor, 1918. In: R. Pérez-López, C. Grützner, J. Lario, K. Reicherter and P.G. Silva (eds). Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone. Abstracts Volume of the 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September, p. 139. Baelo Claudia, Spain. 2009b.
- Sintubin, M. and Stewart, I. S. A Logical Methodology for Archaeoseismology: A Proof of Concept at the Archaeological Site of Sagalassos, Southwest Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2008; 98 (5), 2209-2230.
- Sintubin, M., Stewart, I.S., Niemi, T. and Altunel, E. Archaeoseismology: past, present and future. In: R. Pérez-López, C. Grützner, J. Lario, K. Reicherter and P.G. Silva (eds). Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone. Abstracts Volume of the 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September, p. 143. Baelo Claudia, Spain. 2009.
- Sillières, S. Baelo Claudia: Una ciudad Romana de la Bética. Junta de Andalucía- Casa de Velázquez, Madrid. 1997.
- Stiros, S. Earthquake effects on Ancient Constructions. In: *New Aspect of Archaeological Science in Greece* (R.E. Jones and H.W. Catling, Eds.). British Schools at Athens, Fitch Occasional Paper. 1988a; 3, 1-6.
- Stiros, S. Archaeology, a tool to study active tectonics – The Aegean as a case study. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*. 1988b; 13, 1636-1639.
- Stiros, S. and Jones, R.E. Archaeoseismology. *Institute of Geology and Mineral Exploration. Fitch Laboratory Occasional Paper*. Stiros S., and Jones, R.E., Eds. Atenas. 268 p. 1996.
- Stiros, S. C. Identification of Earthquakes from Archaeological Data: Methodology, Criteria and Limitations. In: Stiros, S. and Jones, R., eds., Archaeoseismology. Fitch Laboratory Occasional Paper 7. British School at Athens. 1996; 129-152.
- Stramondo S., Cinti F. R., Dragoni M., Salvi S., Santini S. The August 17, 1999 Izmit, Turkey, earthquake: new insights on slip distribution from dislocation modeling of DInSAR and surface offset. *Annals of Geophysics*. 2002; 45 (3/4), 527-536.
- Urbina, F. y Camacho, H. La zona megaseísmica Acambay – Tixmadege, estado de México, movida el 19 de noviembre de 1912. *Boletín del Instituto Geológico de México*, 32, 125 p. 1913.
- Wallace, R.E. (ed.) *Active Tectonics*. Studies in Geophysics, National Academy Press, Washington, 266 pp. 1986.
- Wang J. Historical earthquake investigation and research in China. *Annals of Geophysics*. 2004; 47 (2/3), 831-838.
- Wood, H.O. & Neumann, F. Modified Mercalli Intensity Scale of 1931. *Bull. Seis. Soc. Am.* 1931; 21. 277-283.
- Xie Y. A new scale of seismic intensity adapted to the conditions in Chinese territories. *Acta Geophysica Sinica*, 6-1, 35-47. (in Chinese). 1957.

Conflicto de intereses

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este proyecto. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.

ANEXO I: FICHAS DE CONSULTA RÁPIDA DE LOS EAE'S MÁS COMUNES

En este anexo se presentan fichas de consulta rápida para algunos de los EAE's que más comúnmente se han descrito en la literatura científica como efectos asimilables a daños sísmicos. No obstante es necesario consultar el documento para poder establecer un análisis adecuado (ver capítulos 6 y 7).

Ficha 1: Muros basculados

Ficha 2: Muros plegados (I)

Ficha 3: Muros plegados (II)

Ficha 4: Plegamientos en pavimentos

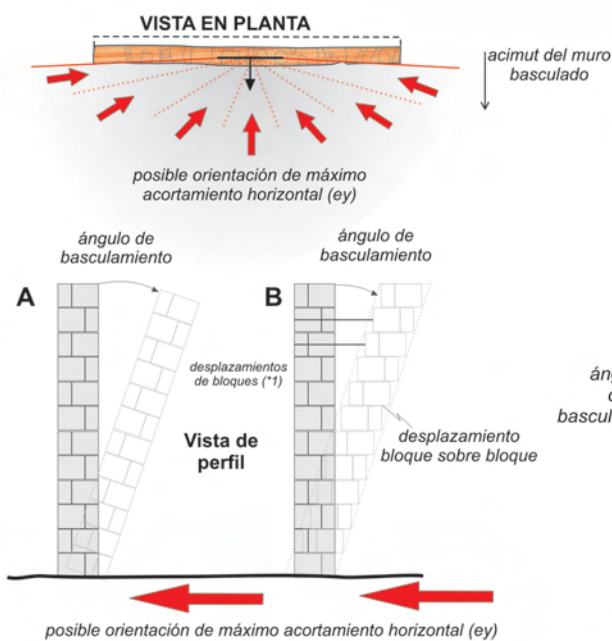
Ficha 5: Dovelas desplazadas (I)

Ficha 6: Dovelas desplazadas (II)

Ficha 7: Caída orientada de columnas

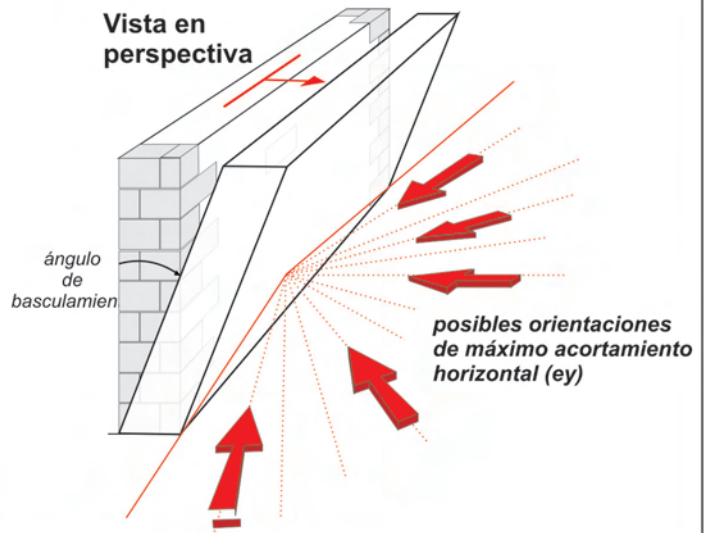
Ficha 8: Roturas en esquinas de bloques

Evaluación del Daño Sísmico en Edificios Históricos: Aplicación al estudio del riesgo sísmico



nombre estructura:
Muros basculados

Vista en
perspectiva



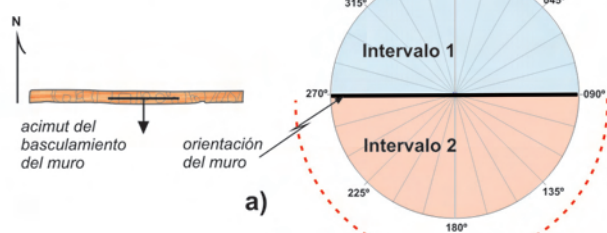
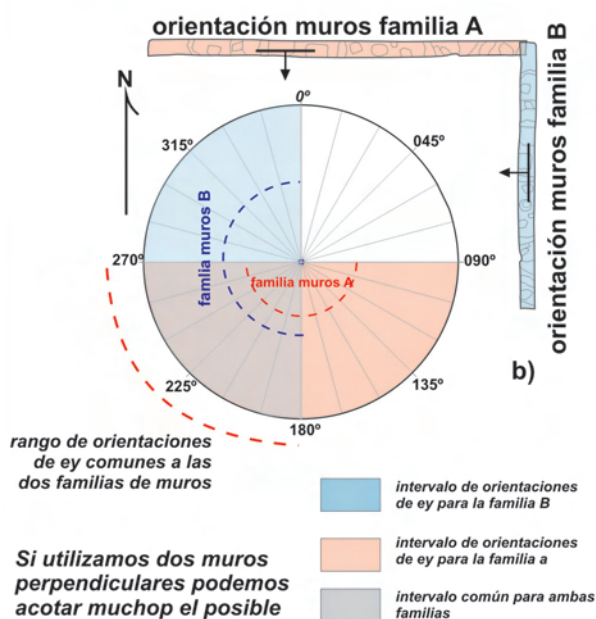
- **morfología.** Muros basculados, como una unidad o presentando desplazamiento de bloques sobre bloque. Este tipo de efectos da más información si se realiza un análisis conjunto de estructuras.

● símbolo cartográfico



● medida y representación

La orientación del muro presenta dos intervalos posibles de ey, el intervalo elegido será el que coincida con el acimut del basculamiento o colapso. En este caso el intervalo 2, (090° to 270°)



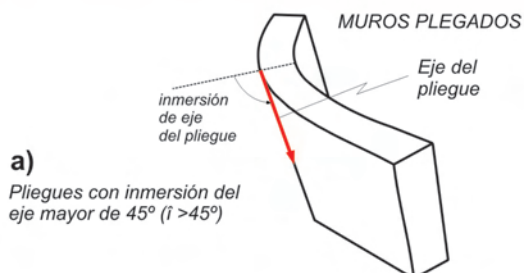
rango de orientaciones de ey para el muro (intervalo 2)



Evaluación del Daño Sísmico en Edificios Históricos: Aplicación al estudio del riesgo sísmico



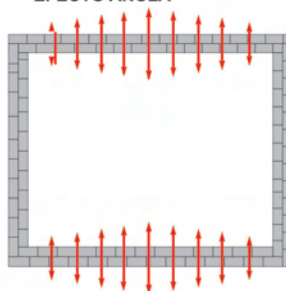
nombre de la estructura:
MUROS PLEGADOS



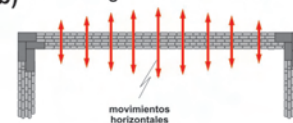
interpretación. El movimiento diferencial de las partes del muro debido a los efectos de anclaje con otras estructuras o muros (a) (EFECTO ANCLA), produce el movimiento diferencial de los bloques o ladrillos del muro (c), produciendo el plegamiento del mismo.

morfología. Muros plegados. Podemos definir dos tipos de pliegues: a) con inmersión del eje del pliegue mayor de 45°; b) pliegues con inmersión del pliegue menor de 45°. Este tipo de estructuras suele ser más común en muros con mortero entre los ladrillo o bloques.

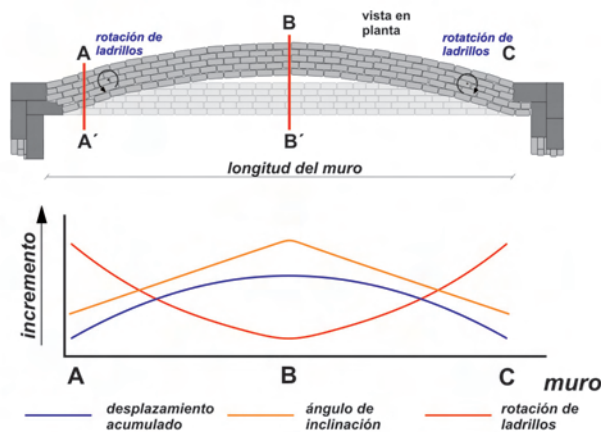
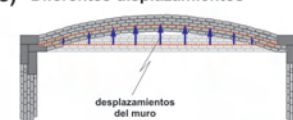
EFECTO ANCLA



b) Diferentes grados de oscilación



c) Diferentes desplazamientos



medidas y representación

En este tipo de pliegues se debe considerar el ángulo de máxima inclinación del muro y el desplazamiento máximo acumulado.

Estos dos factores son dependientes, ya que el ángulo de máxima inclinación depende directamente del desplazamiento en cada parte del muro. Ambos valores aumentan hacia la zona central del muro.

Para cuantificar la deformación en este tipo de estructuras, podemos considerar dos tipos de medida:

- ángulo de inclinación
- desplazamiento acumulado

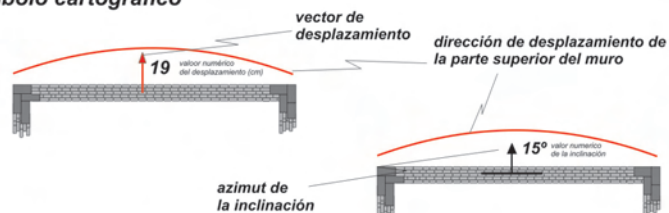
En ambos casos se debe analizar ponderando la longitud del muro (en muros de menor longitud, la deformación será menor).

Además, ambas medidas deben ser las máximas que se observan en el muro (variación de los valores en función de su posición con respecto a los extremos del muro, efecto ancla).

En el caso de la medida de los desplazamientos acumulados debemos tener en cuenta además la altura del muro en la que se realiza la medida (h); ya que el desplazamiento acumulado aumenta con la altura.

En este caso se deben realizar medidas siempre a la misma altura del muro para poder comparar los valores obtenidos. Es recomendable realizar varias medidas a diferentes alturas para no tener problemas a la hora de comparar muros diferentes.

símbolo cartográfico



Referencias

Ambraseys (2006), Korjenkov and Kaiser (2003), Korenkov et al. (2003), Marco (2008), Silva et al. (2005), Silva et al. (2009)

tipo de dato

línea (L1, eje pliegue), línea (L3, vector de desplazamiento), orientación única
dato complementario

Evaluación del Daño Sísmico en Edificios Históricos: Aplicación al estudio del riesgo sísmico



nombre de la estructura:
MUROS PLEGADOS

b) Pliegues con inmersión del eje menor de 45° ($i < 45^\circ$)

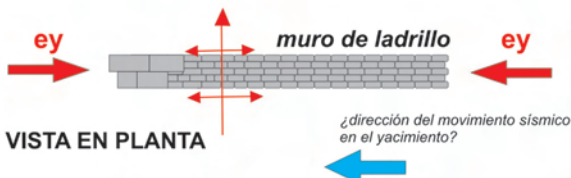


interpretation

Plegamientos producidos por diferente comportamiento de los muros frente a la deformación, debido a sus características constructivas. La presencia de muros de sillería, más rígidos que los muros de ladrillo puede reducir el grado de libertad de las oscilaciones de un muro en uno de sus extremos, e inducir el plegamiento del muro para acomodar esa falta de espacio.

medida y representación

En este tipo de EAE, medimos la orientación de los ejes directamente, o bien medimos la orientación de los planos que lo definen, para posteriormente definir el eje. La dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) es perpendicular a la orientación del eje.



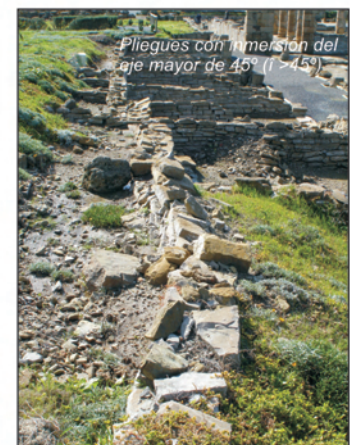
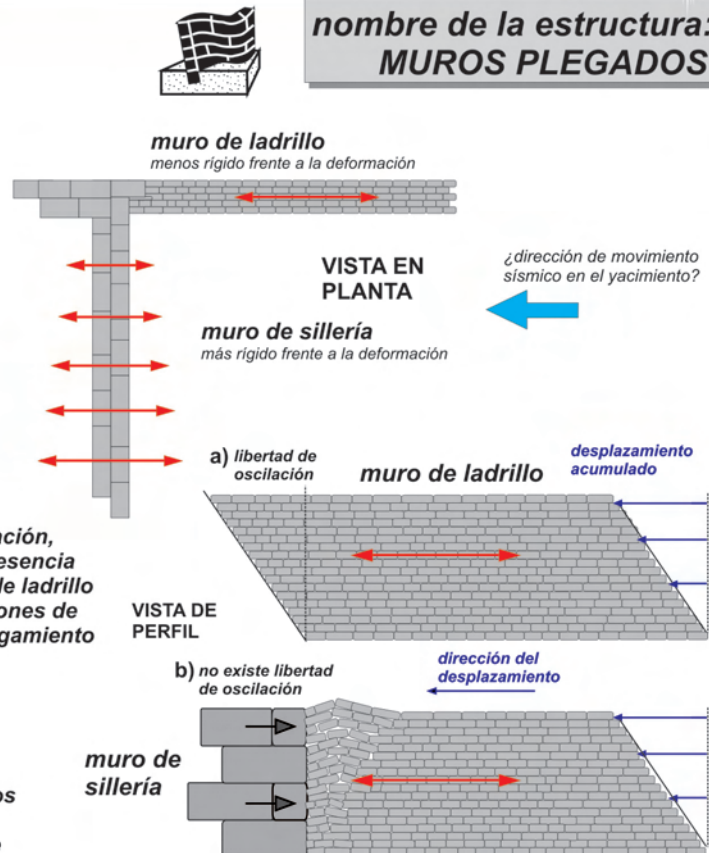
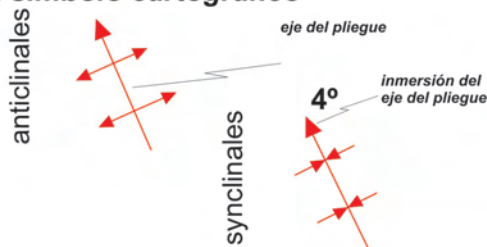
aplicación

Este tipo de plegamientos suelen aparecer en muros con mortero o formados por ladrillos. Los bloques de sillería no suelen presentar plegamientos, ya que se comportan de forma más rígida frente a la deformación. Normalmente en este tipo de muros la deformación se suele acomodar con rotaciones de bloques en los extremos del muro y con fracturas y grietas.

tipo de dato

línea (L1)
orientación única
dato simple

símbolo cartográfico



Evaluación del Daño Sísmico en Edificios Históricos: Aplicación al estudio del riesgo sísmico



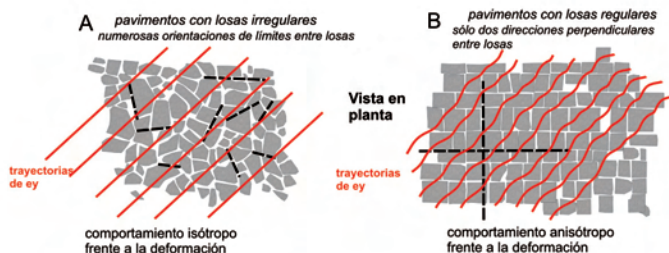
nombre estructura:
Pavimentos plegados



● morfología

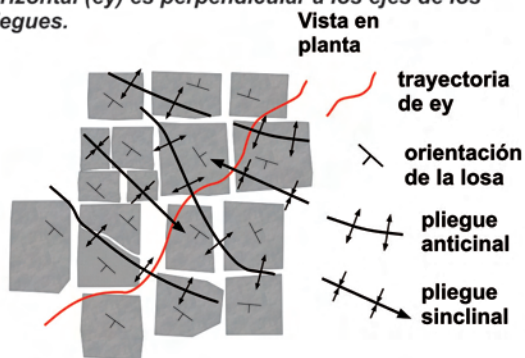
Estructuras plegadas en pavimentos. En enlosados los pliegues suelen tener asociadas estructuras en pop-up y fracturas en las losas

● **interpretación.** Debido al movimiento del suelo inducido por las ondas sísmicas se produce la deformación de los pavimentos, fundamentalmente por plegamiento. En este tipo de estructuras, sobre todo en las desarrolladas en los enlosados, es importante considerar el comportamiento isótropo o anisótropo frente a la deformación dependiendo del carácter regular o irregular de las losas que lo forman. La dirección de máximo acortamiento horizontal (ey) es perpendicular a los ejes de los pliegues.



Los pavimentos regulares se comportan de forma anisotrópica frente a la deformación. Este hecho produce cambios en la orientación del tensor de deformación, definiendo trazas de los pliegues discontinuas y en algunos casos figuras de interferencia en domos y cubetas.

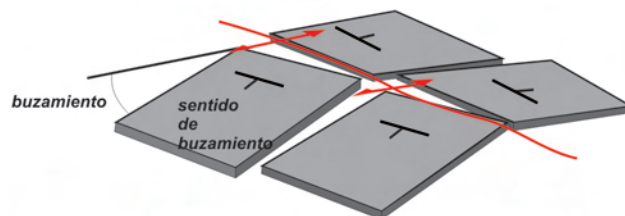
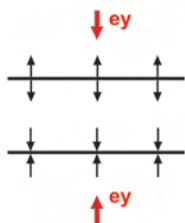
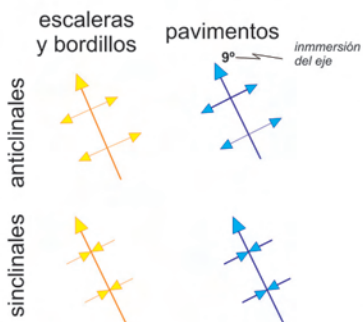
Los plegamientos en escaleras y bordillos se comportan de forma similar a los enlosados irregulares.



● medida y representación

Para cuantificar la deformación de estas estructuras, debemos conocer la orientación de los ejes de los diferentes pliegues desarrollados en los pavimentos. Este análisis es el mismo independientemente del tipo de pavimento. Podemos medir el eje del pliegue directamente o medir las orientaciones de las losas o de los flancos del pliegue. Parece ser bastante común que cuando se plegan este tipo de pavimentos se produce la interferencia de distintas orientaciones de pliegues. Este hecho queda patente en los diferentes azimuts en la inmersión de los ejes de los pliegues. En algunos casos, se pueden llegar a producir cabalgamientos de una losa sobre otra formando las estructuras denominadas pop-up.

● símbolo cartográfico



● tipo de dato

línea (L1)
orientación única
dato único

Referencias

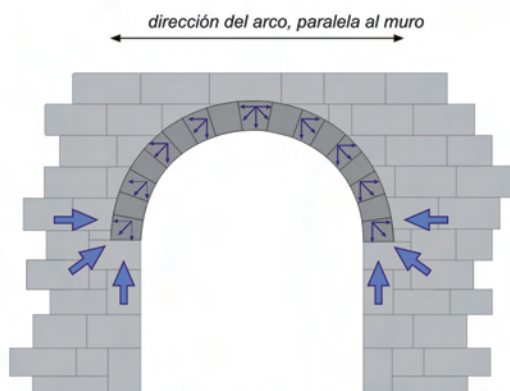
Altunel (1998), Stiros (1996),
Silva et al (2009),



Evaluación del Daño Sísmico en Edificios Históricos: Aplicación al estudio del riesgo sísmico



nombre estructura:
**Desplazamiento de
dovelas (I)**



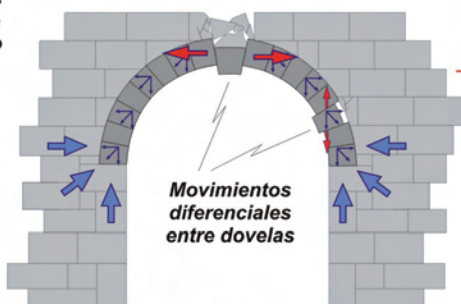
Esquema general de esfuerzos presentes
en un arco

MOVIMIENTO VERTICAL DE BLOQUES

a) origen sísmico de la deformación
(deformación rápida)

VISTA FRONTAL

No suelen aparecer
grandes fracturas
en los muros que
contienen al arco



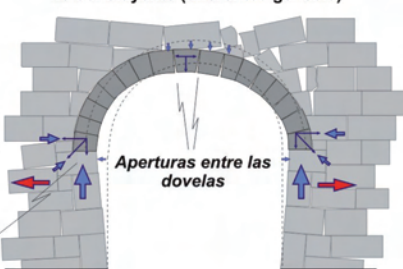
Movimientos
diferenciales
entre dovelas

Vista de
frente

b) origen de la deformación
no concluyente (diferentes génesis)

Suelen aparecer grandes
fracturas en los muros que
contienen al arco

las impostas
ceden cambiando
el estado de
equilibrio del arco

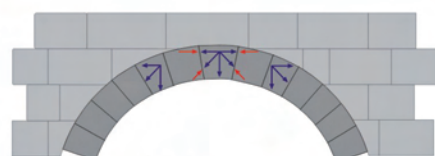


Aperturas entre las
dovelas

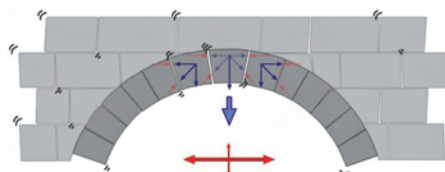
● **morfología.** Movimientos diferenciales en dovelas de arcos

● **interpretación.** Debido al movimiento inducido por las ondas sísmicas, se produce un movimiento diferencial entre las dovelas de un arco o dintel. Estos movimientos pueden ser horizontales, verticales o mixtos, y no deben mostrar colapso del arco.

Vista frontal

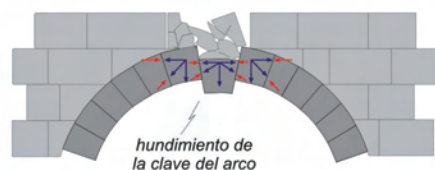


A) Estado inicial



B) Deformación

Los movimientos horizontales inducen la separación de las dovelas, eliminando su soporte e induciendo el desplazamiento vertical de las mismas, normalmente de la clave del arco.

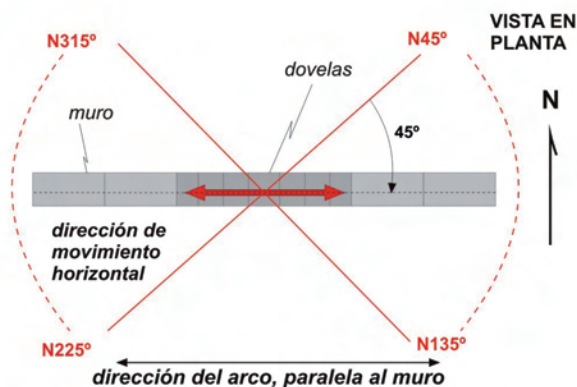


C) Estado final (deformado)

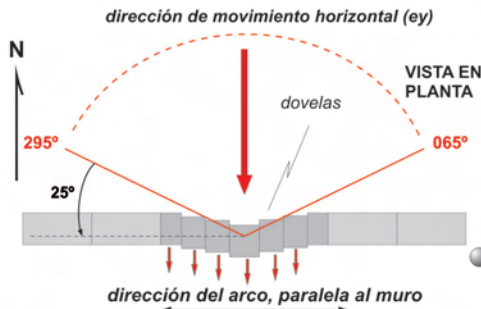
● medidas

En el supuesto que haya movimiento vertical de las dovelas podemos considerar que el ángulo entre la dirección de ey y la orientación del muro que contiene al arco debe ser menor de 45°.

En este ejemplo, la dirección de movimiento debe estar entre N45°E y N135°E, en este caso no podemos establecer la direccionalidad de los daños.



a) MOVIMIENTO DE LOS BLOQUES EN LA HORIZONTAL



nombre estructura:
**Desplazamiento de
dovelas (II)**

En este ejemplo la orientación de ey debe estar entre 295° y 065°. En este caso podemos definir direccionalidad de los daños.

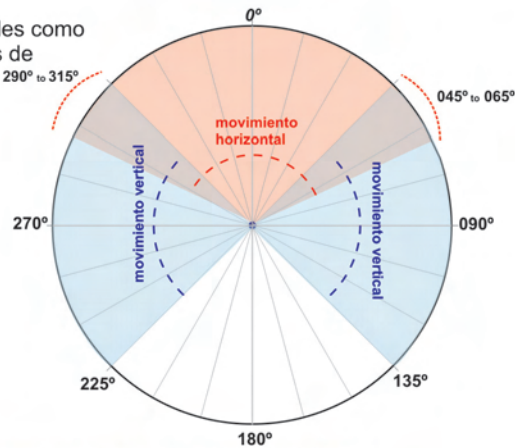
● **símbolos cartográficos**



● **medidas y representación**

En este caso el movimiento diferencial del las dovelas, define una orientación de ey que tiene que localizarse como mínimo a 25° de la orientación del muro que contiene al arco. Al contrario que en el caso de movimientos de dovelas en la vertical, en este caso podemos establecer la direccionalidad del daño, de sentido contrario al desplazamiento de las dovelas.

En algunos casos, si el arco presenta tanto movimientos horizontales como verticales de sus dovelas, podemos realizar una análisis de rangos de orientaciones comunes, reduciendo considerablemente el intervalo de posibles orientaciones de ey que han producido los daños.



● **ejemplos**



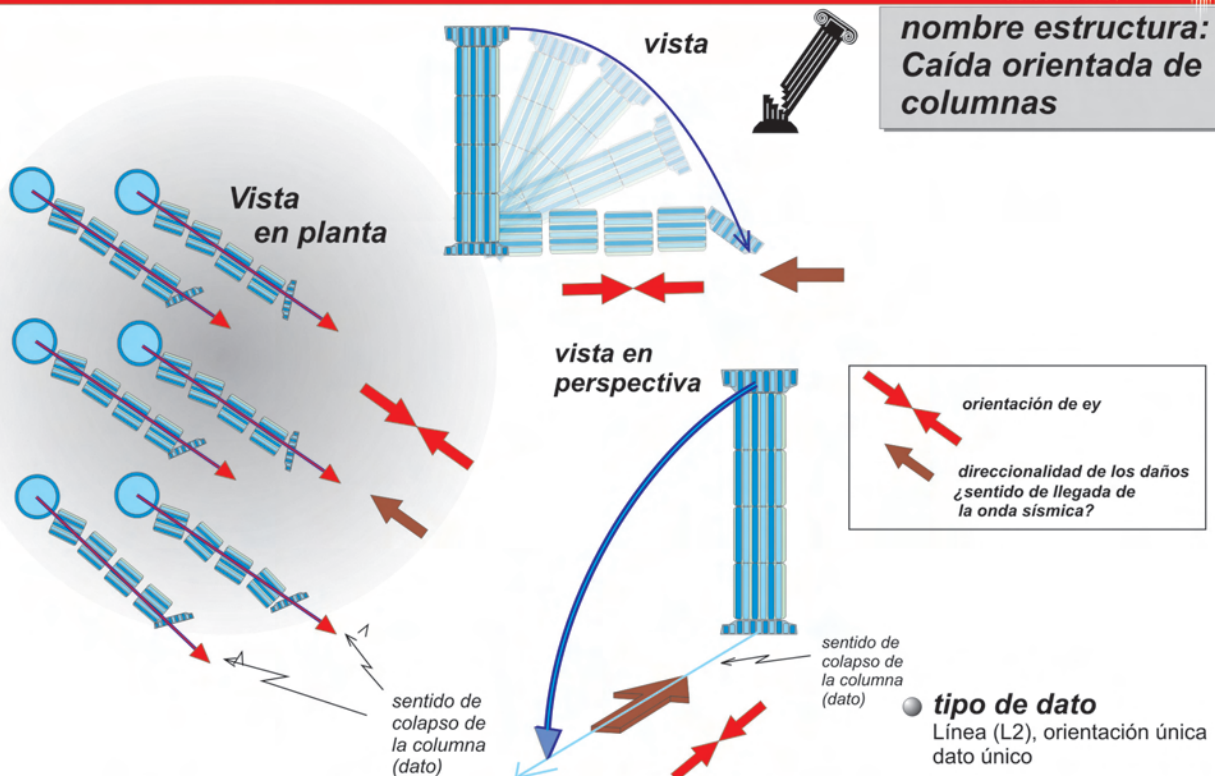
● **referencias**

Altunel et al. (2003); Kamai and Hatzor (2007); Rodriguez-Pascua et al. (2009); Silva et al. (2005);Stiros and Jones (1996)

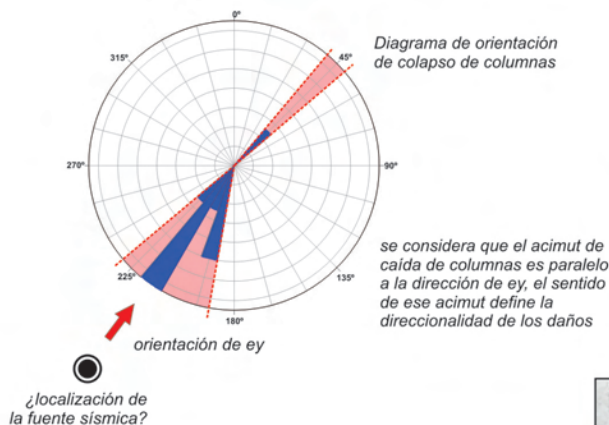
Evaluación del Daño Sísmico en Edificios Históricos: Aplicación al estudio del riesgo sísmico



nombre estructura:
Caída orientada de columnas



● morfología caídas orientadas de varias columnas



● símbolo cartográfico

acimut de colapso de la columna (0-360°)



● lugares de aplicación

Este tipo de efectos sólo deberá considerarse cuando aparezca un gran número de columnas afectadas, y que presenten una orientación de caída más o menos homogénea. En ningún caso se debe analizar una columna individualmente para obtener un resultado de la deformación.

● referencias

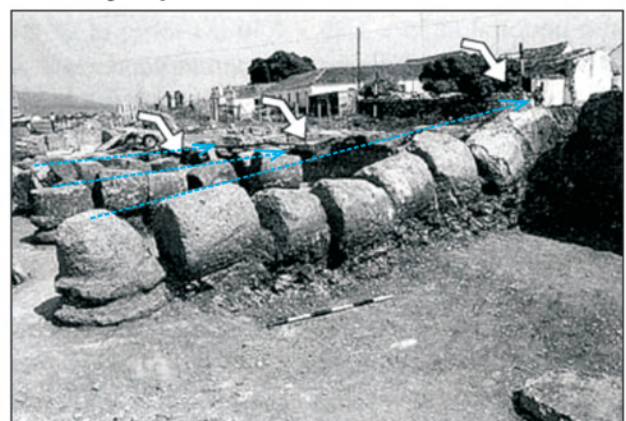
Nur and Ron (1996), Stiros (1996), Sillières (1997), Altunel (1998), Altunel et al. (2003), Korjenkov, et al. (2003), Binda and Saisi (2005), Silva et al. (2005), Ambraseys (2006), Marco (2008), Rodríguez-Pascua et al. (2009a); Silva et al. (2009a)

● **interpretación.** Tel movimiento inducido por las ondas sísmicas produce el colapso de las columnas. Si no influyen otros parámetros inherentes al terreno o a la propia columna, podemos considerar que el acimut de caída tiene relación directa con la deformación inducida por el sismo.

● medidas y representación

El vector de colapso de las columnas presenta una orientación paralela a la dirección de máximo acortamiento (ey), y el sentido de ese acimut define la direccionalidad de los daños.

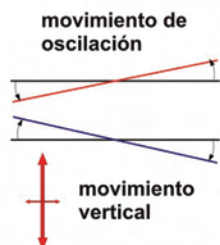
● ejemplo



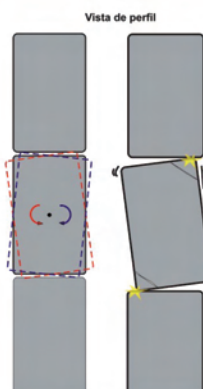
Evaluación del Daño Sísmico en Edificios Históricos: Aplicación al estudio del riesgo sísmico



nombre estructura:
rotura en esquinas de bloques



La deformación se produce por el movimiento de oscilación

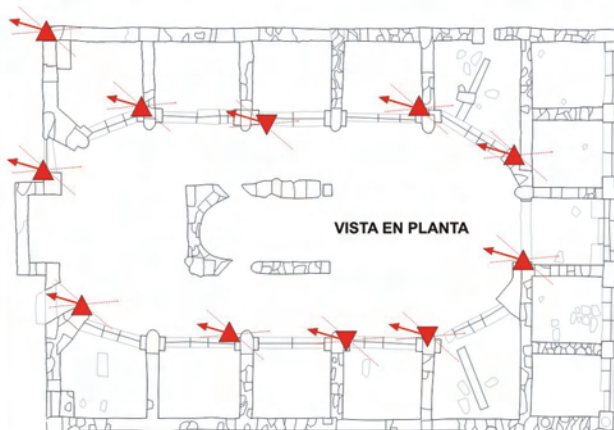


● morfología

Roturas en las esquinas de bloques de sillería en esquinas de muros o pilares. Estas roturas suelen estar definidas por planos con buzamiento de 45°.

● interpretación

Debido al movimiento de las ondas sísmicas se produce un movimiento oscilatorio en la vertical que mueve diferencialmente los bloques de los muros. Este movimiento diferencial produce el choque de las esquinas de los bloques fracturándolos.

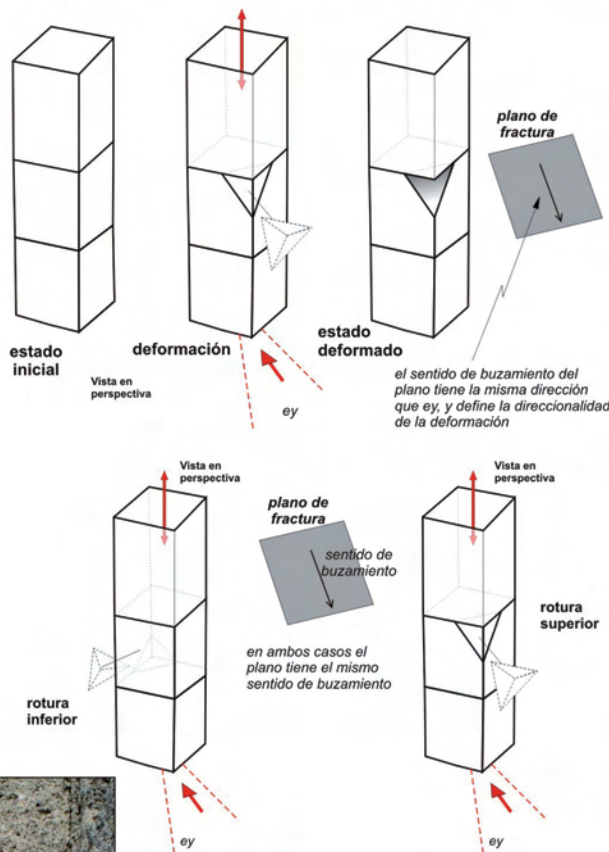
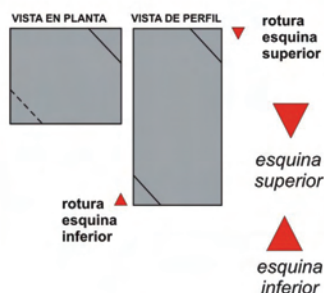


Las roturas se pueden producir en los extremos opuestos del bloque. No obstante, lo más normal es que se produzca sólo en uno de los extremos del mismo. Este hecho puede variar, dependiendo de la calidad y grado de alteración del bloque. Por ello es importante definir si la rotura se encuentra en la parte superior o inferior del bloque.

● tipo de dato

plano o línea (L2)
orientation única
dato único

● símbolo cartográfico



● ejemplos



Referencias

Marco (2008)

ANEXO II: DEFINICIONES DE LOS GRADOS DE INTENSIDAD ESI-2007 (Michetti et al., 2007).

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 son detectados exclusivamente 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 cuestas, 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 sólo en ocasiones excepcionales dejan evidencia en el registro geológico -procesos de licuefacción-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 mili 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 cuevas 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 únicamente 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 centenas 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 cuevas 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 km².

- 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 (10³ – 10⁵ m³) 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 (10⁵ - 10⁶ m³). 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 equili-*

brio 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 des-

aparecer 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 centenas 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 (10^5 m^3) y a veces muy grande (10^6 m^3). 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 geomor-

fológico 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 (sobre presión). 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 ($> 10^5 - 10^6 \text{ m}^3$) 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 desenraizados 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 $> 1\text{m}$ 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 centenas 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 ($> 2\text{m}$). 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 km^2 .

- 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 ($> 10^5 - 10^6 \text{ m}^3$) son frecuentes, independientemente del estado de equilibrio y pendiente de las laderas, produciendo 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 un radio de 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 volca-

nes 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 perma-

nentes, 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 ($> 10^5 - 10^6$ 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 sufrir daños serios. Deslizamientos considerables pueden tener lugar en radios de 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.*

Agradecimientos

El presente volumen se ha financiado mediante el Proyecto de la Fundación MAPFRE: EDASI. *“Evaluación del Daño Sísmico en Edificios Históricos: Aplicación al estudio del riesgo sísmico”*. Los resultados aquí obtenidos son fruto de las investigaciones que desde el año 2008 llevan conjuntamente el grupo de investigadores de este proyecto, integrados en el Grupo Español de Trabajo del Proyecto IGCP-567 (UNESCO): *Earthquake Archaeology*, en colaboración con el Instituto de Georriesgos y Tectónica Activa de la RWTH Aachen University (Alemania) liderado por el Dr. Klaus Reicherter.

También hacemos mención al Grupo Internacional de Paleosismología y Tectónica Activa de INQUA, que mediante distintos proyectos desde 2005 ha financiado este tipo de investigaciones y actividades, y que en España han fructificado con la creación del Grupo de Trabajo en Tectónica Activa, Paleosismología y Arqueosismología QTECT-AEQUA de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario durante el año 2011.

Los autores muestran su especial agradecimiento a los responsables del Conjunto Arqueológico Romano de Baelo Claudia (Junta de Andalucía) por todas las facilidades prestadas en las labores de investigación, así como a todas aquellas personas que nos han prestado

material gráfico y fotografías para ilustrar el presente volumen.

Por último, queríamos mostrar nuestro agradecimiento a la Fundación Mapfre por haber depositado su confianza en la promoción y difusión de una disciplina emergente como la Arqueosismología, que en un futuro tendrá un papel creciente en los análisis de peligrosidad y riesgo sísmico.

Los autores

“(…) Si nuestros mayores hubiesen atendido a lo que importa conservar la memoria de iguales sucesos para enseñanza y más fácil conocimiento de los arcanos prodigios de la Naturaleza, no estaríamos tan desnudos de ejemplares con que exornar el del día y hacer algún co-tejo que le aclarase (...)”

Atribuido a Agustín Montiano y Luyando en referencia a los efectos del terremoto de Lisboa de 1755.

“Noticias de los Estragos que causó el Terremoto de 1º de Noviembre de 1755 en toda la Península; datos allegados por orden de Don Ricardo Wall. Ministro de Fernando VI, para la Real Academia”. Biblioteca de la RAH, Ms. sign. 1-11-5-8039-1º.