

## 3.4 Elementos comunes y principales variaciones en los sistemas antisísmicos

### 3.4 ELEMENTOS COMUNES Y PRINCIPALES VARIACIONES EN LOS SISTEMAS ANTISÍSMICOS

Las características de los diferentes sistemas sismorresistentes, recogidos en los anexos de este texto, permiten establecer una serie de puntos en común entre algunas de las soluciones descritas. Estas analogías entre sistemas pueden darse no sólo dentro de una misma tipología, sino también entre los distintos tipos incluidos en un mismo grupo, o incluso entre tipos y subtipos de cualquiera de los cuatro grupos que se proponen.

Tal y como se desarrolla a continuación, es frecuente apreciar cómo la utilización de distintos recursos para afrontar una realidad universal como son los terremotos presenta estrechas similitudes entre distintos sistemas, principalmente a través de los principios antisísmicos ya mencionados y que articulan todas estas soluciones. Esta realidad se reproduce independientemente de la identificación geográfica, cultural o temporal, recurriendo a medidas transversales que se revelan eficaces en cualquiera de los contextos expuestos a sismo.

No obstante, esta comparación entre las distintas configuraciones y parámetros de cada uno de los sistemas también permite establecer una serie de variaciones entre las diversas soluciones implementadas en cada caso. Algunas de estas diferencias tienen mucho que ver con la asimilación del legado cultural o estilístico vinculado a distintos aspectos que originan algunos de los desarrollos singulares ya mencionados en la arquitectura histórica de fábrica.

En ambos casos, la identificación de determinados puntos en común o posibles variaciones entre los sistemas sismorresistentes recogidos en esta investigación se revela como una cuestión de gran interés de cara a reconocer el funcionamiento global de todo el esqueleto constructivo, ligado en ocasiones a configuraciones estructurales aún desconocidas, y que podrían seguir arrojando luz al estudio de la estabilidad de este tipo de edificios ubicados en zona de alta vulnerabilidad y sismicidad.

Para llevar a cabo este análisis se recurre a la comparación entre los distintos sistemas a través de distintos aspectos constructivos o contextuales que se proponen para llevar a cabo una aproximación lo más integral posible, recogiendo cuestiones muy diversas como las que se proponen a continuación.

El primero de ellos aborda este análisis comparativo a través de aspectos ligados a la geometría y las características formales de los sistemas implementados.

La configuración de estos elementos y su concepción volumétrica tiene mucho que ver con las proporciones utilizadas en cada caso. La diversidad de tamaños o dimensiones de las piezas empleadas responde a distintos criterios, tanto constructivos como culturales, pero aun así, es frecuente descubrir semejanzas significativas entre los distintos recursos planteados en cada caso, lo cual, lejos de suponer necesariamente una conexión entre distintas culturas, constituye una evidencia más de la amenaza global que suponen los seísmos y la exposición de las construcciones de fábrica en aquellas zonas con una mayor actividad telúrica.

De igual forma es habitual observar una distribución y disposición de estos sistemas de una manera similar entre los distintos ejemplos recopilados, independientemente de cuestiones temporales o estilísticas, tal y como se aborda en el primero de estos subapartados de análisis.

La obtención de soluciones análogas no debe por tanto asombrarnos si tenemos en cuenta la universalidad de este fenómeno destructivo, sobre todo en lo que se refiere al movimiento y generación de fuerzas dinámicas horizontales sobre las estructuras de fábrica.

Los efectos sísmicos, así como los daños constructivos que generan en estas estructuras históricas, trascienden los límites geográficos establecidos, aspecto que se aborda en el apartado siguiente, dedicado a aquellos temas relacionados con la disposición urbana y la relación con el terreno, con otras construcciones e incluso con otros elementos. Los puntos en común de estos sistemas se plantean desde las particularidades climáticas y ambientales de cada zona, atendiendo a cuestiones como la compacidad urbana o la relación con otros edificios adyacentes.

Uno de los aspectos más importantes desde el cual abordar las posibles analogías y diferencias entre los distintos sistemas es sin duda el constructivo y material. La configuración de cada elemento y su composición interna son objeto de este análisis comparativo entre los distintos sistemas sismorresistentes recogidos en esta investigación, a través de los cuales se pueden asociar simultáneamente a distintos principios antisísmicos.

Este punto resulta especialmente útil de cara a una posterior identificación de estos sistemas, ya que permite identificar rápidamente el papel que pueden estar desempeñando diversos elementos de cualquier edificio ubicado en zona de gran sismicidad.

Por último, y en continuidad con esta faceta constructiva, se comparan los distintos sistemas desde un punto de vista funcional y estructural. Desde la perspectiva que aporta este enfoque comparativo de los distintos sistemas sismorresistentes, es posible reconocer analogías muy explícitas entre distintas culturas arquitectónicas sin aparente conexión cultural entre ellas.

De manera similar estas semejanzas se reproducen no solo entre distintos países o regiones, sino también dentro de una misma zona, entre tipologías muy diversas erigidas con fábricas, ya sean de piedra, ladrillo o adobes.

### 3.4.1 ASPECTOS FORMALES Y GEOMÉTRICOS

Las analogías entre los distintos sistemas sismorresistentes identificados parten de uno de los principios más utilizados en toda la arquitectura histórica de fábrica, independientemente de la región en la que nos encontremos, con un marcado carácter cerrado de todo el edificio que persigue en muchos casos volumetrías en forma de caja, ya sea en las catedrales hispánicas del nuevo mundo, las mezquitas y palacios iraníes o los templos ubicados en toda la región de Bengala.

Esta configuración constituye uno de los ejes vertebradores que dan lugar a soluciones de grandes semejanzas formales y geométricas en lo que respecta a la concepción de los distintos sistemas implementados en estas construcciones.

La ortogonalidad que persiguen este tipo de construcciones está presente no solo en la propia planta de los edificios, con retículas muy marcadas que articulan las grandes salas hipóstilas de estas regiones, sino también en los elementos constructivos que se plantean en toda la estructura, ya sea en muros y arcos interiores, fachadas o en las propias cubiertas.

En cuanto al uso de la simetría como mecanismo de simplificación y unificación del comportamiento estructural de las construcciones de fábrica, la disposición de distintos ejes favorece la aparición de desarrollos muy similares en lo que respecta a las naves y la configuración espacial tanto interior como exterior, tal y como sucede con las geometrías y proporciones que se manifiestan en edificaciones muy distantes culturalmente hablando. Algunos de estos ejemplos se pueden encontrar comparando las volumetrías y retículas de los edificios basados en la suma de paralelepípedos, en regiones como Bengala o los templos hispánicos de América de Sur, donde el uso de formas rectangulares adquiere formas muy semejantes si comparamos plantas y secciones.

Por su parte, aquellos edificios de mayores dimensiones recurrieron a volumetrías interiores basadas en la disposición de espacios a la misma altura, aspecto que se extendió en todas aquellas zonas con gran exposición al sismo, independientemente de la civilización, el estilo desarrollado o el marco temporal en el que se planteó cada caso.

A través de este eje vertebrador que fijaba una misma altura para todas las naves y espacios interiores, se desarrollaron esqueletos estructurales con este nexo de unión en los edificios de fábrica ubicados en estas regiones, revelándose así como verdaderas excepciones en comparación con otras construcciones situadas en zonas sin riesgo sísmico. Esta singularidad que encontramos en estas regiones se reprodujo prácticamente de manera mayoritaria a pesar de compartir mismos orígenes estilísticos que otros desarrollos menos expuestos y con mayor diversidad de alturas, condición que se manifiesta muy desfavorablemente a la hora de afrontar las grandes sacudidas propias de cualquier terremoto, tal y como sucede en construcciones con distintas alturas y volumetrías internas.

Esta condición ortogonal se refuerza de manera acentuada incluso en los elementos más genuinamente



curvos que encontramos en cualquier construcción histórica, los arcos, cuya estructura se enmarca en formas cuadradas o rectangulares a través de distintos mecanismos como son las enjutas en el caso de las catedrales góticas, o los alfiles en la arquitectura de tradición musulmana.

De manera complementaria al uso de geometrías ortogonales, las cubiertas experimentan una mayor variedad de geometrías en las zonas sísmicas analizadas en esta investigación, desde formas cónicas o piramidales hasta volumetrías más complejas como pueden ser las cúpulas bulbosas de la arquitectura iraní. No obstante, se pueden establecer una serie de paralelismos entre todas ellas, las cuales emergen de manera más o menos esbelta sobre los remates adintelados que refuerzan esta concepción ortogonal en el arranque de las mismas.

En cuanto a las geometrías exteriores, las cubiertas se manifiestan bien a través de terrazas planas o bien mediante la disposición de bóvedas y cúpulas que sobresalen de éstas, revelando el sistema estructural elegido en cada caso, pero integradas parcialmente en la mayoría de casos en el plano horizontal que las alberga, fortaleciendo los arranques de estos elementos de cubrición tan vulnerables ante situaciones de sismo.

Otra de los sistemas sismorresistentes más extendidos son los contrafuertes exteriores, los cuales presentan una amplia gama de geometrías en una misma región que se reproduce de manera idéntica en otras zonas muy distantes geográfica y temporalmente.

En este sentido es común por ejemplo encontrar estos elementos dispuestos de manera puntual en las esquinas de diversos edificios independientemente de su localización, si bien las geometrías empleadas pueden variar ligeramente en función de la cultura. Es el caso de los refuerzos integrados en las mezquitas de la región de Bengala, con desarrollos cilíndricos que aprovechan la inclusión de estas torres para evocar la función ornamental de los minaretes de otras regiones, prescindiendo de la verticalidad que pueden llegar a presentar en otras regiones sin presencia de terremotos. En otros casos, estos elementos de esquina adquieren formas con predominio de las líneas rectas, ya sea con contrafuertes triangulares o cuadrangulares en los dos lados de estas esquinas.

A nivel de cubierta, estos sistemas de contrapeso adquieren geometrías más variadas, ya sea mediante desarrollos en forma de cilindro o bien prismas de distinta base y remate, pero siempre con unas proporciones y dimensiones que se alejan de las proporciones de gran esbeltez que presentan en otras regiones con menor o nula sismicidad.

La utilización de la planta centralizada como recurso sismorresistente que favorece el comportamiento unitario en situaciones de terremoto también presenta puntos en común entre determinados ejemplos seleccionados en diferentes regiones del planeta.

Una de las geometrías más extendidas es quizás la que presenta planta cuadrada en la base y remate esférico en la cubierta, independientemente de su interior, que desarrolla espacios de distinta forma en función del

manejo que se hiciera en cada caso a la hora de acometer la transición entre las geometrías rectangulares y las circulares, en función por ejemplo de la utilización o no de pechinas en las distintas culturas que plantearon estas volumetrías centralizadas. Es por ello que el perímetro murario cuadrado podía reflejar un carácter muy masivo si se resolvía con él esta transición a espacios centralizados, pero con geometrías más próximas al círculo, como pueden ser los espacios de planta octogonal. Este recurso de transición entre formas muy distintas fue ampliamente usado en regiones como las de Bengala, pero también en otras zonas más distintas como Irán.

En lo que respecta a la geometría empleada en los elementos con cierta inclinación, se aprecian semejanzas tanto en la concepción de entramados murarios, con una ligera inclinación en forma de talud, como en aquellas construcciones puntuales de mayor esbeltez, como torres o minaretes, los cuales presentan una volumetría cónica o troncocónica en algunos de los minaretes y torres de Irán y Bengala. Esta ligera inclinación responde al principio de estabilidad que busca reforzar el comportamiento sismorresistente de estos elementos, reduciendo el riesgo de colapso provocado por los posibles desplazamientos horizontales registrados en ellos.

Entre los sistemas orientados a mitigar la transmisión de energía sísmica al edificio, el arranque de los muros mediante zócalos de mayor resistencia supone uno de los elementos más transversales de la arquitectura histórica de fábrica ubicada en zona de gran actividad telúrica, tal y como atestiguan multitud de ejemplos en diversas zonas del planeta. La distribución y estos elementos suelen presentar una geometría acorde a la planta general del propio edificio, adaptando su forma al arranque de sus muros perimetrales. En este sentido, es frecuente encontrar basamentos circulares para aquellas construcciones de desarrollo cilíndrico, y zócalos con base rectangular o poligonal para las edificaciones con geometrías rectas.

Sin embargo, existen algunas excepciones para aquellas grandes plataformas que sirven de basamento a varias construcciones, tal y como se ha comentado por ejemplo en el caso de Persépolis, en Irán, donde la geometría de este sistema de aislamiento sísmico se independiza del resto de construcciones que descansan sobre ella, al tratarse de una auténtica subestructura de dimensiones ciclópeas.

Estas plataformas pueden presentar igualmente cierta inclinación, independientemente de si la construcción que se apoya en ellas conserva esta inclinación en los elementos superiores o se constituyen volumetrías superiores completamente verticales.

El empleo de refuerzos y armados integrados dentro de los propios elementos constructivos también presenta ciertas similitudes y puntos en común desde el punto de vista formal. El primero de los subtipos donde apreciamos elementos en común es en los conectores puntuales, donde el uso extensivo de estos sistemas sismorresistentes experimentó un desarrollo formal especialmente similar en zonas muy distintas entre sí, tanto cronológicamente como geográfica o culturalmente. Estas características comunes quedan patentes en todo tipo de conectores en forma de clavija y grapas incrustadas en hendiduras realizadas en las caras horizontales y/o verticales de piezas adyacentes.

Además de en estas piezas metálicas que se incorporaron en algunas de las fábricas históricas, también ha sido posible encontrar una variante similar de este recurso en los conectores basados en el vertido de fundidos metálicos sobre distintos tipos de hendiduras con forma de herradura u otras geometrías, endureciéndose directamente sobre estos canales realizados en la piedra.

Para aquellos conectores puntuales de origen vegetal, es posible además establecer formatos comunes en el caso de los travesaños de madera incrustados en las fábricas, de sección circular y diámetros que suelen rondar los 10-20 cm independientemente del tamaño de la construcción. En los casos más monumentales la variación de estos sistemas se centra en la disposición y repetición de estas piezas, más que en la propia geometría de éstos, cuya proporción se mantiene.

En los refuerzos de esquinas y huecos, las geometrías utilizadas en las piezas de mayor tamaño dependen del tipo de sillar empleado, aunque es frecuente encontrar piezas que abrazan ambos lados de una misma esquina. En el caso de los huecos, estos elementos pueden configurar en una misma pieza la jamba y el dintel, la jamba y el antepecho o incluso las tres partes de un mismo hueco, fortaleciendo así esos puntos débiles de cualquier construcción afectada por un sismo.

Dentro de los sistemas relacionados con el aumento de la elasticidad y ductilidad del edificio, la disposición de juntas presenta características comunes relacionadas con el espesor del mortero empleado en las construcciones de gran vulnerabilidad sísmica, donde es frecuente constatar el uso de espesores del doble de dimensión que las hiladas de ladrillo que conforman los entramados murarios portantes. Por su parte, las variantes formales que pueden desarrollar estas soluciones dependen principalmente del formato de ladrillo o sillar empleado, dando lugar a juntas triangulares o incluso poligonales en los entramados de fábrica con formatos más irregulares.

La incorporación de elementos de mayor ductilidad dentro de los propios elementos estructurales presenta también similitudes entre las distintas edificaciones donde se implementaron, respetando las dimensiones de las propias fábricas a las que sirven e integrándose de manera simbiótica en todo el conjunto edificado, ya sea de manera generalizada o localizada. En este sentido es frecuente encontrar puntos en común en lo que respecta a la disposición de estos elementos puntuales, normalmente ubicados en aquellos encuentros más vulnerables frente a la acción de los terremotos, como pueden ser las esquinas, huecos, o remates de determinadas estructuras portantes.

En relación a la utilización de piezas de gran tamaño y resistencia, las construcciones ubicadas en zonas de alta sismicidad concentraron el uso de este recurso rigidizador principalmente en columnas y otros elementos verticales de gran importancia dentro del esqueleto estructural. La utilización de una única pieza, de geometría sencilla y preferentemente de poca esbeltez, se convirtió en una de las medidas más extendidas para resolver todo el cuerpo vertical de los soportes verticales planteados en las regiones de alta sismicidad, mitigando la transmisión de energía sísmica desde el terreno y reduciendo así la interacción entre las fábricas que solían conformar estos elementos.

### 3.4.2 ASPECTOS URBANOS Y RELACIONALES

Desde el punto de vista de la disposición y relación de los sistemas sismorresistentes identificados, se hace necesario un análisis comparativo que identifique los aspectos relacionales de dichas medidas con el resto de elementos que forman parte de las construcciones ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico, pero también respecto al terreno y la trama urbana sobre la que se desarrollan, los cuales pueden llegar a arrojar luz al estudio de dichos sistemas.

En este sentido, la identificación de elementos comunes desde este punto de vista posibilita una visión integral de dichos sistemas, reconociendo valores sismorresistentes en cuestiones que tienen que ver con la disposición de estas edificaciones sobre lo preexistente y su relación con el entorno.

La información que nos aporta el contexto ambiental y climático tiene mucho que ver con la configuración constructiva de los distintos sistemas y la posible variabilidad entre regiones, donde la exposición a todo tipo de desastres naturales puede llegar a enmascarar soluciones arquitectónicas para hacer frente no sólo al fenómeno del sismo, sino también a otras catástrofes de igual o mayor riesgo en determinadas áreas del mundo.

La compacidad urbana constituye una de las medidas más extendidas para lograr un correcto arriostramiento de las estructuras de fábrica, y como tal, se desarrollan una serie de puntos en común en todas aquellas construcciones situadas en regiones con gran actividad telúrica. En este sentido se aprecia un especial interés en estas construcciones por ubicar y fortalecer estas estructuras a través de edificaciones anexas con un alto nivel de compacidad urbano que fomenta este tipo de situaciones. Complementariamente a esta circunstancia presente en la gran mayoría de edificaciones situadas en los núcleos históricos de las grandes ciudades, las construcciones más vulnerables exploraron la anexión externa de edificios adyacentes a los edificios más monumentales y con un carácter simbólico y funcional más importante.

En este tipo de edificios, la fragmentación de los edificios de mayores dimensiones ubicados en zonas de alta sismicidad supuso todo un desafío a la hora de independizar ciertas volumetrías y sus conexiones con el conjunto edificado. Para lograrlo una de las dos estrategias más extendidas y donde se reprodujeron mayores semejanzas entre regiones y culturas muy alejadas consistió en independizar estructuralmente estas piezas fragmentadas, de tal forma que se lograra minimizar la acumulación de tensiones en elementos de conexión especialmente frágiles y vulnerables frente al sismo. En contraste con esto, la otra de las situaciones más comunes en los edificios con volumetrías fragmentadas procuró conservar cierta continuidad estructural y espacial en ellas, vinculando esta unión a un comportamiento sismorresistente muy controlado, tanto en las piezas principales como en todo el conjunto.

Las excepciones a este tipo de estrategias comunes las encontramos en el caso de las construcciones exentas localizadas en la región de Bengala, donde este tipo de compacidad se compensó mediante un mayor cuidado a la hora de implantar estas construcciones, en terrenos que además podían llegar a presentar graves problemas derivados de las grandes inundaciones y los daños ocasionados en las cimentaciones y

arranques de las estructuras.

No obstante, en los tres casos analizados en esta investigación existen ejemplos de atado entre edificios que dan fe de la conciencia de atado estructural que se puso de manifiesto en regiones aparentemente distantes. La agrupación de edificios en torno a cinturones perimetrales permitió articular y vincular distinto número de edificios dentro de ellos, asegurando conexiones seguras entre las distintas partes que lo componían y configurando unidades urbanas con grandes posibilidades de crecimiento, tal y como se ha mencionado para el caso de las kanchas peruanas.

Las posibles estrategias de vinculación de estos sistemas podían variar ligeramente, reservando la función de arriostramiento bien al cinturón de atado perimetral o bien a un elemento central sobre el cual se centralizaba esta unión de piezas parciales, aspectos que podían ser fácilmente combinables entre sí para un mejor desempeño estructural en situaciones de sismo.

La adaptación climática y topográfica tiene mucho que ver con las condiciones geográficas del lugar, donde la conciencia del lugar se desarrolla no sólo desde el punto de vista sísmico sino también desde múltiples enfoques que pueden llegar a influir negativamente a la hora de alcanzar y asegurar la ansiada estabilidad estructural de las construcciones más ambiciosas de cada cultura.

El carácter de permanencia de las edificaciones más monumentales así lo demuestran, con emplazamientos especialmente estudiados para conseguir la mejor ubicación posible, tanto desde un punto de vista estratégico y defensivo como desde la propia configuración de uno de los puntos más importantes de cualquier construcción histórica, relacionado con su encuentro con el terreno y las características estables de éstos.

A este respecto se aprecia una gran conciencia a la hora de implantar las edificaciones, circunstancia que se generaliza en el caso de las construcciones históricas situadas en zonas de gran sismicidad. A partir de este principio común, la variabilidad que encontramos en las distintas estrategias utilizadas para fomentar este tipo de situaciones estables cambia en función de las culturas y desarrollos arquitectónicos de cada zona.

Por un lado, en aquellas civilizaciones que asimilaron o conquistaron otras culturas que les precedieron, es habitual encontrar situaciones en las que el diálogo con lo preexistente supo aprovechar las bondades de las construcciones más robustas o con un mejor planteamiento con el terreno, ya fuese a través de cimentaciones más elaboradas o subestructuras de arranque de mayor solidez que las que se erigieron sobre ellas en las nuestras edificaciones.

Por su parte, los nuevos asentamientos y desarrollos tuvieron en cuenta también esta adaptación al lugar de manera generalizada, tanto desde el punto de vista de la topografía y la morfología del terreno como de las condiciones geológicas existentes. En este sentido, aquellas construcciones que pudieron desarrollarse en terrenos abruptos conservaron esta conciencia estructural a través de emplazamientos armónicos que aprovecharan las ventajas y virtudes de los posibles terrenos rocosos que pudieran encontrar, adaptando

las fábricas a estos afloramientos a través de sistemas rigidizadores que conservaban este principio de aislamiento sísmico en los arranques de los edificios.

En lo que se refiere al riesgo colapso sobre edificaciones cercanas, las construcciones históricas situadas en zonas de alta sismicidad mitigaron los posibles efectos destructivos sobre los edificios cercanos gracias a la preocupación imperante en estas regiones a la hora de plantear la disposición y altura de los elementos de mayor prominencia.

La reducción de esbeltez se puede considerar una de las medidas más extendidas en las culturas que convivieron con este fenómeno destructivo, y que plantearon sus estructuras desde la relación de estas construcciones con otras edificaciones aledañas. De esta manera se buscó limitar en la medida de lo posible los efectos adversos que podrían generar estas estructuras en situaciones de sismo.

Es por ello que, en el caso de los contrapesos superiores, situados en las cubiertas de estos grandes edificios, se desarrollasen también modelos de especial singularidad en contraste con aquellos situados en zonas de menor exposición al terremoto, con características comunes en lo que respecta a su esbeltez, de menor altura y dimensiones.

De igual forma, la disposición y ubicación de estos elementos suele encontrarse mayoritariamente en zonas de bajo riesgo tanto para otras edificaciones cercanas como para aquellos elementos de la estructura especialmente vulnerables en caso de caída o con un papel relevante desde el punto de vista portante, no sin ello renunciar al rol ornamental que pueden llegar a desempeñar también estas piezas de remate.

En el caso de los contrafuertes ubicados en el perímetro de las edificaciones, es habitual concebir la disposición de los mismos dentro de la propia envolvente de la construcción. Este aspecto conforma una importante singularidad en aquellos edificios con gran conciencia sismorresistente, ya que esta decisión constructiva permite alcanzar comportamientos más unitarios frente a terremotos, gracias a volumetrías más compactas que integran en ellas hasta sus elementos de refuerzo perimetrales.

En lo que respecta a los refuerzos en forma de arcos de descarga, es frecuente recurrir a geometrías similares a las empleadas en las estructuras a las que sirven, con una continuidad formal ligada a la relación entre los distintos elementos que conectan y que suele plantearse en las zonas superiores de ambos edificios o en las zonas de transmisión de esfuerzos entre ellos.

Dada la compacidad urbana que rodea a gran parte de los edificios históricos de fábrica que hacen uso de este tipo de sistemas, los arcos utilizados pueden incluso disponerse de tal forma que relacionen edificios muy diversos, siendo por contra poco usual su descarga directa hacia el terreno.

En aquellos edificios en los que se hace uso de sistemas inclinados para mitigar los efectos de las grandes sacudidas a las que se podían enfrentarse las construcciones en situaciones de sismo, existen dos situaciones comunes que se reproducen en todas las edificaciones ubicadas en estas regiones, sobre todo en aquellos

sistemas planteados en los arranques de los edificios a base de grandes zócalos inclinados. Por un lado, se puede plantear la relación de dichos elementos con la estructura principal superior a través de zócalos independientes sin continuidad en la zona de encuentro, aunque también es usual ver esta inclinación reproducida en la totalidad del elemento constructivo o incluso en la totalidad del edificio situado en zona de gran sismicidad.

Esta relación entre zócalos inclinados y el resto del edificio se extendió también para aquellos casos con sistemas de arranque reforzados respecto a la estructura vertical portante principal. En este caso la solución más utilizada en las zonas de mayor exposición sísmica recurrió a sillares de mayor resistencia que las fábricas empleadas en la estructura principal superior, siendo lo más habitual el uso de grandes sillares de piedra durante varias hiladas sucesivas.

Otro de los elementos comunes en este tipo de sistemas de aislamiento sísmico, se planteó en muchos de los edificios localizados en estas áreas de gran peligrosidad, donde se implementó una distribución gradual de los distintos materiales empleados en un mismo elemento estructural. Las dos vías para ponerlo en práctica incluyeron por un lado la diferenciación heterogénea de las distintas secciones materiales del entramado murario o elemento vertical, con agrupación en hiladas del mismo tipo de fábricas, o bien mediante la graduación homogénea de las fábricas utilizadas, en función de la capacidad resistente y el tamaño de éstas, con una mayor concentración de elementos rígidos y masivos en las zonas inferiores de arranque.

A nivel interior, la relación entre las naves u otras unidades de organización espacial suele reproducir de manera generalizada la repetición del módulo básico que suele utilizarse en cada construcción, reduciendo así las posibles disonancias entre elementos. En aquellos casos con mayor exposición a sismo, uno de los sistemas con mayores analogías entre culturales es la disposición de tirantes entre aquellos elementos con mayor vulnerabilidad en caso de terremoto. En este sentido la relación entre elementos se produce tanto entre muros, columnas y bóvedas como en la combinación entre cualquiera de estos elementos portantes, de tal forma que se logre fortalecer todo el conjunto a través de la reiteración de esta medida en la totalidad del edificio.

A la hora de plantear los encuentros entre las bóvedas y cúpulas y las capas exteriores de cubrición, la relación entre elementos se manifiesta principalmente a través de dos situaciones que se desarrollaron en aquellas cubiertas planas situadas en las zonas estudiadas, con presencia reiterada de la acción del sismo. La principal variable en torno a la cual encontramos las dos situaciones mayoritarias tiene que ver con la situación del plano horizontal principal de cubrición en relación a estas cúpulas y bóvedas, las cuales pueden encontrarse sobre esta superficie o integrada en ellas, consiguiendo así un fortalecimiento de este punto tan delicado frente a temblores de cierta magnitud.

La suma de los distintos puntos en común en lo que respecta a los sistemas de tipo urbano y aquellos que basaban su eficacia en la relación con otros elementos, dio lugar a combinaciones realmente eficaces frente al sismo, con situaciones que principalmente se centraron en la mejora del arriostramiento y el atado de las edificaciones históricas.



### 3.4.3 ASPECTOS MATERIALES Y CONSTRUCTIVOS

Como conclusión del análisis efectuado a nivel constructivo y material de los distintos sistemas sismorresistentes se plantean a continuación algunas de las características comunes con mayor transversalidad en lo que respecta a su puesta en práctica en aquellos edificios construidos en fábrica situados en zonas de alto riesgo sísmico.

Uno de los elementos comunes más habituales es la concepción y disposición material de cada uno de los elementos que configuran las estructuras portantes más importantes, con una distribución masiva que concentra la mayor rigidez en las zonas inferiores, tanto de cada uno de los elementos parciales como de la globalidad del edificio.

Como resultado de esta disposición material se obtienen modelos realmente estables, gracias a la perfecta utilización de cada uno de los materiales utilizados en ellos y la consiguiente reducción de altura del centro de gravedad de cada uno de estas estructuras.

El empleo de sistemas de refuerzo externos parte también de esta lógica estable a la hora de plantear contrafuertes, contrapesos y arcos de descarga exteriores, cuya distribución y continuidad material hereda las características del edificio al que sirve, situándose generalmente de manera que se respeten las lógicas internas del esqueleto estructural principal, tanto constructiva como materialmente.

Esta compatibilidad material adquiere un papel de gran relevancia en el caso de las regiones más expuestas a los terremotos, independientemente de que se utilicen uno o varios materiales distintos en los sistemas más complejos. En el caso de las construcciones ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico esta continuidad y homogeneización es frecuente que se manifieste por igual tanto en paños verticales como en planos horizontales, llevando este principio a la totalidad del edificio y asegurando así un comportamiento lo más unitario posible frente a sismo.

No obstante, las variaciones y excepciones que encontramos en este sentido se orientan principalmente a mejorar las facetas que pudieran salir más perjudicadas desde el punto de vista estructural en determinadas construcciones, donde el cambio de material o sistema, por ejemplo en cubierta, proporciona una protección adicional desde el punto de vista de su estabilidad.

La supresión de elementos no portantes y la sustitución material en la ornamentación más prominente también va dirigida en esta dirección en el caso de las edificaciones de mayor significación y simbolismo, donde la reducción de elementos decorativos colgantes, o de gran prominencia, se ven reemplazados por materiales que permiten aligerar la carga ornamental de estas construcciones. Algunos de los recursos más transversales lo encontramos en el empleo de la terracota, los azulejos y otros materiales que permiten enfatizar esta faceta decorativa en los edificios más vulnerables sin que esto suponga perjudicar el desempeño estructural de determinadas áreas de la construcción.



Los sistemas concebidos para resolver los encuentros con el terreno preexistente presentan también algunas analogías entre sí, con una preferencia generalizada por las soluciones basadas en la suma de distintas capas o elementos de dimensión reducida y cuya superposición permite un correcto funcionamiento de este tipo de medidas, gracias a la compactación total o parcial de dichas capas.

A nivel material, la solución más extendida recurre a elementos de origen geológico, aunque las variaciones en este sentido pueden llegar a abarcar distintos materiales de origen vegetal o incluso animal.

Así como en el caso anterior el nivel de cohesión entre piezas o materiales puede llegar a ser muy bajo de cara a fomentar cierto movimiento en estas capas de cimentación, en el caso de los arranques de muros, el nivel de atado que manifiestan las fábricas y sillares empleados consigue minimizar los efectos sísmicos, gracias a la utilización de materiales de mayor resistencia, tal y como sucede con la piedra en la mayoría de casos con este tipo de sistemas. Como posibles variantes, algunas de las alternativas de estos sistemas se basan en la utilización de ladrillos reforzados a nivel interno, a través de su composición material.

El empleo de formatos de grandes dimensiones tuvo como elemento protagonista a la piedra en la mayoría de construcciones situadas en zonas sísmicas, siempre que existiera un acceso relativamente próximo a este tipo de material. La utilización generalizada de este material como elemento de refuerzo responde no sólo a las posibilidades que ofrecían los labrados más exhaustivos, sino también a la propia condición de rigidez que aportaban los elementos de mayor tamaño.

En el caso de las plataformas y basamentos de gran tamaño, esta configuración perimetral suele ir acompañada de materiales aligerantes en su estructura interna, con rellenos conglomerantes que pueden llegar a albergar de manera complementaria gran cantidad de materiales y formatos adicionales para endurecer este tipo de núcleos.

Este tipo de estrategias tuvo su reflejo también en gran cantidad de estructuras verticales con función portante, tal y como sucede en columnas, muros y otros elementos de gran verticalidad presentes en la arquitectura histórica de fábrica. Si bien la solución más empleada hacía uso de un único material conglomerante en la mayoría de casos, existen variantes de este sistema que incluyeron además distintos componentes y piezas a modo de áridos, tal y como sucede con diversos materiales de naturaleza pétreo, cerámica, vegetal o también algunos de origen animal.

El desarrollo experimentado por los sistemas de unión llevó a los constructores de la antigüedad a explorar otra de las medidas más transversales que se encuentran en las construcciones históricas de fábricas, y que permitía sustituir la capa de mortero por conectores puntuales de origen metálico y vegetal, insertados directamente en las hendiduras realizadas en las fábricas con el objetivo de servir de elemento de atado puntual. De esta manera se lograba reducir el empleo generalizado de mortero en toda la estructura o directamente llegar a prescindir de él. Las variantes que desarrollaron las distintas culturas históricas dependen mucho del tipo de fábrica empleada en las edificaciones, llegando a encontrar conectores de origen metálico o vegetal, o incluso de tipo conglomerante, pétreo o mixto.

El uso de sillares o ladrillos de composición aligerada tuvo su reflejo en todas las facetas del esqueleto estructural. Aunque en la mayoría de casos su uso se hizo extensivo a varias hiladas y paños completos, existen algunos ejemplos que limitaron su uso a determinadas hiladas puntuales, o tramos de ellas, ya fuera de manera consecutiva o alterna.

Esta circunstancia podía tener relación en algunos casos con la manera de distribuir los distintos materiales en un mismo muro, columna o cualquier otro paño con función estructural, cuya disposición solía agrupar las distintas fábricas en función de sus características materiales y la localización de dichos elementos dentro del esqueleto estructural de los edificios situados en zonas de gran sismicidad.

En lo que respecta al empleo de refuerzos y armados integrados en las estructuras de fábrica, destaca sobre todo el uso de materiales de origen vegetal, con los cuales era posible dotar a la estructura de un comportamiento sismorresistente de gran eficacia en situaciones de sismo, respetando varios de los principios ya mencionados, tal y como se desarrolla en el apartado siguiente. Este tipo de refuerzos se desarrolló principalmente a través de dos mecanismos, vinculados al fortalecimiento puntual o lineal de determinados puntos internos de la estructura, o bien al refuerzo superficial de éstos a través de soluciones continuas en forma de malla o armado.

No obstante, la consolidación y generalización de este tipo de solución material no impidió que se experimentara con otras soluciones materiales para ejercer estas mismas funciones de atado, tal y como vemos con algunos refuerzos puntuales de origen metálico, pétreo o a través de una combinación mixta de cualquier de estos elementos mencionados.

Por su parte, los puntos más vulnerables desde el punto de vista de la concentración de tensiones, como podían ser esquinas y huecos, el recurso más habitual consistió en reforzar estas esquinas a través de piezas de piedra de mayores dimensiones, arriostrando y rematando este punto débil de las estructuras de fábrica que sufren los movimientos horizontales de los seísmos. La variabilidad de estos sistemas queda patente en la diversidad de tamaños, distribución, labrado, maclado y traba de estas piezas de esquina, con diferentes desarrollos constructivos en función de las culturas y el tipo de fábricas empleadas.

A la hora de plantear la incorporación de los sistemas de arriostramiento interno, la mayor parte de estructuras que hicieron uso de tirantes de atado recurrieron al uso de la madera como material para configurar estos sistemas de unión entre muros y columnas, revelándose como uno de los sistemas de mayor transversalidad cuando se trata de asegurar la estabilidad de estos elementos. Sólo en aquellos casos que han sufrido intervenciones más recientes es posible observar también el uso excepcional de tirantes metálicos para arriostrar interiormente algunas de las construcciones históricas más afectadas por los terremotos, tal y como sucede en determinadas edificaciones de Irán y Bengala.

En el plano interno de cada uno de los elementos constructivos la relación entre los sistemas de refuerzo y los encuentros entre distintos componentes estructurales atiende principalmente a criterios de consolidación de los elementos de mayor vulnerabilidad a la hora de afrontar grandes terremotos, siendo habitual por

ejemplo la disposición de grandes anillos de arriostramiento en las coronaciones de los muros o la utilización de armados vegetales entre distintas hiladas de fábricas. En estos sistemas de atado, de nuevo predomina como elemento común el uso de la piedra, debido sobre todo a su capacidad rigidizadora y una mayor resistencia ante situaciones de movimientos sísmicos.

Ya a nivel de cubierta, la utilización de bóvedas y cúpulas de doble o triple capa supuso todo un desafío constructivo que demandaba cierta atención de cara a tratar los espacios intermedios generados entre ellos. A este respecto la disposición de un núcleo central rigidizador sirvió de ayuda durante el proceso de construcción y conservación de estos grandes elementos de cubrición, manteniéndose en algunos casos como subestructuras internas que conectan ambas hojas de fábrica, principalmente en el caso de las cúpulas de mayores dimensiones, donde ha sido posible su observación.

Dada la posición central de este elemento, la concepción material de este eje podía llegar a suponer una importante sobrecarga para la primera de las capas que cubren algunos de los espacios de mayores dimensiones. Es por ello que en la mayoría de casos se plantearon piezas ligeras, normalmente de origen vegetal, para poder conectar las distintas capas que conformaban este tipo de cubiertas, asegurando así un mejor desempeño de todo el conjunto al atender a distintos principios sismorresistentes.

Para aquellos conectores de refuerzo ubicados entre las distintas capas de cubrición, se introdujeron una serie de costillas con desarrollo radial y uniforme en algunas de las cubiertas ubicadas en zonas de riesgo sísmico. La compatibilidad material de estas piezas respecto a las fábricas utilizadas en la construcción de bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición se erigió como una de las características comunes en este tipo de arriostramientos entre capas, los cuales podían presentar a su vez una serie de conectores que los atase internamente, ya fuese de manera diametral o lateral, logrando así un comportamiento lo más unitario posible.

En lo que se refiere al tratamiento de las juntas, los morteros planteados en las construcciones históricas de fábrica presentan una gran variabilidad que se refleja en el gran número de tipos de juntas que se pueden identificar en las regiones con una gran exposición al sismo, sobre todo en lo que respecta a su composición material. No obstante, se puede determinar de manera generalizada que en estas construcciones el tratamiento de estas juntas normalmente suele ir ligado a una búsqueda y mejora de las propiedades dúctiles y elásticas de dichos morteros, los cuales pueden ir mezclados con distintos materiales como tobas, fibras vegetales o fragmentos cerámicos triturados, entre otros.

Esta variabilidad material y las combinaciones a la que puede dar lugar, están presentes también en otros sistemas de mejora elástica de los edificios históricos, en los que se suele recurrir a elementos de origen vegetal o cerámico para incorporar elementos puntuales o lineales de mayor ductilidad. La experimentación material que se manifiesta en estas zonas se revela como una de las características comunes en las regiones de mayor sismicidad, donde se llegó incluso a recurrir a fábricas con una composición material mejorada, tal y como vemos en distintos tipos de ladrillos en los que se incorporaron restos de elementos aligerados para fomentar esta ductilidad general en los elementos portantes o en sillares de naturaleza ígnea.

### 3.4.4 ASPECTOS FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES

Gracias a la identificación de los distintos tipos de sistemas sismorresistentes es posible distinguir las distintas funciones estructurales de cada uno de los elementos que los conforman. A partir de aquí, el análisis estructural de muchas de estas medidas nos revela una función estructural con múltiples aristas, dando respuesta a uno o varios de los principios sismorresistentes desarrollados con anterioridad al principio de este apartado.

En este sentido uno de los aspectos transversales que se repiten en muchas de las arquitecturas expuestas al sismo tienen que ver con esta función múltiple de los sistemas identificados, proporcionando por ejemplo un mecanismo de atado que a su vez permita aligerar la estructura.

Las distintas situaciones de respuesta sismorresistente que encontramos en un mismo sistema son enormes, tal y como ocurre también en sistemas que permiten aislar sísmicamente la estructura desde el nivel del suelo a la vez que proporcionan cierto arriostamiento a la estructura, o bien en aquellos sistemas que además de fomentar situaciones de cierta elasticidad y ductilidad favorecen un aligeramiento general de toda la estructura.

Por contra, esta multifuncionalidad se reproduce y se combina también con otras funciones no estructurales que pueden tener que ver con cuestiones más ligadas al uso del edificio o a aspectos propios de la tipología en las que se implementaron. Esta realidad puede llegar a enmascarar gravemente los distintos sistemas localizados, tal y como se desarrolla más adelante en el apartado vinculado a la intervención sobre este tipo de patrimonio ubicado en zona de gran sismicidad.

Uno de los sistemas sismorresistentes que podrían enmarcarse en este grupo son aquellos que hacen uso de grandes plataformas y basamentos en sus encuentros con el terreno, sean específicos para un único edificio o para la agrupación de varios de ellos. En muchos de estos casos la creación de estos grandes basamentos suele ir vinculado a la trascendencia de las construcciones erigidas sobre ellos.

Sin embargo, la utilización de estos basamentos, de mayor o menor desarrollo, presenta unas implicaciones sismorresistentes que van íntimamente ligadas al principio de aislamiento sísmico que se persigue en las construcciones situadas en zonas de gran peligrosidad sísmica.

En lo que respecta a estas subestructuras intermedias, es importante distinguir la función portante de éstas además de otras que se pudieran haber atribuido de manera generalizada a ellas, con más o menos acierto, tal y como ocurre en los países con mayor presencia de lluvias torrenciales, inundaciones y otras catástrofes climáticas muy distintas a los fenómenos sísmicos, cuyas condiciones pluviales invitan a asociar estos elementos con las lluvias estacionales en lugar de con unos terremotos que pueden tener también una gran recurrencia según la región en la que nos encontremos.

Este tipo de sistemas presenta elementos comunes entre los distintos tipos desarrollados, con una función de atado perfectamente establecida en la mayoría de casos, ya sea mediante elementos de mayor resistencia

o tamaño, pero siempre con un carácter más robusto que las fábricas empleadas en el elemento portante principal.

Alternativamente, estos sistemas también pueden llegar a presentar semejanzas o analogías en lo que respecta al mecanismo de aislamiento sísmico que ofrecen, basado en la mitigación de las fuerzas horizontales a través de elementos que aportan deslizamiento y rodamiento a todo el conjunto, y constituidos generalmente por piezas de origen vegetal conectadas entre sí o bien mediante la superposición de distintas capas o fragmentos de origen geológico.

La racionalidad sísmica de gran parte de estas construcciones que se han mantenido en pie hasta nuestros días, queda patente en distintos rincones del esqueleto estructural, tal y como puede apreciarse simplemente en el modo de plantear la ubicación y relación de los distintos elementos interiores.

El uso de simetría y de una modulación interior muy estricta permitió a muchas de estas edificaciones plantear esqueletos estructurales con una organización en planta muy similar entre modelos muy distantes geográfica y temporalmente, tal y como sucede por ejemplo comparando las plantas de templos hispánicos en América (Fig.3.210) y en Bengala (Fig.3.211).

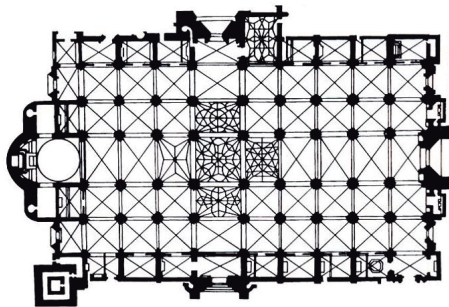


Fig. 3,512 Catedral de Sevilla (Arte Historia)

Muchas de las muestras seleccionadas presentan una retícula de arcos enjutados y columnas que se revela a priori como uno de los elementos más fieles a los principios de estabilidad que debe cumplir cualquier edificio en zona sísmica, no sólo por la disposición simétrica que consiguen, sino también por el funcionamiento estructural en forma de “caja”.

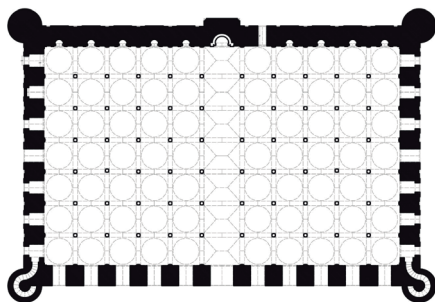


Fig. 3,513 Mezquita de las Sesenta Cúpulas (Autor)

Gracias a la configuración que permiten este tipo de retículas se consigue modular el edificio también en altura, con volumetrías compactas gracias a la disposición de naves a la misma altura. Esta condición fue ampliamente reproducida en multitud de casos ubicados en las regiones seleccionadas en esta investigación, pero también en otras regiones de alta sismicidad que persiguieron una forma unitaria ante situaciones de sismo. Como consecuencia de esto, la mayoría de los modelos obtenidos dieron como resultado estructuras cerradas en las que apenas se

plantearon huecos en fachada y los que se abrieron presentaron dimensiones reducidas en comparación con la totalidad del edificio. Se trata por tanto de edificios generalmente oscuros, sin gran aportación de luz natural desde el exterior.

Ligados al esqueleto principal de todo el conjunto, la apertura de huecos, nichos y otras hornacinas laterales, suele conservar una correspondencia clara y directa con las naves y los espacios generados a través de los entramados murarios, coincidiendo la mayoría de veces con los ejes estructurales principales y los espacios intermedios que quedan entre ellos, tanto en planta como en sección.

Desde el punto de vista de aquellos sistemas con una doble función estructural y ornamental, es importante distinguir el efecto de atado que se consigue a través de estas medidas que en ocasiones aportan un arriostramiento complementario a estructuras como bóvedas, cúpulas y otros elementos de cubrición. Un ejemplo de ello se puede observar en los arriostramientos internos que proporcionan los arcos, costillas y nervios que configuran las distintas áreas abovedadas de distintas zonas expuestas a sismo, cuyos complejos desarrollos e intersecciones responden a una cuestión estética, pero también a un rol estructural que consolida el modelo estable de estas cubiertas.

Algo similar ocurre con la disposición de capas de cubrición dobles o triples, con las que se consigue elevar elementos icónicos como grandes cúpulas o naves abovedadas a la vez que se fortalecen las capas principales mediante un arriostramiento adicional que estabiliza estas grandes estructuras situadas en las cubiertas.

A nivel interno, esta transición entre hojas estructurales de distintas geometrías se conectó con algunos de los sistemas ya reseñados, los cuales, además de facilitar la propia labor de construcción de estas grandes estructuras, se conservaron en muchos casos como verdaderos esqueletos interiores, dotando de un atado adicional de gran complejidad a este tipo de elementos de cubrición, ya fuese a través de pequeños contrafuertes, tirantes o de un núcleo central rigidizador dispuesto en su interior.

En lo que se refiere a las estrategias de atado que se plantean mediante el uso de rellenos en los entramados murarios, la forma de estos sillares suele presentar acabados irregulares, de cara a abaratar la puesta en obra de estas pesadas piezas, pero también para facilitar un mejor agarre de los morteros vertidos entre las capas de fábrica.

De igual forma, el reemplazo de mortero por conectores puntuales de mayor ligereza, no sólo se relaciona con los aspectos culturales dentro del desarrollo arquitectónico o estilístico de determinadas regiones, sino que también mejora de manera sustancial el comportamiento sismorresistente de las estructuras murarias planteadas en algunos casos, en los que esta función conglomerante y de atado puede haber sido asignada a otros elementos comunes de la arquitectura de fábrica situada en zonas de gran sismicidad, tal y como ocurre con las grapas o clavijas metálicas ocultas en el interior de los muros.

Otro de los puntos comunes donde se aprecia una doble función de los sistemas sismorresistentes se encuentra en los grandes sistemas de refuerzo de arcos y otras estructuras portantes de gran significación, cuya



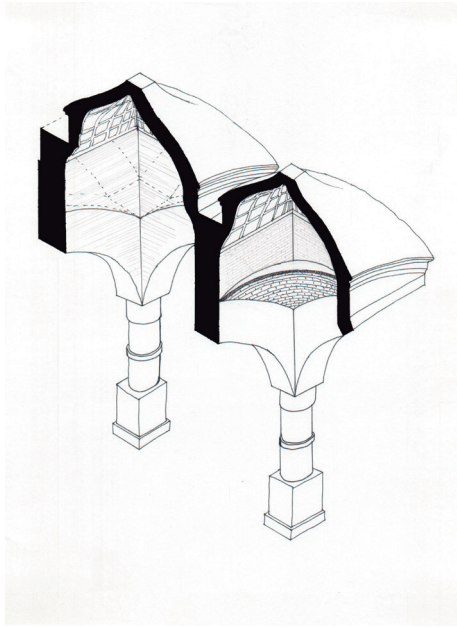


Fig. 3.514 Entramado de muros enjutas en Bengala (Autor)

estructura viene enmarcada en muchos casos mediante formas cuadradas o rectangulares a través de distintos mecanismos como son las enjutas en el caso de las catedrales góticas, o los alfices en la arquitectura de tradición musulmana. En aquellos casos dispuestos exteriormente, la multifuncionalidad de estas grandes subestructuras de refuerzo tiene que ver tanto con la función simbólica de estos elementos de acceso y/o cubrición como con el desempeño estructural que ejercen sobre ellos, ejerciendo un papel estabilizador clave a la hora de asegurar el conjunto del esqueleto de fábrica (Fig.3.212).

En muchas de estas construcciones icónicas se hace uso de un entramado murario muy similar al empleado en otras zonas del mundo, como por ejemplo sucede en la catedral de Sevilla (Fig.3.213), sobre todo en lo que respecta a su comportamiento estructural frente a sismo, donde se enjutan los arcos formeros y fajones con el fin de arriostrar el conjunto, pero con la diferencia de usar en un caso las bóvedas de crucería y en otro las cúpulas.

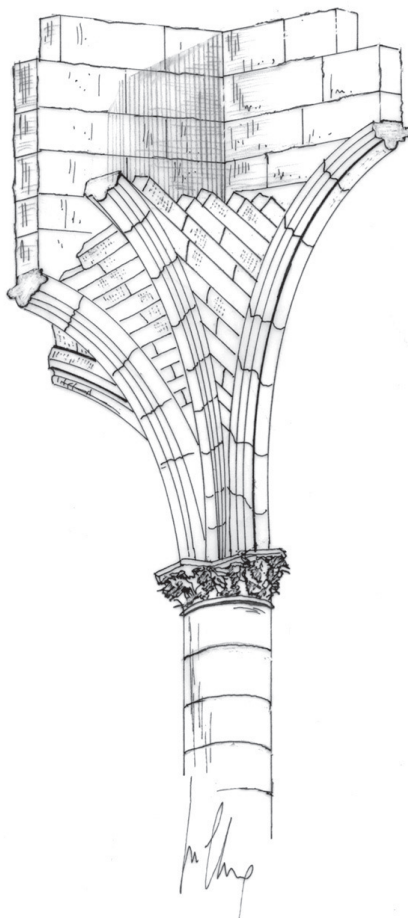


Fig. 3.515 Enjutas de Sevilla (Cassinello)

Esta circunstancia facilita el acabado aterrazado de las cubiertas, ocultando así estas enjutas bajo los rellenos depositados para conseguir un acabado horizontal en ellas. Volviendo al ejemplo comparativo entre Sevilla y Bengala, la concepción de las cubiertas de esta región asiática también albergó otro motivo climático para buscar y forzar esta horizontalidad homogénea en todo el plano superior, ya que a través de una ligera inclinación de la superficie de cubrición se conseguía también una correcta y rápida evacuación de las abundantes lluvias que podían llegar a caer sobre las cubiertas de estos templos.

De manera análoga se conciben importantes similitudes en lo que se refiere a la disposición de los grandes contrafuertes perimetrales, y que en el caso de la arquitectura histórica de fábrica se manifiestan internamente ocultos en la función separadora que también ejercen a la hora de separar las distintas capillas o salas laterales, tan habituales en la arquitectura religiosa de distintas culturas que erigieron sus templos en zonas de gran exposición sísmica. Este tipo de estrategias permite acentuar la concepción cerrada y en forma de caja de todo el conjunto, proporcionando un refuerzo necesario que es fácilmente identificable en las plantas y secciones de los templos

ubicados en estas regiones.

Este carácter compacto se observa también en las construcciones con plantas centralizadas, donde se reprodujo en ocasiones una transición desde un perímetro exterior rectangular a espacios interiores que favorecían un fortalecimiento de estos muros exteriores, gracias a acumular una mayor carga masiva en ellos para poder realizar con garantías esta conversión desde la geometría cuadrada del exterior a la forma circular de las grandes cúpulas de remate.

La incorporación de elementos genuinamente simbólicos o incluso litúrgicos como sistemas de refuerzo estructural tiene un gran reflejo en la arquitectura histórica de fábrica situada en zonas de alta sismicidad. Uno de los elementos donde se produce esta asimilación funcional se concentra en algunos de los puntos más vulnerables ante situaciones de sismo, tal y como sucede en esquinas y huecos de las construcciones de fábrica, donde es frecuente encontrar situados distintos elementos de gran verticalidad como torres o minaretes para fortalecer la estructura. Esta integración suele presentar características singulares que alteran en cierto modo los desarrollos volumétricos más habituales, llegando a absorber incluso la función principal de estos elementos de cara a fortalecer la faceta estabilizadora que adquieren estos elementos al situarlos en las esquinas de las construcciones más monumentales, tal y como vemos por ejemplo en las torre-minarete que se extienden por todo el territorio bengalí.

Esta evolución formal, funcional, constructiva y cultural que experimentaron algunos elementos constructivos originó una serie de cambios y desarrollos singulares y específicos para aquellas regiones que se vieron sometidas a la acción constante del sismo, modulando en cierta manera la forma en la que se utilizaron y se plantearon muchos de los elementos característicos de las arquitecturas implementadas en ellas.

---

Como síntesis de este apartado y los anteriores, se incluye a continuación un resumen en forma de cuatro tablas que ponen de manifiesto la presencia de los diferentes sistemas identificados en los tres casos analizados en esta investigación (Irán, Perú y Bengala), y que pueden encontrarse más detallados en las correspondientes fichas de los anexos ("Anexo 5.4 Fichas de las muestras seleccionadas").

En ellas se referencian los sistemas presentes en las muestras seleccionadas, utilizando el código alfanumérico de las distintas variantes recogidas en el capítulo anterior, atendiendo así a la clasificación propuesta para los diversos sistemas identificados, organizados en tipos y subtipos, con las variantes correspondientes.

Esta organización taxonómica permite poner de relieve lo sintetizado en este apartado, reflejando y poniendo de manifiesto los elementos comunes más relevantes dentro de cada uno de los aspectos que se acaban de mencionar en este capítulo a través de las seis muestras de cada una de las tres regiones analizadas, así como los elementos comunes más frecuentes y las variaciones más extendidas entre los sistemas más habituales dentro de estas arquitecturas históricas de fábrica.



| GRUPOS                                            | TIPOS                     | SUBTIPOS                                                                  | Nº variantes<br>identificadas en<br>cada subtipo  | IRÁN    |         |         |         |         | PERÚ    |         |         |         |         | BENGALA |         |         |         |         |         |         |         |       |
|---------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
|                                                   |                           |                                                                           |                                                   | Caso 01 | Caso 02 | Caso 03 | Caso 04 | Caso 05 | Caso 06 | Caso 07 | Caso 08 | Caso 09 | Caso 10 | Caso 11 | Caso 12 | Caso 13 | Caso 14 | Caso 15 | Caso 16 | Caso 17 | Caso 18 |       |
| A- Configuración<br>general de la<br>construcción | Urbano<br>(entorno)       | 01                                                                        | Compacidad urbana                                 | 4 (a-d) | A01-d   | A01-a   | A01-b   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-b   | A01-b   | A01-d   | A01-c   | A01-d   | A01-c   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d   |       |
|                                                   |                           | 02                                                                        | Anexión externa de edificios adyacentes           | 3 (a-c) | A02-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A02-a   | -       | A02-a   | -       | A02-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
|                                                   |                           | 03                                                                        | Fragmentación en volúmenes independientes         | 4 (a-d) | -       | A03-a   | A03-b   | A03-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
|                                                   |                           | 04                                                                        | Adaptación topográfica, urbana y climática        | 4 (a-d) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
|                                                   |                           | 05                                                                        | Agrupación y atado de edificios                   | 3 (a-c) | -       | A05-a   | A05-a   | A05-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A04-c   | A04-d   | A04-d   | -       | A04-d |
|                                                   | Volumétrico<br>(exterior) | 06                                                                        | Ortogonalidad exterior                            | 4 (a-d) | -       | -       | A06-b   | A06-b   | A06-c   | -       | -       | A06-b   | A06-b   | -       | A06-d   | -       | A06-d   | -       | -       | -       | -       | -     |
|                                                   |                           | 07                                                                        | Simetría exterior                                 | 4 (a-d) | A07-b   | A07-d   | A07-a   | A07-a   | A07-a   | -       | -       | A07-a   | A07-a   | A07-a   | -       | -       | -       | A07-a   | A07-a   | A07-a   | A07-a   | A07-a |
|                                                   |                           | 08                                                                        | Compacidad volumétrica                            | 4 (a-d) | -       | -       | -       | -       | A08-b   | A08-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A08-b   | A08-b   | A08-b   | A08-b   | A08-b |
|                                                   |                           | 09                                                                        | Reducción de altura del centro de gravedad        | 4 (a-d) | -       | -       | -       | -       | A09-d   | -       | A09-c   | -       | -       | -       | -       | A09-d   | A09-a   | A09-c   | A09-c   | A09-c   | A09-c   | A09-c |
|                                                   |                           | 10                                                                        | Reducción de elementos prominentes y ornamentales | 4 (a-d) | -       | A10-d   | -       | -       | A10-b   | -       | -       | -       | -       | A10-b   | -       | -       | A10-b   | A10-a   | A10-a   | A10-a   | A10-a   | A10-a |
|                                                   | Espacial<br>(interior)    | 11                                                                        | Contrafuertes exteriores                          | 6 (a-f) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A11-b   | A11-b   | A11-a   | A11-a   | A11-a   |       |
|                                                   |                           | 12                                                                        | Contraespacios superiores                         | 5 (a-e) | -       | -       | -       | -       | -       | A12-b   | A12-b   | -       | -       | A12-b   | -       | A12-b   | -       | A12-a   | A12-a   | A12-a   | A12-a   | A12-a |
|                                                   |                           | 13                                                                        | Arcos de descarga                                 | 4 (a-d) | -       | -       | -       | -       | -       | A13-a   | -       | -       | -       | A13-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |
| Constructivo<br>(general)                         | 14                        | Simetría interior                                                         | 4 (a-d)                                           | A14-a   | A14-c   | A14-a   | A14-a   | A14-b   | A14-a   | A14-d   | A14-d   | A14-d   | A14-d   | -       | A14-d   | A14-d   | A14-a   | A14-a   | A14-a   | A14-a   | A14-a   |       |
|                                                   | 15                        | Centralización de la planta                                               | 8 (a-h)                                           | -       | -       | -       | -       | -       | A15-e   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A15-d   | -       | -       | -       |       |
|                                                   | 16                        | Modulación interior                                                       | 4 (a-d)                                           | -       | A16-d   | -       | A16-c   | A16-a   | -       | A16-c   | A16-c   | -       | A16-c   | A16-c   | -       | A16-c   | A16-c   | A16-a   | A16-c   | A16-a   | A16-a   |       |
|                                                   | 17                        | Disposición de naves a misma altura                                       | 4 (a-d)                                           | -       | A17-b   | A17-b   | A17-a   | -       | -       | A17-a   | A17-a   | -       | A17-a   | A17-a   | -       | A17-a   | A17-a   | A17-a   | A17-a   | A17-a   | A17-a   |       |
|                                                   | 18                        | Integración de contrafuertes interiores dentro de la volumetría principal | 3 (a-c)                                           | A18-a   | A18-a   | A18-c   | A18-b   | A18-c   | A18-c   | A18-a   | A18-a   | A18-c   | A18-a   | A18-a   | A18-a   | A18-a   | A18-a   | A18-a   | A18-a   | A18-a   | A18-a   |       |
|                                                   | 19                        | Apertura e integración de huecos, nichos y hornacinas laterales           | 3 (a-c)                                           | A19-b   | -       | A19-b   | A19-b   | A19-b   | A19-b   | A19-a   | A19-a   | -       | A19-a   | A19-a   | -       | A19-a   | A19-a   | A19-a   | A19-a   | A19-a   | A19-a   |       |
|                                                   | 20                        | Continuidad material en los distintos planos                              | 5 (a-e)                                           | A20-a   | A20-a   | A20-a   | A20-a   | A20-a   | A20-a   | -       | -       | A20-b   | -       | A20-b   | -       | A20-b   | A20-b   | A20-b   | A20-b   | A20-b   | A20-b   |       |
|                                                   | 21                        | Inclinación de elementos constructivos                                    | 5 (a-e)                                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A21-e   | A21-e   | -       | A21-e   | A21-e   | A21-e   | A21-e   | A21-e   |       |
|                                                   | 22                        | Reducción del número y la dimensión de huecos                             | 4 (a-d)                                           | -       | -       | A22-b   | A22-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |
|                                                   | 23                        | Suspensión de elementos no portantes y simplificación ornamental          | 4 (a-d)                                           | A23-c   | A23-d   | A23-b   | A23-b   | A23-c   | A23-b   | A23-b   | A23-b   | A23-b   | -       | A23-c   | A23-c   | A23-c   | A23-a   | A23-a   | A23-a   | A23-a   | A23-a   |       |

| GRUPOS                 | TIPOS                            | SUBTIPOS                                                                 | Nº variantes<br>identificadas en<br>cada subtipo                          | IRÁN    |         |         |         |         | PERÚ    |         |         |         |         | BENGALA |         |         |         |         |         |         |
|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                        |                                  |                                                                          |                                                                           | Caso 01 | Caso 02 | Caso 03 | Caso 04 | Caso 05 | Caso 06 | Caso 07 | Caso 08 | Caso 09 | Caso 10 | Caso 11 | Caso 12 | Caso 13 | Caso 14 | Caso 15 | Caso 16 | Caso 17 |
| 3 - Estructura muraria | 01                               | Aislamiento<br>sísmico                                                   | 01 Disposición de distintas capas de cimentación bajo los muros           | 9 (a-i) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 02 Sistemas de rodamiento y deslizamiento                                 | 6 (a-f) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 03 Arranque de muros mediante zócalos de mayor resistencia                | 5 (a-e) | B03-a   | -       | B03-a   | B03-a   | -       | B03-a   | B03-a   | -       | B03-a   | B03-a   | -       | B03-a   | -       | B03-a   | -       | B03-a   |
|                        |                                  |                                                                          | 04 Plataformas y basamentos inclinados o en forma de talud                | 6 (a-f) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 05 Utilización de hiladas y piezas de gran tamaño y resistencia           | 8 (a-h) | -       | -       | B05-a   | B05-a   | -       | B05-a   | B05-a   | -       | B05-a   | B05-a   | -       | B05-a   | -       | B05-a   | -       | -       |
|                        |                                  | 02 Aligeramiento                                                         | 06 Supresión de paños y otros elementos no portantes                      | 4 (a-d) | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | -       | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   |
|                        |                                  |                                                                          | 07 Rellenos aligerantes dentro del entramado murario                      | 4 (a-d) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 08 Reemplazo del mortero por conectores puntuales de mayor ligereza       | 5 (a-e) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 09 Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera | 4 (a-d) | -       | B09-d   | -       | -       | -       | -       | B09-b   | -       | B09-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 10 Distribución gradual de los materiales según su peso                   | 5 (a-e) | -       | -       | B10-b   | B10-b   | -       | B10-c   | B10-b   | -       | B10-b   | -       | -       | -       | -       | B10-b   | B10-c   | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 11 Reducción de decoración no estructural                                 | 6 (a-f) | B11-d   | B11-f   | B11-c   | B11-d   | B11-c   | B11-c   | B11-c   | B11-c   | -       | B11-d   | B11-d   | B11-d   | B11-a   | B11-a   | B11-a   | B11-a   |
|                        | 03 Atado y unión<br>de elementos | 12 Entramados de enjutas                                                 | 6 (a-f)                                                                   | -       | B12-e   | B12-e   | B12-e   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | B12-f   | B12-f   | B12-f   | B12-f   | B12-f   | B12-f   |         |
|                        |                                  | 13 Refuerzos y armados integrados dentro del entramado murario           | 8 (a-h)                                                                   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                        |                                  | 14 Refuerzos de esquinas y huecos a través de sus propias fábricas       | 7 (a-g)                                                                   | -       | B14-g   | -       | -       | -       | -       | B14-d   | B14-d   | -       | -       | -       | B14-d   | B14-d   | B14-d   | B14-d   | B14-e   |         |
|                        |                                  | 15 Refuerzos exteriores, contrafuertes y arcos de descarga               | 11 (a-k)                                                                  | -       | -       | B15-e   | B15-e   | -       | -       | -       | -       | B15-c   | B15-c   | -       | B15-a   | B15-a   | B15-a   | B15-a   | B15-a   |         |
|                        |                                  | 16 Conectores entre sillares y ladrillos                                 | 6 (a-f)                                                                   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                        |                                  | 17 Incorporación de tirantes y codales                                   | 4 (a-d)                                                                   | B17-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | B17-d   | B17-d   | -       | B17-d   |         |
|                        |                                  | 18 Traba y maclado de las fábricas                                       | 7 (a-g)                                                                   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                        |                                  | 19 Arriostamiento de los muros y sus arranques y cimentaciones           | 6 (a-f)                                                                   | B19-c   | -       | -       | B19-c   | B19-c   | -       | B19-c   | B19-c   | B19-c   | B19-c   | B19-c   | B19-c   | -       | -       | B19-c   | -       |         |
|                        |                                  | 04 Elasticidad y<br>ductilidad                                           | 20 Tratamiento singular de las juntas                                     | 9 (a-i) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 21 Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad               | 8 (a-h) | B21-h   | B21-g   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  |                                                                          | 22 Integración de elementos lineales de mayor ductilidad                  | 6 (a-f) | B22-f   | -       | -       | -       | -       | -       | B22-a   | -       | B22-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                        |                                  | 23 Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar | 7 (a-g)                                                                   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | B23-a   | -       | B23-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |

Elaboración propia

| GRUPOS                                    | TIPOS                            | SUBTIPOS                                                                       | Nº variantes por cada subtipo<br>(código alfabético)                     | IRÁN    |         |         |         |         | PERÚ    |         |         |         |         | BENGALA |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                           |                                  |                                                                                |                                                                          | Caso 01 | Caso 02 | Caso 03 | Caso 04 | Caso 05 | Caso 06 | Caso 07 | Caso 08 | Caso 09 | Caso 10 | Caso 11 | Caso 12 | Caso 13 | Caso 14 | Caso 15 | Caso 16 | Caso 17 | Caso 18 |
| C - Columnas y otros elementos verticales | 01<br>Aislamiento sísmico        | 01 Disposición de distintas capas de cimentación bajo los elementos verticales | 9 (a-i)                                                                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 02 Sistemas de rodamiento y deslizamiento                                      | 6 (a-f)                                                                  | -       | -       | -       | C02-d   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 03 Arranque de elementos verticales mediante materiales de mayor resistencia   | 5 (a-e)                                                                  | C03-a   | -       | C03-a   | C03-a   | -       | C03-a   | C03-c   | -       | C03-a   | C03-a   | -       | C03-a   | C03-a   | C03-a   | C03-a   | C03-c   | C03-a   |         |
|                                           |                                  | 04 Basamentos inclinados y grandes plataformas de arranque                     | 5 (a-e)                                                                  | -       | -       | C04-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C04-d   | -       | -       | C04-c   |         |
|                                           |                                  | 05 Utilización de piezas de gran tamaño y resistencia                          | 4 (a-d)                                                                  | -       | -       | C05-c   | C05-c   | -       | -       | -       | C05-c   | C05-c   | -       | C05-c   | -       | C05-a   | C05-a   | C05-a   | C05-a   | C05-a   |         |
|                                           | 02<br>Aligeramiento              | 06 Reducción de esbeltez y altura del centro de gravedad                       | 5 (a-e)                                                                  | -       | -       | -       | C06-b   | -       | -       | -       | C06-e   | -       | C06-e   | C06-e   | C06-c   | C06-b   | C06-b   | C06-b   | C06-b   | C06-b   |         |
|                                           |                                  | 07 Rellenos aligerantes dentro del núcleo de los elementos verticales          | 4 (a-d)                                                                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 08 Reemplazo del mortero por conectores puntuales de mayor ligereza            | 10 (a-i)                                                                 | -       | -       | -       | C08-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 09 Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera      | 4 (a-d)                                                                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C09-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 10 Distribución gradual de los materiales según su peso                        | 5 (a-e)                                                                  | -       | -       | C10-e   | C10-e   | -       | -       | C10-e   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C10-e   | C10-d   | -       |         |
|                                           | 03<br>Atado y unión de elementos | 11 Reducción de decoración no estructural                                      | 6 (a-f)                                                                  | C11-a   | C11-a   | C11-d   | C11-d   | C11-d   | C11-a   | C11-a   | C11-a   | -       | C11-a   | C11-a   | C11-f   | C11-f   | C11-f   | C11-f   | C11-f   | C11-f   |         |
|                                           |                                  | 12 Refuerzos integrados en columnas y otros elementos verticales               | 4 (a-d)                                                                  | -       | -       | C12-d   | -       | C12-a   | -       | -       | C12-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 13 Refuerzos de esquinas y huecos a través de sus propias fábricas             | 6 (a-f)                                                                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C13-c   | C13-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 14 Refuerzos exteriores, contrafuertes y arcos de descarga                     | 6 (a-f)                                                                  | C14-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C14-b   | C14-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 15 Conectores entre sillares y ladrillos                                       | 6 (a-f)                                                                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 16 Incorporación de tirantes                                                   | 5 (a-e)                                                                  | C16-d   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C16-e   | C16-e   | -       | C16-e   | C16-e   |         |
|                                           |                                  | 17 Traba y maciado de las fábricas                                             | 7 (a-g)                                                                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 18 Arriostramiento de los elementos verticales y sus arranques y cimentaciones | 6 (a-f)                                                                  | C18-c   | -       | -       | C18-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C18-c   | C18-b   | C18-c   | C18-b   | C18-b   |         |
|                                           |                                  | 19 Núcleo central rigidizador dentro de los elementos verticales               | 7 (a-g)                                                                  | -       | -       | -       | -       | C19-a   | C19-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C19-a   | -       | -       | -       | -       |         |
|                                           |                                  | 04<br>Elasticidad y ductilidad                                                 | 20 Tratamiento singular de las juntas                                    | 9 (a-i) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                           |                                  |                                                                                | 21 Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad              | 8 (a-h) | C21-h   | C21-g   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                           |                                  |                                                                                | 22 Integración de elementos lineales de mayor ductilidad                 | 5 (a-e) | C22-c   | -       | -       | -       | C22-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                           |                                  |                                                                                | 23 Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar | 7 (a-g) | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | C23-a   | C23-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       |

| GRUPOS                                                   | TIPOS                         | SUBTIPOS | Nº variantes identificadas en cada subtipo                             | IRÁN    |         |         |         |         |         | PERÚ    |         |         |         |         |         | BENGALA |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                          |                               |          |                                                                        | Caso 01 | Caso 02 | Caso 03 | Caso 04 | Caso 05 | Caso 06 | Caso 07 | Caso 08 | Caso 09 | Caso 10 | Caso 11 | Caso 12 | Caso 13 | Caso 14 | Caso 15 | Caso 16 | Caso 17 | Caso 18 |
| D - Cubiertas (bóvedas, cúpulas y otros elem. cubrición) | 01 Aislamiento sísmico        | 01       | Sistemas de deslizamiento en su encuentro con la estructura muraria    | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 02       | Arranque de cubiertas mediante materiales de mayor resistencia         | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          | 02 Aligeramiento              | 03       | Reducción de esbeltez y altura del centro de gravedad                  | -       | D03-a   | D03-c   | D03-c   | -       | -       | D03-c   | -       | D03-c   | D03-b   | D03-b   | D03-b   | D03-c   | D03-c   | D03-c   | D03-c   | D03-c   | D03-c   |
|                                                          |                               | 04       | Rellenos aligerantes dentro de las cubiertas                           | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 05       | Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 06       | Distribución gradual de los materiales según su peso                   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 07       | Reducción de decoración no estructural                                 | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 08       | Vaciado interior y disminución de los espesores de cubrición           | -       | D07-d   | D07-f   | D07-c   | D07-d   | D07-c   | D07-c   | D07-c   | D07-a   | D07-d   | D07-d   | D07-d   | D07-c   | D07-c   | D07-c   | D07-c   | D07-c   | D07-c   |
|                                                          |                               | 09       | Refuerzos y armados integrados en las propias cubiertas                | D08-a   | -       | D08-a   | D08-a   | -       | D08-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 10       | Arriostamiento interno mediante arcos, costillas y nervios             | D08-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          | 03 Atado y unión de elementos | 11       | Arriostamiento de las bóvedas y cúpulas y sus arranques                | -       | D11-f   | D11-f   | D11-f   | D11-f   | -       | D10-b   | D10-b   | -       | -       | -       | -       | D11-e   | D11-a   | D11-a   | -       | D11-a   | D11-a   |
|                                                          |                               | 12       | Traba y maclado de las fábricas                                        | -       | D12-a   | -       | D12-a   | -       | D12-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | D12-a   | D12-a   | D12-e   | -       | D12-e   | D12-e   |
|                                                          |                               | 13       | Conectores entre sillares y ladrillos                                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 14       | Disposición de capas dobles o triples de cubrición                     | D14-d   | -       | D14-d   | D14-d   | -       | D14-f   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 15       | Núcleo central rigidizador entre las distintas capas de cubrición      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 16       | Conectores de refuerzo y arriostamiento entre distintas capas          | D16-d   | -       | D16-f   | D16-d   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 17       | Incorporación de tirantes                                              | D17-b   | -       | D17-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 18       | Tratamiento singular de las juntas                                     | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          | 04 Elasticidad y ductilidad   | 19       | Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad               | D19-f   | D19-f   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 20       | Integración de elementos lineales de mayor ductilidad                  | D20-d   | -       | D20-e   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
|                                                          |                               | 21       | Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | D21-a   | -       | D21-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |

Elaboración propia

A modo de aplicación práctica de estos sistemas y su influencia y vigencia en las labores de restauración contemporáneas, se incluye en esta tesis un apartado en los anexos ("Anexo 5.5 Actualidad y vigencia de los sistemas y principios antisísmicos") dedicado a hacer una aproximación a la situación de la normativa sismorresistente de las regiones estudiadas, y la relación existente entre los sismos actuales y su vinculación con el concepto de conciencia sísmica.

En este anexo se mencionan a su vez dos ejemplos en los que se pone de manifiesto la influencia de las labores de restauración sobre el patrimonio histórico de fábrica ubicados en zonas de gran sismicidad, así como una caracterización de las causas y efectos de los daños más frecuentes y una serie de recomendaciones para intentar mitigar la vulnerabilidad sísmica del patrimonio más expuesto a estos fenómenos destructivos.



## PARTE IV

### 4. Resultados y conclusiones





## 4.1 Verificación de la hipótesis y análisis e interpretación de resultados

## 4. PARTE IV. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 4.1 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS Y ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La hipótesis expuesta en la "parte I" de esta tesis doctoral planteaba la existencia de diversos sistemas sismorresistentes en la arquitectura histórica de fábrica, así como de distintos puntos en común entre ellos que podían llegar a establecer una visión global del desempeño constructivo de estos edificios frente a la realidad destructiva que imponen los terremotos.

Gracias al análisis comparativo de los distintos elementos que conforman las construcciones históricas ubicadas en zonas de alta sismicidad, y la clasificación de las características de los diversos sistemas identificados en los casos seleccionados (Fig.4.1 y Fig.4.6), se logra visualizar de manera unitaria cada una de las soluciones implementadas en el patrimonio localizado en estas regiones.

| GRUPOS                                              | TIPOS                     | SUBTIPOS                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1 - Configuración general de la construcción</b> | 01 Urbano (entorno)       | 01 Compacidad urbana<br>02 Anexión externa de edificios adyacentes<br>03 Fragmentación en volumetrías independientes<br>04 Adaptación topográfica, urbana y climática<br>05 Agrupación y atado de edificios                                                                      |
|                                                     | 02 Volumétrico (exterior) | 06 Ortogonalidad exterior<br>07 Simetría exterior<br>08 Compacidad volumétrica<br>09 Reducción de altura del centro de gravedad<br>10 Reducción de elementos prominentes y ornamentales<br>11 Contrafuertes exteriores<br>12 Contrapesos superiores<br>13 Arcos de descarga      |
|                                                     | 03 Espacial (interior)    | 14 Simetría interior<br>15 Centralización de la planta<br>16 Modulación interior<br>17 Disposición de naves a misma altura<br>18 Integración de contrafuertes interiores dentro de la volumetría principal<br>19 Apertura e integración de huecos, nichos y hornacinas laterales |
|                                                     | 04 Constructivo (general) | 20 Continuidad material en los distintos planos<br>21 Inclinação de elementos constructivos<br>22 Reducción del número y la dimensión de huecos<br>23 Supresión de elementos no portantes y simplificación ornamental                                                            |

Fig. 4.1 Cuadro resumen de los sistemas sismorresistentes ligados a la configuración general de la construcción (Autor)

**En lo que respecta a los diferentes sistemas sismorresistentes:**

- En la presente tesis doctoral se recoge, por primera vez, un **análisis comparativo entre las similitudes y diferencias principales de los sistemas sismorresistentes introducidos en algunas de las construcciones históricas más relevantes de las regiones de Irán, Perú y Bengala** (Fig.4.2-Fig.4.5). En las tres zonas estudiadas, con exposición sísmica en gran parte de su territorio, se aprecian desarrollos singulares respecto a otras áreas de menor sismicidad donde se expandieron las culturas que habitaron en ellas. Sucede en el caso de Irán respecto a otras arquitecturas islámicas sin exposición al sismo, próximas a esta región, pero también en los desarrollos implementados en época hispánica en el Perú post-colombino, o en la región de Bengala en contraste con la arquitectura desarrollada en zonas de menor riesgo sísmico de la India, entre otros ejemplos.
- Las construcciones sismorresistentes, ya sean catedrales, mezquitas o grandes palacios, suelen presentar **formas geométricas compactas y cubiertas planas** sobre las que emergen el conjunto de sus bóvedas y cúpulas. La presencia de **formas y retículas ortogonales** queda patente en diversos sistemas sismorresistentes, tal y como sucede en distintos **sistemas de atado** como las enjutas situadas sobre los arcos para arriostrar bóvedas, cúpulas o naves completas; o en **otros sistemas de atado interno** identificados en esta tesis doctoral.
- La incorporación de los sistemas sismorresistentes en la arquitectura histórica de fábrica queda **patente en prácticamente la totalidad de elementos que conforman la concepción estructural del edificio**, desde su integración urbana y otros aspectos ligados a la configuración general de la construcción, hasta su estructura muraria, cimentaciones, columnas, cubiertas y otros elementos portantes que constituyen el esqueleto estructural de estas edificaciones.
- **La combinación de sistemas suele ser frecuente** en aquellas construcciones donde se aprecia una conciencia sísmica alineada con los principios sismorresistentes que se han abordado en esta tesis, combinando por ejemplo medidas de rigidización en el esqueleto estructural principal a la vez que se buscaba una mayor deformabilidad y ductilidad en otros. Este tipo de situaciones se puede llegar a manifestar **incluso en un mismo edificio o incluso en una misma sección del mismo**, tal y como sucede por ejemplo en los elementos de cubrición que cuentan con un marco rígido en forma de enjutas, nervaduras o tirantes, y además cuentan con soluciones aligeradas o deformables en forma de rellenos, juntas de mortero de mayor ductilidad o vaciados internos.
- **Los sistemas, materiales y estrategias sismorresistentes pueden ir asociados a uno o varios principios sismorresistentes al mismo tiempo**, ya sea el de simetría, antigravedad, armonía, elasticidad, solidez, aislamiento sísmico o el principio de contornos cerrados. A partir de esta asociación es frecuente asociar una misma subestructura a una función de aligeramiento, de elasticidad y de arriostramiento; o distintos tipos de materiales destinados a mejorar la conexión, solidez y el aislamiento sísmico de determinadas secciones de estas construcciones tan expuestas a terremotos.

**En lo que respecta a los puntos en común del patrimonio expuesto al sismo:**

- En cuanto a la configuración general de la construcción se pueden determinar una serie de **características comunes en las distintas estrategias sismorresistentes implementadas** en los edificios de fábrica erigidos en zonas de gran sismicidad, desde aquellas de tipo urbano a otras de tipo volumétrico, espacial o constructivo que tienen que ver con la manifestación de dichos sistemas hacia el exterior, o su vinculación con la articulación de los espacios interiores.
- En los elementos estructurales principales, como muros, cimentaciones, soportes o cubiertas, es posible identificar una serie de **puntos en común en distintas facetas ligadas a la función sismorresistente de cada uno de ellos, y que pueden asociarse a su vez a los principios antisísmicos** ya mencionados. Tal y como se ha desarrollado en la presente investigación, estas similitudes quedan patentes a través de distintos ejemplos y estrategias comunes en las estructuras murarias y en las cubiertas de muchos edificios, en aspectos tan diversos como su aislamiento sísmico, aligeramiento, atado de elementos o elasticidad parcial o global de determinadas secciones de estas construcciones.
- Desde el punto de vista de la morfología y configuración constructiva de los diferentes sistemas, se pueden establecer una serie de **analogías a distintos niveles: desde aspectos formales y geométricos**, ligados por ejemplo a la disposición en planta; **hasta aquellos de tipo urbano y relacional**, vinculados a sus conexiones y diálogo con el entorno; y **pasando también por cuestiones materiales, constructivas, funcionales y estructurales, con multitud de nexos relacionados entre sí**.
- De entre todas las similitudes y puntos en común identificados en el patrimonio con alta exposición al sismo, es frecuente identificar una serie de **situaciones comunes que reflejan el profundo conocimiento sísmico y constructivo de los arquitectos de la antigüedad** a la hora de plantear sus edificaciones y sistemas sismorresistentes. Estas situaciones, no exentas de matices y desarrollos singulares según la zona, se podrían resumir en una serie de puntos principales que suelen manifestarse en todos aquellos sistemas manifiestamente efectivos, como son la **compatibilidad material** de las distintas soluciones utilizadas, el **tratamiento específico de las conexiones estructurales**, la disposición generalizada de los **elementos de mayor rigidez en las estructuras verticales** y la incorporación de sistemas con unas propiedades de **mayor elasticidad y flexibilidad en los elementos de cubrición**.

De esta forma, **ha sido posible verificar la hipótesis planteada**, poniendo de manifiesto la profunda conciencia sísmica desarrollada por las culturas antiguas vinculadas a los tres casos de estudio, y asimilada durante siglos en muchos de los edificios ubicados en estas zonas de gran riesgo sísmico.

Su comportamiento sismorresistente responde a una evolución constante de las diversas técnicas empleadas desde la antigüedad, las cuales se han ido transmitiendo e incorporando de manera natural a un patrimonio histórico de fábrica que ha conseguido mantenerse en pie hasta nuestros días a pesar de las múltiples amenazas que han puesto a prueba esta ansiada estabilidad.

A pesar de la singularidad de cada uno de los sistemas implementados en cada región, el conocimiento sísmico desarrollado por cada cultura y su transmisión de generación en generación en un contexto de escaso entendimiento de estos fenómenos responde principalmente a la recurrencia de estos episodios sísmicos en las zonas de mayor actividad tectónica, allí donde la constante presencia de estos sucesos destructivos ponía a prueba de manera periódica la estabilidad física planteada en estas estructuras de fábrica.

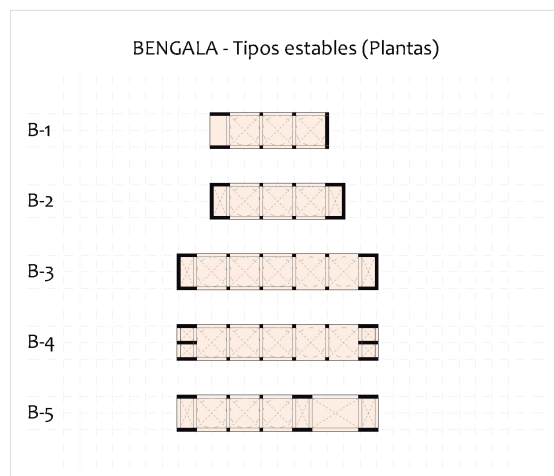


Fig. 4.2 Tipos estables Bengala (Autor)

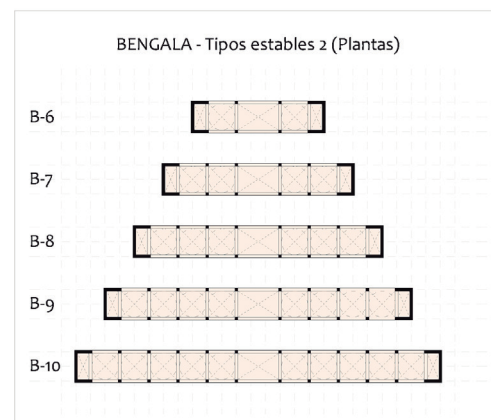


Fig. 4.3 Tipos estables Bengala (Autor)

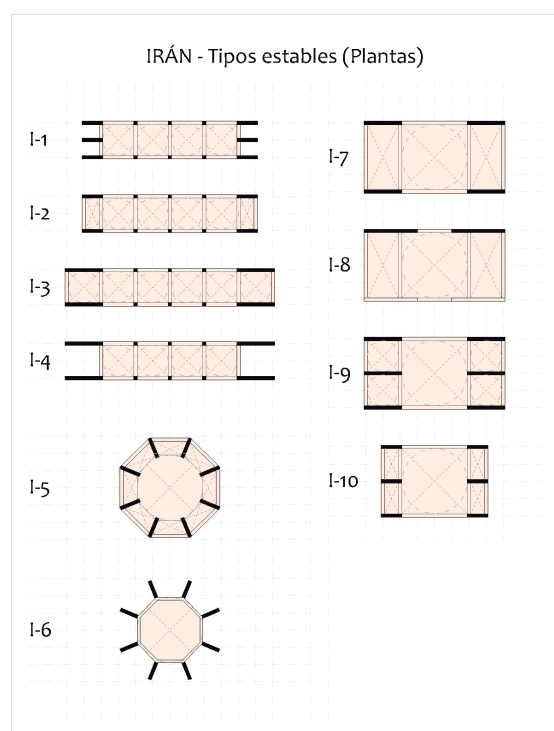


Fig. 4.4 Tipos estables Irán (Autor)

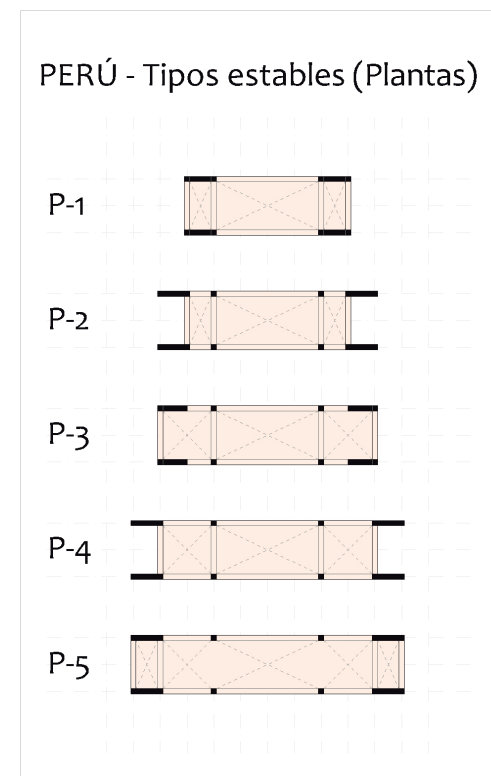


Fig. 4.5 Tipos estables Perú (Autor)

**En lo que respecta al cumplimiento de los objetivos:**

A raíz de la formulación de la hipótesis principal se establecieron una serie de objetivos relacionados con la existencia de los diversos sistemas sismorresistentes identificados.

- En primer lugar, y respondiendo al objetivo principal de esta tesis, se ha logrado profundizar en el conocimiento relativo al comportamiento sismorresistente de muchas de las construcciones históricas de fábrica erigidas en zonas de gran actividad tectónica. Para ello, **se ha llevado a cabo una identificación de los distintos tipos de estrategias implementadas en cada caso de estudio**, gracias al análisis de los desarrollos establecidos en estas zonas de gran exposición al sismo, donde determinados elementos **evolucionaron de una manera singular con el fin de dar respuesta a las peculiaridades geológicas de estas regiones**. Todo ello desde un **cumplimiento estricto hacia los distintos principios sismorresistentes que permiten alcanzar situaciones de equilibrio estable**, incluso ante situaciones de terremoto.
- En relación a los objetivos particulares planteados en esta tesis doctoral, se ha llevado a cabo una **taxonomía tipológica de los diferentes sistemas sismorresistentes que** se han ido identificando a lo largo de los capítulos, estableciendo un criterio general que ha permitido llevar a cabo una clasificación a través de distintas categorías. Este sistema taxonómico **permite a su vez ampliar cada bloque a través de futuras investigaciones que puedan llevarse a cabo en un futuro** (Fig.4.6), incorporando otros sistemas sismorresistentes que puedan identificarse en las construcciones históricas de otras regiones sísmicas.
- Esta clasificación ha servido como punto de partida para alcanzar otro de los objetivos particulares propuestos en esta investigación, ayudando a identificar una serie de **elementos comunes en los distintos sistemas sismorresistentes, así como las posibles variaciones más importantes entre ellos**. El análisis de estos elementos comunes se ha llevado a cabo a través de diversas facetas de los sistemas incluidos en esta tesis doctoral, incluyendo **aspectos formales y geométricos; urbanos y relacionales; materiales y constructivos; y funcionales y estructurales**.
- Por último, y gracias al cumplimiento de los objetivos anteriores y al desarrollo de una taxonomía específica que permita identificar los distintos sistemas sismorresistentes asimilados por la arquitectura histórica de fábrica, se ha conseguido lograr también el último de los objetivos particulares, contribuyendo al conocimiento relativo a la **conservación preventiva y al correcto mantenimiento de los bienes culturales localizados en las zonas de mayor riesgo sísmico**. Tomando como ejemplo diversas situaciones llevadas a cabo en la zona de Bam (Irán), se han analizado distintas intervenciones perjudiciales sobre el patrimonio, estableciendo, gracias a la clasificación del apartado anterior, una **caracterización de las causas y efectos de los daños más habituales en el patrimonio de fábrica, así como una serie de recomendaciones dirigidas a mitigar la vulnerabilidad sísmica de estas construcciones**.

| GRUPOS                                                   |                                                                          |                                                                                | TIPOS | SUBTIPOS | IRÁN    |         |         |         |         |         | PERÚ    |         |         |         |         |         | BENGALA |         |         |         |         |         |       |       |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
|                                                          |                                                                          |                                                                                |       |          | Caso 01 | Caso 02 | Caso 03 | Caso 04 | Caso 05 | Caso 06 | Caso 07 | Caso 08 | Caso 09 | Caso 10 | Caso 11 | Caso 12 | Caso 13 | Caso 14 | Caso 15 | Caso 16 | Caso 17 | Caso 18 |       |       |
| A - Configuración general de la construcción             | 01 Urbano (entorno)                                                      | 01 Compacidad urbana                                                           | A01-d | A01-a    | A01-b   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-b   | A01-d   | A01-c   | A01-d   | A01-c   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d   | A01-d |       |
|                                                          |                                                                          | 02 Anesión externa de edificios adyacentes                                     | A02-a | A02-a    | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A02-a   | -       | A02-a   | -       | A02-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 03 Fragmentación en volúmenes independientes                                   | -     | A03-a    | A03-b   | A03-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 04 Adaptación topográfica, urbana y climática                                  | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A04-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 05 Agrupación y atado de edificios                                             | -     | A05-a    | A05-a   | A05-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A05-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          | 02 Volumétrico (exterior)                                                | 06 Ortogonalidad exterior                                                      | -     | A06-b    | A06-b   | A06-c   | -       | -       | -       | -       | -       | A06-d   | A06-d   | -       | A06-d   | -       | A06-d   | -       | -       | -       | A06-c   | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 07 Simetría exterior                                                           | A07-b | A07-d    | A07-a   | A07-a   | A07-a   | -       | -       | -       | -       | A07-a   | A07-a   | A07-a   | A07-a   | -       | -       | -       | A07-a   | A07-a   | A07-a   | A07-a   | A07-a | A07-a |
|                                                          |                                                                          | 08 Compacidad volumétrica                                                      | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 09 Reducción de altura del centro de gravedad                                  | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 10 Reducción de elementos prominentes y ornamentales                           | -     | A10-d    | -       | A10-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | A10-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          | 03 Espacial (interior)                                                   | 11 Contrafuertes exteriores                                                    | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 12 Contrapesos superiores                                                      | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 13 Arcos de descarga                                                           | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 14 Simetría interior                                                           | A14-a | A14-c    | A14-a   | A14-a   | A14-b   | A14-a   | -       | -       | -       | A14-d   | A14-d   | -       | A14-d   | A14-d   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 15 Centralización de la planta                                                 | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          | 04 Constructivo (general)                                                | 16 Modulación interior                                                         | -     | A16-d    | -       | A16-c   | A16-a   | -       | -       | -       | -       | A16-c   | A16-c   | -       | A16-c   | A16-c   | A16-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 17 Disposición de naves a misma altura                                         | -     | A17-b    | A17-b   | A17-a   | -       | -       | -       | -       | -       | A17-a   | A17-a   | A17-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 18 Integración de contrafuertes interiores dentro de la volumetría principal   | A18-a | A18-a    | A18-c   | A18-c   | A18-b   | A18-c   | -       | -       | -       | A18-a   | A18-a   | A18-c   | A18-a   | A18-a   | A18-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 19 Apertura e integración de huecos, nichos y hornacinas laterales             | A19-b | -        | A19-b   | A19-b   | A19-b   | A19-b   | -       | -       | -       | A19-a   | A19-a   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          |                                                                          | 20 Continuidad material en los distintos planos                                | A20-a | A20-a    | A20-a   | A20-a   | A20-a   | A20-a   | -       | -       | -       | -       | A20-b   | -       | A20-b   | -       | A20-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -     | -     |
|                                                          | 21 Inclinación de elementos constructivos                                | -                                                                              | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 22 Reducción del número y la dimensión de huecos                         | -                                                                              | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 23 Supresión de elementos no portantes y simplificación ornamental       | A23-c                                                                          | A23-d | A23-b    | A23-b   | A23-c   | A23-b   | -       | -       | -       | A23-b   | A23-b   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
| GRUPOS                                                   |                                                                          |                                                                                | TIPOS | SUBTIPOS | Caso 01 | Caso 02 | Caso 03 | Caso 04 | Caso 05 | Caso 06 | Caso 07 | Caso 08 | Caso 09 | Caso 10 | Caso 11 | Caso 12 | Caso 13 | Caso 14 | Caso 15 | Caso 16 | Caso 17 | Caso 18 |       |       |
| B - Estructura muraria                                   | 01 Aislamiento sísmico                                                   | 01 Disposición de distintas capas de cimentación bajo los muros                | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 02 Sistemas de rodamiento y deslizamiento                                      | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 03 Arranque de muros mediante zócalos de mayor resistencia                     | B03-a | -        | B03-a   | B03-a   | -       | B03-a   | B03-a   | B03-a   | -       | B03-a   | B03-a   | -       | B03-a   | B03-a   | -       | -       | B03-a   | -       | B03-a   | -       | B03-a |       |
|                                                          |                                                                          | 04 Plataformas y basamentos inclinados o en forma de talud                     | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 05 Utilización de hiladas y piezas de gran tamaño y resistencia                | -     | -        | B05-a   | B05-a   | -       | B05-a   | B05-a   | B05-a   | -       | B05-a   | B05-a   | -       | B05-a   | B05-a   | -       | -       | B05-a   | -       | B05-a   | -       | -     |       |
|                                                          | 02 Aligeramiento                                                         | 06 Supresión de paños y otros elementos no portantes                           | B06-a | B06-a    | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | -       | B06-a   | B06-a   | -       | B06-a   | B06-a   | B06-a   | -       | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a   | B06-a |       |
|                                                          |                                                                          | 07 Rellenos aligerantes dentro del entramado murario                           | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 08 Reemplazo del mortero por conectores puntuales de mayor ligereza            | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 09 Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera      | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 10 Distribución gradual de los materiales según su peso                        | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          | 03 Atado y unión de elementos                                            | 11 Reducción de decoración no estructural                                      | B11-d | B11-f    | B11-c   | B11-c   | B11-d   | B11-c   | -       | -       | -       | B11-c   | B11-c   | -       | B11-d   | B11-d   | B11-d   | -       | B11-a   | B11-a   | B11-a   | B11-a   | B11-a |       |
|                                                          |                                                                          | 12 Entramados de enjutas                                                       | -     | B12-e    | B12-e   | B12-e   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 13 Refuerzos y armados integrados dentro del entramado murario                 | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 14 Refuerzos de esquinas y huecos a través de sus propias fábricas             | -     | B14-g    | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | B14-d   | B14-d   | B14-d   | -       | -       | -       | B14-d   | B14-d   | B14-d   | B14-d   | B14-d |       |
|                                                          |                                                                          | 15 Refuerzos exteriores, contrafuertes y arcos de descarga                     | -     | -        | B15-e   | B15-e   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | B15-c   | B15-c   | -       | -       | -       | -       | B15-a   | B15-a   | B15-a   | B15-a   | B15-a |       |
|                                                          | 04 Elasticidad y ductilidad                                              | 16 Conectores entre sillares y ladrillos                                       | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 17 Incorporación de tirantes y codales                                         | B17-c | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 18 Traba y maclado de las fábricas                                             | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 19 Arriostramiento de los muros y sus arranques y cimentaciones                | B19-c | -        | -       | B19-c   | B19-c   | -       | -       | -       | -       | B19-c   | B19-c   | B19-c   | B19-c   | B19-c   | B19-c   | -       | -       | -       | B19-c   | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 20 Tratamiento singular de las juntas                                          | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          | 21 Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad              | B21-h                                                                          | B21-g | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 22 Integración de elementos lineales de mayor ductilidad                 | B22-f                                                                          | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 23 Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar | -                                                                              | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
| GRUPOS                                                   |                                                                          |                                                                                | TIPOS | SUBTIPOS | Caso 01 | Caso 02 | Caso 03 | Caso 04 | Caso 05 | Caso 06 | Caso 07 | Caso 08 | Caso 09 | Caso 10 | Caso 11 | Caso 12 | Caso 13 | Caso 14 | Caso 15 | Caso 16 | Caso 17 | Caso 18 |       |       |
| C - Columnas y otros elementos verticales                | 01 Aislamiento sísmico                                                   | 01 Disposición de distintas capas de cimentación bajo los elementos verticales | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 02 Sistemas de rodamiento y deslizamiento                                      | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 03 Arranque de elementos verticales mediante materiales de mayor resistencia   | C03-a | -        | C03-a   | C03-a   | -       | -       | -       | -       | -       | C03-a   | C03-c   | -       | C03-a   | C03-a   | -       | -       | C03-a   | C03-a   | C03-a   | C03-c   | C03-a |       |
|                                                          |                                                                          | 04 Basamentos inclinados y grandes plataformas de arranque                     | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 05 Utilización de piezas de gran tamaño y resistencia                          | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 02 Aligeramiento                                                         | 06 Reducción de esbeltez y altura del centro de gravedad                       | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 07 Rellenos aligerantes dentro del núcleo de los elementos verticales          | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 08 Reemplazo del mortero por conectores puntuales de mayor ligereza            | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 09 Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera      | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 10 Distribución gradual de los materiales según su peso                        | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 03 Atado y unión de elementos                                            | 11 Reducción de decoración no estructural                                      | C11-a | C11-a    | C11-d   | C11-d   | C11-d   | -       | -       | -       | -       | C11-a   | C11-a   | -       | C11-a   | C11-a   | C11-a   | -       | C11-f   | C11-f   | C11-f   | C11-f   | C11-f |       |
|                                                          |                                                                          | 12 Refuerzos integrados en columnas y otros elementos verticales               | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 13 Refuerzos de esquinas y huecos a través de sus propias fábricas             | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 14 Refuerzos exteriores, contrafuertes y arcos de descarga                     | C14-c | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 15 Conectores entre sillares y ladrillos                                       | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 04 Elasticidad y ductilidad                                              | 16 Incorporación de tirantes                                                   | C16-d | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 17 Traba y maclado de las fábricas                                             | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 18 Arriostramiento de los elementos verticales y sus arranques y cimentaciones | C18-c | -        | -       | C18-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 19 Núcleo central rigidizador dentro de los elementos verticales               | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 20 Tratamiento singular de las juntas                                          | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 21 Incorporación de elementos puntuales de mayor ductilidad              | C21-h                                                                          | C21-g | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |       |       |
|                                                          | 22 Integración de elementos lineales de mayor ductilidad                 | C22-c                                                                          | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |       |       |
|                                                          | 23 Composición material de mayor ductilidad del propio ladrillo o sillar | -                                                                              | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |         |       |       |
| GRUPOS                                                   |                                                                          |                                                                                | TIPOS | SUBTIPOS | Caso 01 | Caso 02 | Caso 03 | Caso 04 | Caso 05 | Caso 06 | Caso 07 | Caso 08 | Caso 09 | Caso 10 | Caso 11 | Caso 12 | Caso 13 | Caso 14 | Caso 15 | Caso 16 | Caso 17 | Caso 18 |       |       |
| D - Cubiertas (bóvedas, cúpulas y otros elem. cubrición) | 01 Aislamiento sísmico                                                   | 01 Sistemas de deslizamiento en su encuentro con la estructura muraria         | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 02 Arranque de cubiertas mediante materiales de mayor resistencia              | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 03 Reducción de esbeltez y altura del centro de gravedad                       | -     | D03-a    | D03-c   | D03-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 04 Rellenos aligerantes dentro de las cubiertas                                | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 05 Utilización de sillares o ladrillos de composición material más ligera      | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          | 02 Aligeramiento                                                         | 06 Distribución gradual de los materiales según su peso                        | -     | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 07 Reducción de decoración no estructural                                      | D07-d | D07-f    | D07-c   | D07-c   | D07-d   | D07-c   | -       | -       | -       | D07-c   | D07-c   | D07-a   | D07-d   | D07-d   | D07-d   | -       | D07-c   | D07-c   | D07-c   | D07-c   | D07-c |       |
|                                                          |                                                                          | 08 Vaciado interior y disminución de los espesores de cubrición                | D08-a | -        | D08-a   | D08-a   | -       | D08-c   | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -     |       |
|                                                          |                                                                          | 09 Refuerzos y armados integrados en las propias cubiertas                     | D09-a | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |       |       |
|                                                          |                                                                          | 10 Arriostramiento interno mediante arcos, costillas y nervios                 | -     | -        | -       | -       | -       | -       |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |       |       |



**En lo que respecta a la metodología:**

- El estudio documental y el análisis del estado de la cuestión ha permitido diferenciar las distintas **singularidades de las realidades históricas, culturales, materiales, geológicas y constructivas de los distintos tipos de edificaciones** incluidos en esta tesis doctoral. Este estudio previo sumado a la selección y análisis in situ de muchos de los casos analizados ha posibilitado la observación e incorporación de diversos sistemas con una función sismorresistente, **catalogando y clasificando cada uno de ellos a través de una serie de fichas y análisis gráficos** que albergan una profunda conciencia sísmica.
- En lo que respecta al método comparativo puesto en práctica en el estudio de los distintos casos, éste se revela como uno de los mecanismos de análisis más relevantes dentro de la metodología propuesta, permitiendo la **identificación de elementos singulares dentro de determinadas zonas y/o culturas expuestas al sismo**, y que en muchos casos responden a una amenaza de gran poder destructivo como son los terremotos; fenómenos delimitados a una ámbito geográfico local o regional **que provocaron un desarrollo específico en estas construcciones respecto a los estándares generales establecidos en otras áreas sin exposición al sismo**.
- **La clasificación de las distintas estrategias sismorresistentes ha permitido identificar diversos aspectos vinculados a la propia configuración espacial de los espacios y elementos que conforman estas construcciones**, gracias a un análisis paramétrico de las distintas manifestaciones de éstas en relación con los principios antisísmicos señalados (Fig.4.6).
- **La verificación de la hipótesis principal y la consecución de los objetivos** general y particulares relacionados con la existencia de diversos sistemas sismorresistentes ratifican y **validan la utilidad y eficacia de la metodología planteada** a la hora de analizar las estrategias y principios sismorresistentes presentes en la arquitectura histórica de fábrica.

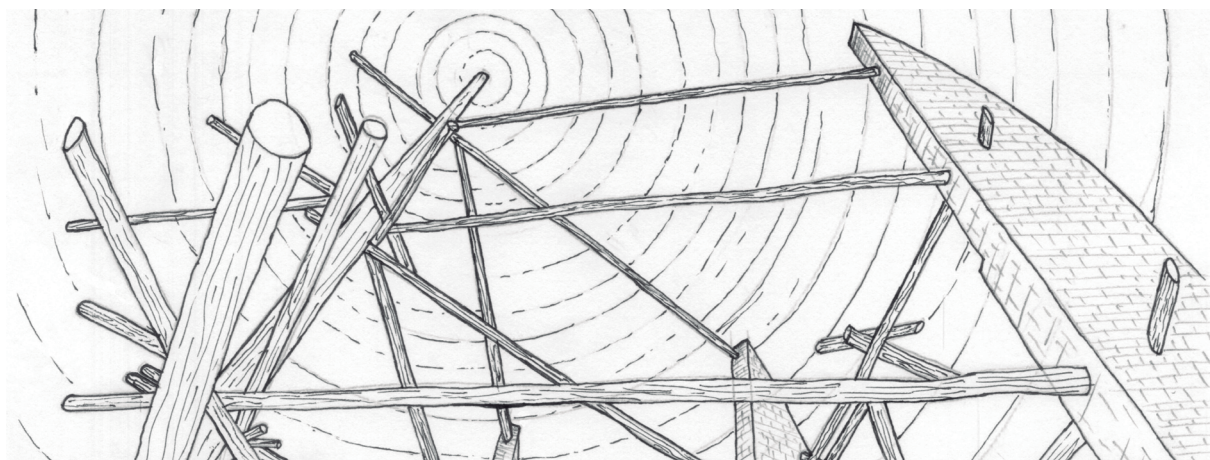


Fig. 4.7 Cúpula Chahar Bagh, Isfahan (Autor)

**En lo que respecta a la conservación preventiva en zonas de alta sismicidad:**

- Dado el papel crucial que pueden ejercer las distintas intervenciones de conservación y restauración sobre las construcciones históricas situadas en zonas de gran actividad tectónica, **es urgente establecer programas de concienciación y conservación permanentes en todas aquellas regiones con patrimonio histórico que pueda verse afectado por fenómenos tan destructivos como los que imponen los terremotos, agravado en ocasiones por situaciones de falta de mantenimiento** y una perniciosa amnesia sísmica desde el punto de vista constructivo.
- El deterioro de los sistemas sismorresistentes implementados en la arquitectura histórica de fábrica puede agravar los efectos destructivos de cualquier terremoto. Para evitar daños adicionales sobre las estructuras de fábrica, **es necesario llevar a cabo un correcto mantenimiento de los materiales que constituyen los esqueletos estructurales principales**, evitando por ejemplo los daños ocasionados por terremotos previos, la acción de xilófagos u otros factores que comprometan la configuración material de los materiales constructivos y los sistemas que conforman estas construcciones históricas.
- Para todas aquellas intervenciones sobre edificaciones erigidas en zonas de gran vulnerabilidad sísmica, **el estudio de las construcciones de fábrica debería incluir la identificación y conservación de las estrategias sismorresistentes incluidas en su estructura, recurriendo a este tipo de técnicas y soluciones tradicionales siempre que sea posible** e implementando las recomendaciones recogidas en el apartado anterior con el fin de mitigar la vulnerabilidad sísmica.
- **Algunas de las intervenciones contemporáneas planteadas sobre el patrimonio histórico de fábrica pueden llegar a ocasionar graves perjuicios a las estructuras originales**, incrementando por ejemplo la rigidez o ductilidad hasta grados muy perjudiciales para determinados elementos y comprometiendo negativamente la respuesta parcial o total del conjunto de la estructura en situaciones de sismo. Para evitarlo, **sería recomendable incluir siempre el enfoque sísmico sobre aquellas intervenciones llevadas a cabo en zonas de gran peligrosidad, así como programar inspecciones sistemáticas** sobre ellas una vez realizadas.
- El análisis de este tipo de sistemas constructivos adquiere una relevancia fundamental a la hora de entender el comportamiento sismorresistente del patrimonio de fábrica situado en zona sísmica, por lo que **resulta urgente profundizar en el estudio de este tipo de estrategias implementadas por los constructores de la antigüedad** (Fig.4.7), conservando así un legado y una respuesta estructural que se ha manifestado realmente efectiva ante este fenómeno destructivo a lo largo de los siglos.



## 4.2 Valoración crítica y conclusiones finales

## 4.2 VALORACIÓN CRÍTICA Y CONCLUSIONES FINALES

Las conclusiones planteadas a través de esta investigación están directamente relacionadas con la demostración de la hipótesis general de trabajo introducida en la PARTE I de esta tesis doctoral, vinculada a su vez al objetivo principal de esta investigación y una serie de objetivos particulares vinculados con la presencia de distintos sistemas sismorresistentes en la arquitectura histórica de fábrica.

Tras un estudio focalizado en las tres zonas geográficas propuestas, se han analizado distintos ejemplos de arquitectura sismorresistente erigidos entre los siglos XII y XVII en las regiones de Irán, Perú y Bengala, así como una serie de antecedentes que han permitido una contextualización cultural e histórica de los tres casos seleccionados (Fig.4.8-Fig.4.12).

Si bien el análisis estructural ha sido abordado por distintos estudios que tratan facetas muy específicas de determinadas construcciones, materiales y soluciones, existe una importante carencia en lo que respecta al análisis transversal que aborde el aspecto sísmico desde un punto de vista histórico, constructivo y cultural del patrimonio ubicado en zonas de gran sismicidad a base de fábricas de piedra, ladrillo o adobe.

Ante esta circunstancia, la investigación que ha dado pie a esta tesis doctoral ha llevado a cabo un enfoque poliédrico y global a través de las tres regiones propuestas, y cuya vinculación entre ellas se ha estructurado a partir de la amenaza común a la que se enfrentan y las soluciones desarrolladas en cada caso para dar respuesta y cumplimiento a los distintos principios sismorresistentes identificados (Fig.4.8-Fig.4.12).

Desde esta óptica histórica, cultural, material, geológica y, principalmente, constructiva, se ha llevado a cabo un análisis de los distintos aspectos sismorresistentes de las soluciones que han permitido mantener la condición estable de estas construcciones tan expuestas a un fenómeno recurrente y destructivo como es sismo.

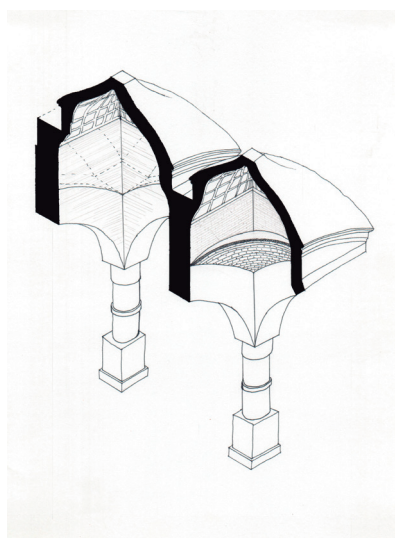


Fig. 4.8 Entramado de muros enjutados en Bengala (Autor)

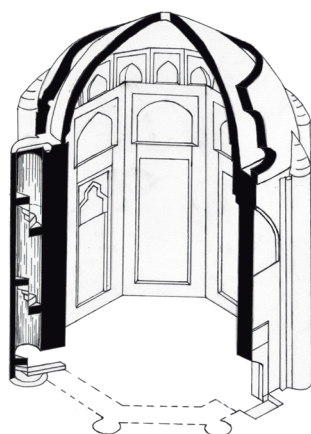


Fig. 4.9 Kharraqan (Autor)

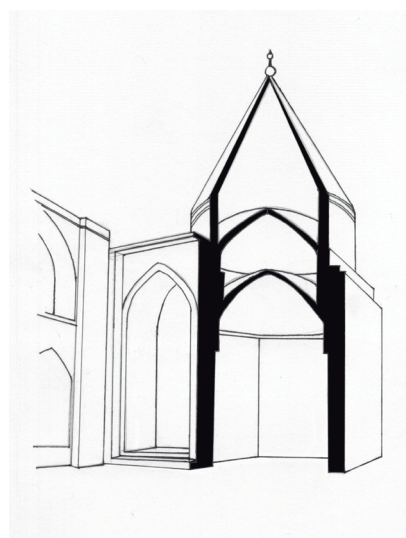


Fig. 4.10 Sección cúpulas Bayazid Bastami, Natanz (Autor)

**CONCLUSIONES FINALES**

A modo de síntesis, y como continuación de lo expuesto en el capítulo 5.1, donde se desarrollan algunos de las valoraciones y resultados más importantes ligados a la verificación de la hipótesis, se recogen a continuación algunas de las conclusiones cuantitativas más importantes que se desprenden de esta investigación:

- La presente tesis doctoral plantea un **análisis comparativo entre los sistemas sismorresistentes de tres regiones con gran actividad sísmica: Irán, Perú y Bengala**. Para lograrlo se ha establecido una taxonomía general que permita englobar a los distintos sistemas sismorresistentes identificados, así como la ampliación a otros posibles sistemas que puedan encontrarse en el futuro (Fig.4.6).
- La clasificación que se propone permite esta **catalogación a partir de distintos niveles**. En primer lugar, **se establecen 4 grupos**: a) configuración general de la construcción, b) estructura muraria, c) columnas y otros elementos verticales, y d) cubiertas. Cada uno de estos grupos permite la clasificación de los diversos sistemas a partir de **cuatro tipos** para cada uno de los 4 grupos (Fig.4.1), que responden a distintas situaciones y características sismorresistentes: aislamiento sísmico, ligereza, atado y unión de elementos, elasticidad y ductilidad, etc.
- Dentro de cada uno de los 4 tipos establecidos, se han identificado una serie de **subtipos, relacionados con los niveles anteriores, identificándose 23 subtipos para cada uno de los cuatro grupos mencionados**, a excepción del último grupo (cubiertas), en el que se han diferenciado 21 subtipos distintos. Esto permite englobar los diferentes sistemas dentro de **90 subtipos totales**, de los cuales se han elaborado las correspondientes fichas resumen, recogidas en los anexos de esta tesis (Fig.4.6).
- Por último, y dentro de los 90 subtipos identificados, se ha establecido una catalogación interna de cada uno de estos subtipos que permiten una **taxonomía flexible y abierta**, de tal manera que puedan añadirse nuevos sistemas y soluciones a cada uno de estos subtipos, incorporando los detalles y características de estas variantes dentro de un **código alfabético que puede presentar mayor o menor rango de variables en función del sistema o situación sismorresistente** (Fig.4.6).

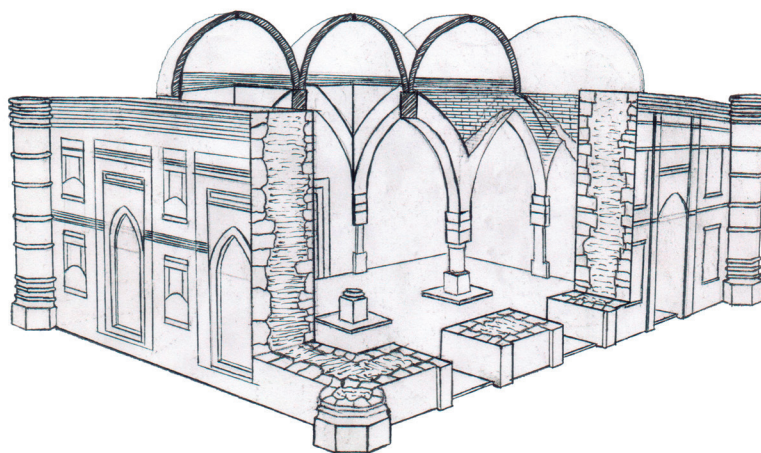


Fig. 4.11 Mezquita de Kusumba (Autor)



- A partir de los 4 grupos establecidos, los 4 tipos para cada uno de ellos, y los 90 subtipos totales, **se han podido diferenciar más de 510 estrategias, sistemas o soluciones distintas que contribuyen de diversas maneras al comportamiento sismorresistente de las edificaciones históricas más importantes** construidas con fábricas de piedra, ladrillo o adobe. Esta catalogación constituye una gran oportunidad de cara a seguir ampliando la identificación de estos sistemas a través de distintas regiones, culturas y arquitecturas históricas (Fig.4.6).
- En algunos casos, **las estrategias, sistemas o soluciones sismorresistentes identificados se relacionan con varios de los 7 principios sismorresistentes recogidos en esta tesis:** simetría, antigravedad, armonía, elasticidad, solidez, aislamiento sísmico o contornos cerrados.
- Una vez analizados los sistemas sismorresistentes recogidos en esta tesis, **se han encontrado una serie de analogías y diferencias que se pueden englobar en 4 grandes grupos**, que van relacionados con las siguientes cuestiones: 1) Aspectos formales y geométricos; 2) Aspectos urbanos y relacionales; 3) Aspectos materiales y constructivos; y 4) Aspectos funcionales y estructurales.
- Por último, se han depurado algunas de las causas y efectos de los daños más habituales en las construcciones históricas de fábrica afectadas por la acción sísmica, con hasta **13 grandes grupos de causas (relacionadas con el contexto geográfico y tectónico, el contexto poblacional, intervenciones previas, y la ausencia de mantenimiento); y 5 niveles de daños en función de la intensidad**. A raíz de esto, se han establecido a su vez diversas recomendaciones de cara a mitigar la vulnerabilidad sísmica de los edificios más expuestos, con hasta **14 recomendaciones generales y una serie de recomendaciones adicionales ligadas a la conservación y el mantenimiento de este patrimonio**, en función del nivel de intensidad de los terremotos.
- Como consecuencia de todo lo mencionado en este y el anterior capítulo (4.2 y 4.1), se puede concluir que **se ha logrado verificar la hipótesis de trabajo planteada y alcanzar los 4 objetivos (principal y particulares) establecidos en esta investigación**, consiguiendo así contribuir al conocimiento relativo a la conservación preventiva del patrimonio arquitectónico ubicado en zonas de alta vulnerabilidad sísmica.

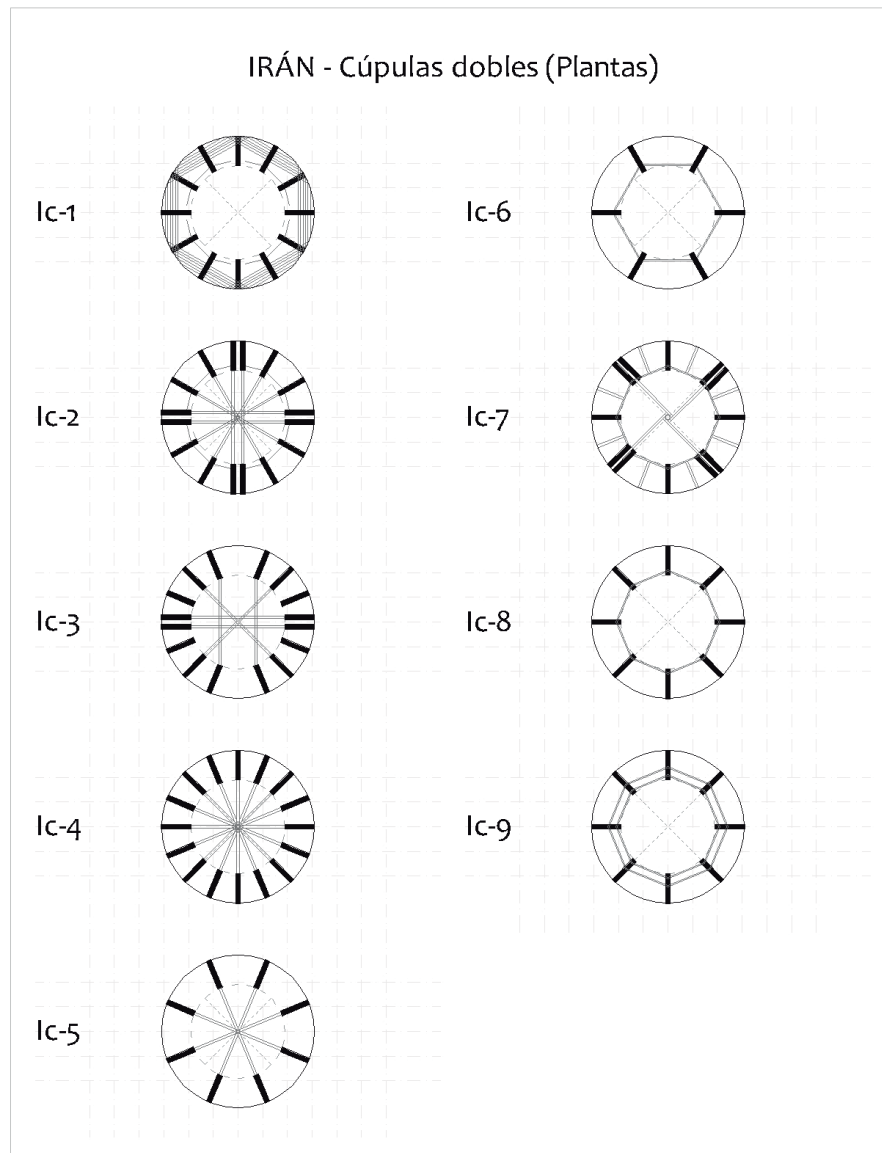


Fig. 4.12 Tipos estables Irán (Autor)





## 4.3 Difusión de resultados

### 4.3 DIFUSIÓN DE RESULTADOS

Los avances parciales durante el transcurso de la investigación se han difundido y debatido oralmente en diferentes congresos nacionales e internacionales, y también de manera escrita a través de distintos artículos publicados en las correspondientes actas y en una de las revistas científicas seleccionadas para exponer los resultados y primeras conclusiones previas de la investigación desarrollada en esta tesis doctoral.

La primera de estas comunicaciones tuvo lugar en San Sebastián en octubre de 2017, en el "II Congreso Internacional y X Nacional de Historia de la Construcción", con una ponencia titulada "Sistemas antisismo en la arquitectura histórica de fábrica" (Ramírez 2017)<sup>1</sup>.

En este artículo se presentó una primera aproximación a la faceta sismorresistente de las construcciones históricas ubicadas en zona de gran peligrosidad sísmica, introduciendo los ejes vertebradores de esta investigación a través de un análisis de algunos de los antecedentes que se identificaron en la fase de estudio documental y análisis bibliográfico previo, así como unos primeros avances de la investigación realizada hasta el momento.

Más adelante, se realizó una segunda comunicación en el "Primer Coloquio Colombiano de Historia de la Construcción", celebrado en Bogotá (Colombia) en octubre de 2018. La comunicación presentada, titulada "Sistemas constructivos antisísmicos en el patrimonio histórico de fábrica en Iberoamérica. Analogías y taxonomía", incluye una introducción a los sistemas sismorresistentes identificados en Sudamérica y desarrolladas por las distintas culturas históricas que tuvieron que hacer frente a esta amenaza que imponía la realidad tectónica de cada región (Ramírez 2018)<sup>2</sup>.

En este artículo se incluyeron algunos ejemplos incluidos en esta tesis doctoral, como los mencionados en el caso de Perú, y se contrastaron y completaron con otros sistemas identificados en otras regiones del continente, de gran riesgo sísmico en todo el arco del pacífico.

En lo que respecta a la difusión de resultados en revistas científicas, se han publicado conclusiones específicas vinculadas con la investigación en la revista "Informes de la Construcción", con un artículo firmado junto con mi codirectora de tesis, Pepa Cassinello. En él se profundiza sobre algunos de los sistemas sismorresistentes implementados en la arquitectura histórica de fábrica de Irán y España, recogiendo una serie de analogías y variaciones entre los sistemas de las catedrales góticas españolas y las mezquitas y palacios iraníes.

Con ésta última publicación se amplía la difusión de resultados a la segunda de las zonas sísmicas incluidas en esta investigación, incluyendo de esta forma varios de los puntos de análisis recogidos en esta tesis.

---

1.- Ramírez Sánchez, Enrique. 2017. Sistemas antisismo en la arquitectura histórica de fábrica. Actas del Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción. Donostia - San Sebastián, 3 - 7 octubre 2017. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

2.- Ramírez Sánchez, Enrique. 2018. Sistemas constructivos antisísmicos en el patrimonio histórico de fábrica ubicado en Iberoamérica: analogías y taxonomía. Actas del Primer Coloquio Colombiano de Historia de la Construcción. Bogotá, 11 - 12 octubre 2018. Colombia: Bogotá.

No obstante, podrían plantearse publicaciones adicionales que recojan otros aspectos incluidos en esta investigación, como la evolución y características de los sistemas sismorresistentes implementados en la tercera de las regiones propuestas, en Bengala; la profundización en cada uno de los sistemas identificados y su clasificación tipológica; la comparación de los distintos parámetros y elementos comunes presentes en cada una de las estrategias frente a sismos; o como aplicación práctica, alguna publicación relacionada con la vigencia e influencia de los principios sismorresistentes sobre los diferentes sistemas, así como su vinculación con las intervenciones de conservación realizadas en muchas de estas construcciones situadas en zonas de gran actividad tectónica.



## 4.4 Futuras líneas de investigación

#### 4.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación iniciada por la profesora Pepa Cassinello, con el estudio del esqueleto estructural sismorresistente de las catedrales góticas del Mediterráneo español, y continuada mediante la presente tesis doctoral a través de otras tres regiones de gran exposición sísmica como son Irán, Perú y Bengala, constituyen un necesario punto y seguido en lo que respecta a la profundización del comportamiento sismorresistente del patrimonio de fábrica amenazado por la presencia de terremotos. Las propias limitaciones de estudio de esta tesis doctoral conforman un excelente punto de partida para ahondar en el conocimiento sísmico que albergan muchas de las construcciones que forman parte de esta investigación, pero también de todas aquellas situadas en muchas de las regiones de mayor sismicidad del planeta, y cuyo campo de análisis se extiende a todo el patrimonio arquitectónico situado en estas zonas de gran peligrosidad.

En este sentido, de entre todas las posibles vías de investigación que abre esta tesis doctoral podrían destacarse las siguientes líneas principales dirigidas a la ampliación de los sistemas sismorresistentes presentes en la arquitectura histórica de fábrica:

- Ampliación de los casos de estudio a otras zonas con gran actividad telúrica, así como a otros marcos cronológicos distintos a los establecidos en esta tesis doctoral. La limitación geográfica y temporal establecida en la presente investigación constituye un excelente punto de partida a la hora de iniciar futuros estudios sobre arquitecturas presentes en estos continentes, gracias al variado rango de análisis abarcado a través de los distintos antecedentes y casos seleccionados hasta la fecha, tanto desde un punto de vista constructivo como cultural o tipológico, entre otros.
- Estudio de los sistemas y principios sismorresistentes integrados en las cimentaciones de las construcciones históricas de fábrica. El carácter subterráneo de estos elementos estructurales alberga uno de los campos de análisis más inexplorados del patrimonio ubicado en zonas de gran riesgo sísmico, donde sólo se ha permitido cierta observación en aquellas construcciones colapsadas o desmontadas a lo largo de los siglos. Esta dificultad de acceso a los puntos de encuentro con el terreno supone todo un desafío a la hora de caracterizar los sistemas más efectivos planteados en los arranques de muros, columnas y todo tipo de soportes que forman parte de esqueletos estructurales con una clara efectividad sismorresistente.

Estas dos líneas podrían complementarse a su vez con otras tres vías de investigación enfocadas al estudio específico de distintas facetas que influyen en el comportamiento estructural de las construcciones más afectadas y amenazadas por los terremotos desde su propia concepción, como son los distintos aspectos materiales y estructurales de estos sistemas, así como aquellos ligados a la restauración de estas edificaciones:

- Evaluación del proceso de deterioro material de los distintos elementos que configuran los sistemas sismorresistentes identificados, tanto las propias fábricas o subestructuras internas como los materiales empleados como conglomerantes o rellenos. Esta línea de investigación podría incluir a su vez la profundización de las distintas vías de mantenimiento y conservación de los elementos originales,



incorporando materiales y sistemas compatibles con ellos desde un punto de vista complementario, consolidando y fortaleciendo el comportamiento de estos sistemas. De igual forma, podría llevarse a cabo un análisis y evaluación detallado sobre el comportamiento de los materiales que fomentan esta estabilidad aún en situaciones de sismo, catalogando los efectos de los daños registrados sobre ellos tras el transcurso de los últimos terremotos, así como el posible impacto que pudiera ocasionar la acumulación de estos daños durante distintos episodios sísmicos.

- Profundización desde un punto de vista estructural en el comportamiento sismorresistente de los sistemas identificados en las construcciones erigidas con fábricas de piedra, ladrillo y adobe; así como de aquellos otros materiales que forman parte de estos sistemas, como la composición y caracterización de las juntas de mortero, las subestructuras de madera integradas en las fábricas de estas construcciones históricas o los materiales de relleno introducidos entre las distintas capas de muros, cimentaciones o cubiertas.
- Ampliación de los casos de análisis de las soluciones e intervenciones contemporáneas sobre el patrimonio histórico de fábrica. Existen numerosos casos de estudio de restauraciones contemporáneas que podrían dar lugar a un análisis más exhaustivo de las medidas más utilizadas, así como de los errores más comunes a la hora de intervenir sobre el patrimonio situado sobre zonas sísmicas, identificando y caracterizando estas medidas en función del alcance de estas intervenciones, su configuración constructiva, mantenimiento, limitaciones, etc. Este enfoque crítico sobre las intervenciones ya realizadas, podría venir acompañado de una propuesta de implementación de los principios y técnicas tradicionales a través de estas intervenciones contemporáneas sobre el patrimonio histórico, salvaguardando y reforzando así el conocimiento sísmico integrado en las construcciones históricas más expuestas a terremotos.

Finalmente, y a modo de epílogo de los puntos anteriores, podría proponerse una última vía de investigación que vinculase otros sistemas y materiales con los recogidos en la presente tesis doctoral, ampliando los casos de análisis a otras regiones, culturas y tipos constructivos que permitan conocer mejor los principios sismorresistentes más efectivos que mantienen en pie otras edificaciones históricas de gran vulnerabilidad desde el punto de vista sísmico:

- Analogías constructivas entre los sistemas sismorresistentes del patrimonio histórica de fábrica y los implementados en otros tipos de construcciones como las planteadas en las edificaciones de tapial o madera. De la misma forma que se han establecido paralelismos y diferencias entre los sistemas utilizados en los distintos tipos de fábrica, se podría extrapolar la metodología empleada para aquellas construcciones históricas erigidas con otros sistemas constructivos, permitiendo a su vez una comparación de éstos con las fábricas de piedra, ladrillo y adobe analizadas en esta tesis doctoral.

Todas estas posibles líneas de investigación sin duda contribuirían a completar y desarrollar el conocimiento constructivo de los sistemas y estrategias implementadas sobre el patrimonio de fábrica, tanto en las regiones seleccionadas en esta tesis doctoral como en otras zonas que también presentan gran peligrosidad.



## 5. Anexos



## 5.1 Mapas sísmicos

5. ANEXOS

5.1 MAPAS SÍSMICOS

MUNDO - PLACAS TECTÓNICAS

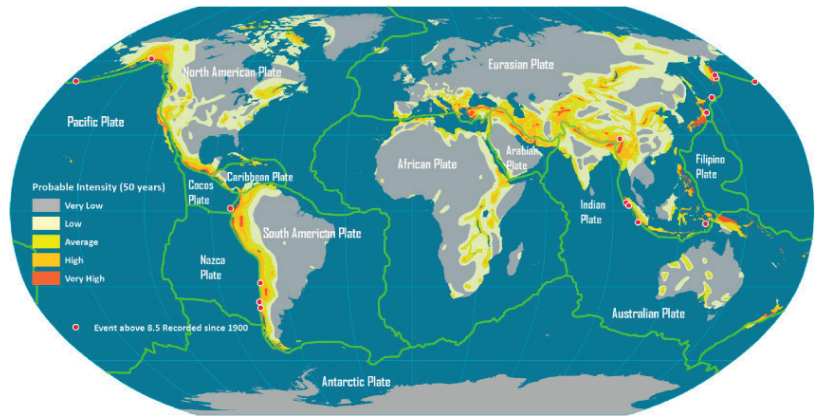


Fig. A.1 Placas tectónicas en el mundo

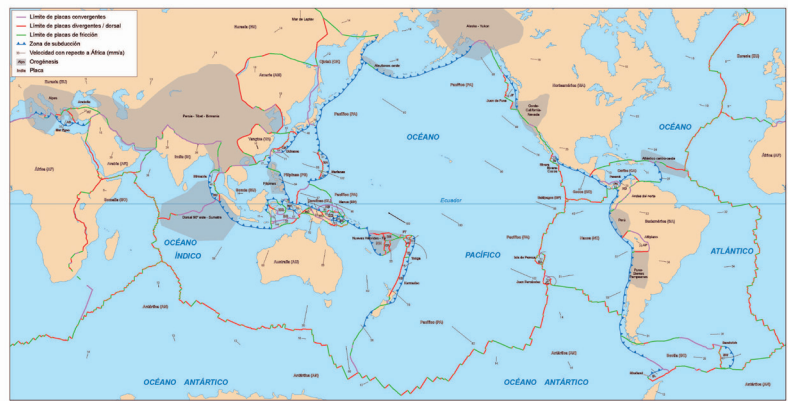


Fig. A.2 Mapa mundial de tectónica de placas (IGN)

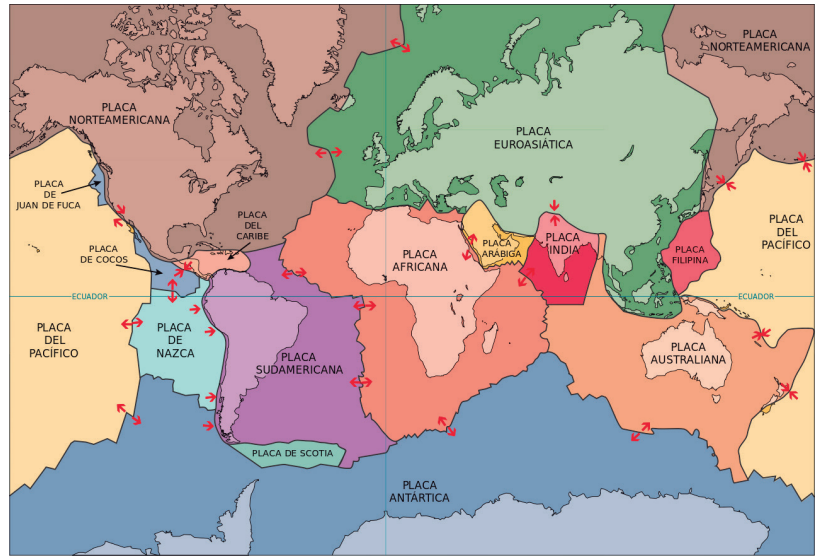


Fig. A.3 Placas tectónicas y movimientos entre ellas (USGS)

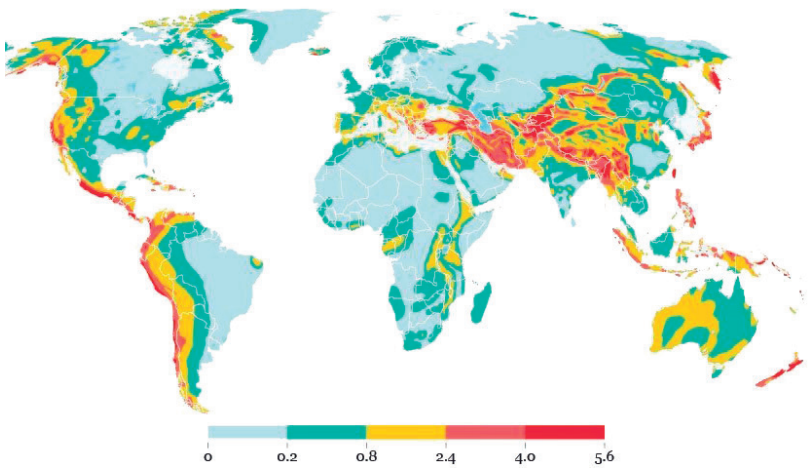


Fig.A.4 Riesgo sísmico en el mundo (GSHAP)

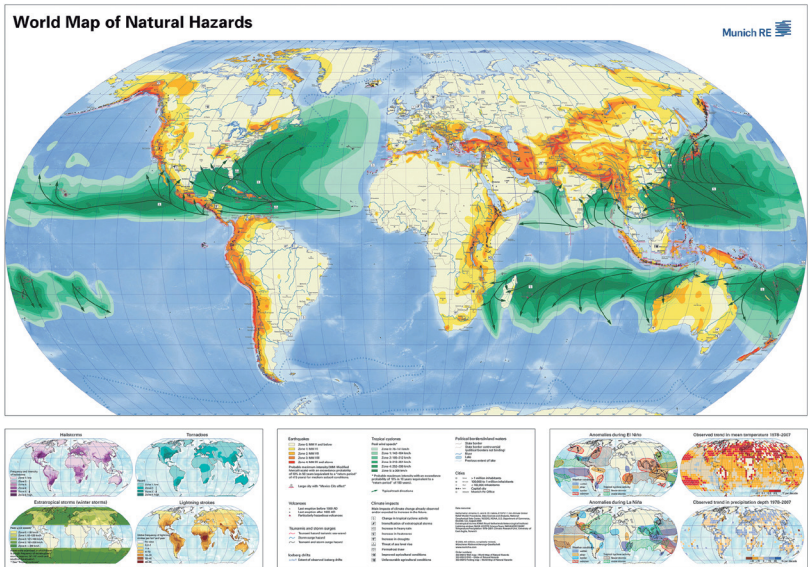


Fig.A.5 Mapa de riesgos naturales en el mundo (Munich RE)

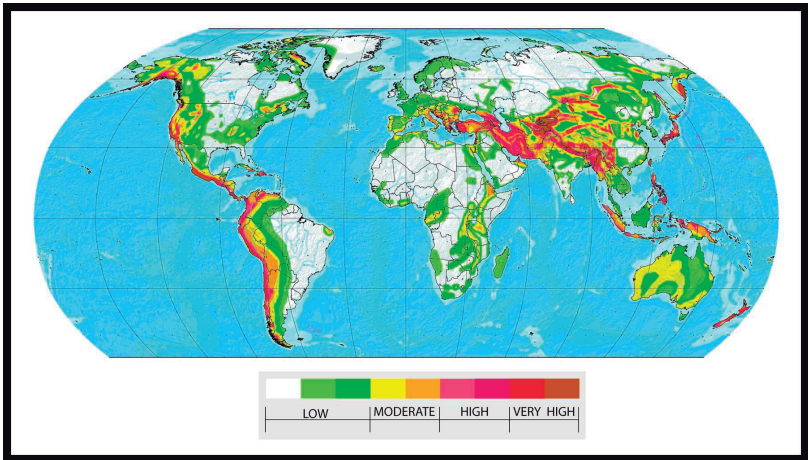


Fig.A.6 Riesgo sísmico en el mundo (GSHAP)

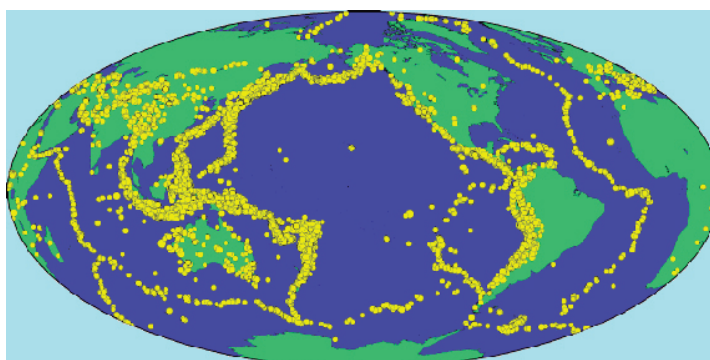


Fig.A.7 Anillo de fuego del Pacífico (UCB)

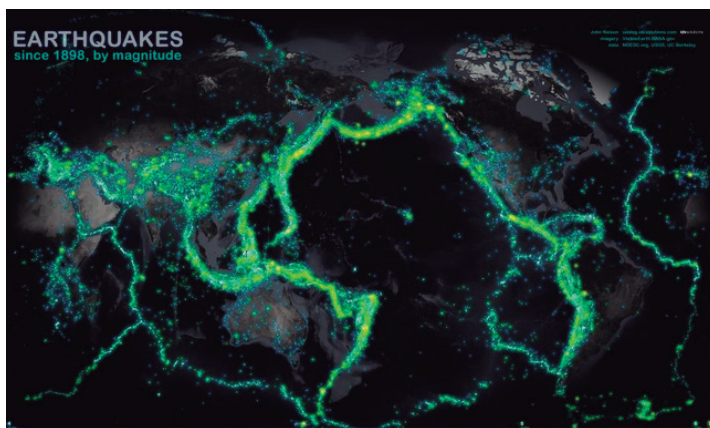


Fig.A.8 Terremotos desde 1898 (USGS, UC Berkeley)



EUROPA

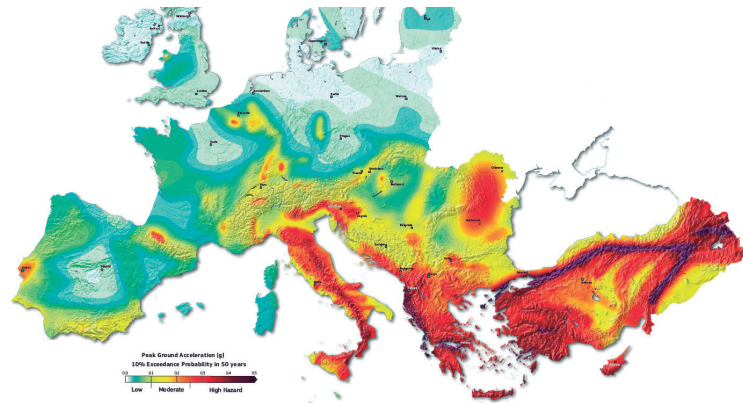


Fig. A.9 Mapa de riesgo en Europa (EU-SHARE)

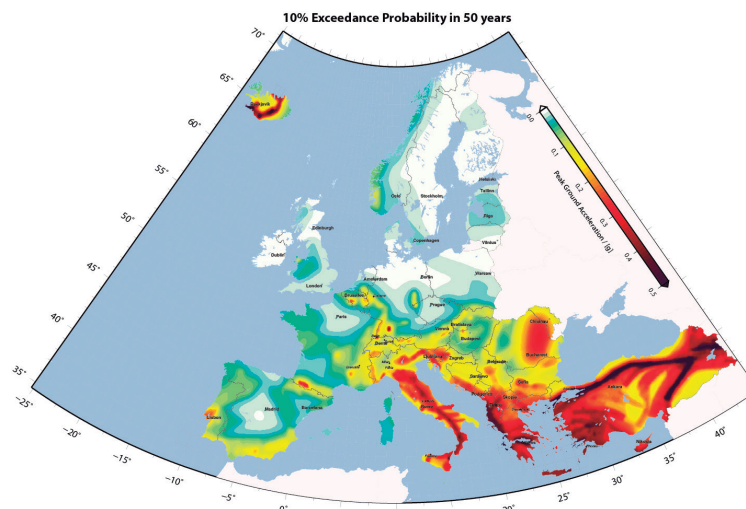


Fig. A.10 Mapa de peligrosidad sísmica en Europa (ESHM)

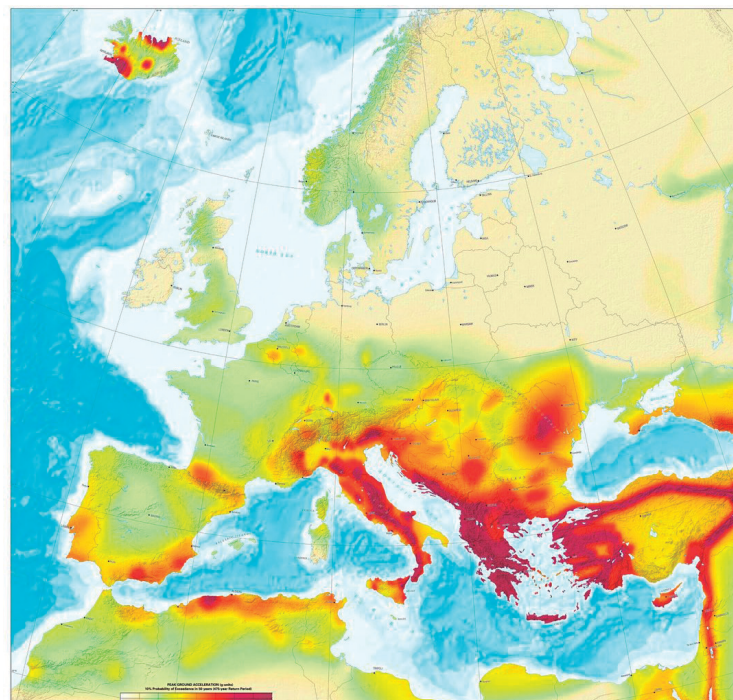


Fig. A.11 Riesgo sísmico en Europa (Instituto cartográfico de Cataluña)

ASIA - RIESGO SÍSMICO

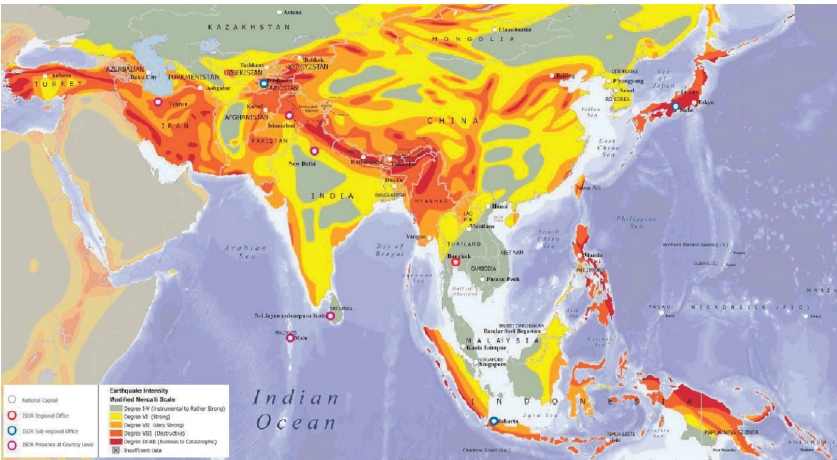


Fig. A.12 Riesgo sísmico en Asia (LCC)

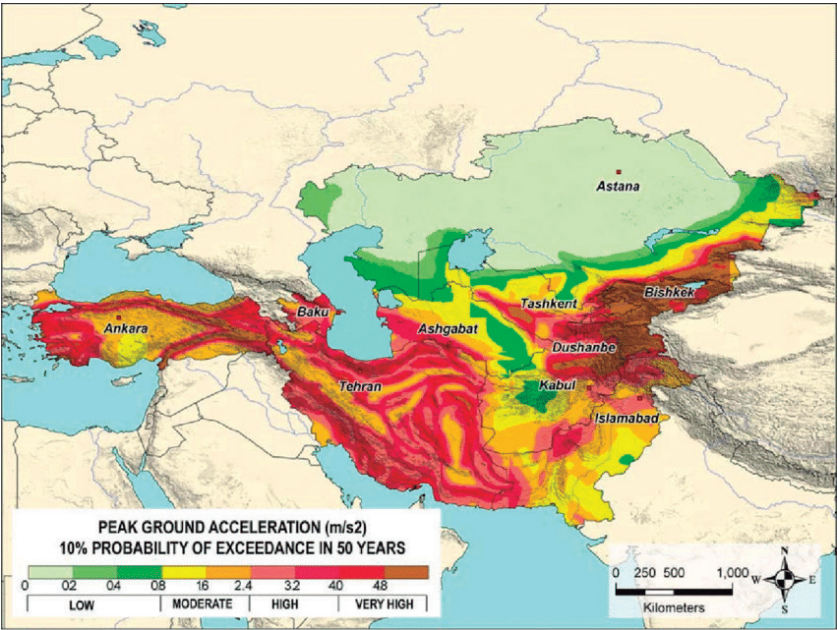


Fig. A.13 Riesgo sísmico estimado en Asia central (GSHAP)

AMÉRICA - RIESGO SÍSMICO

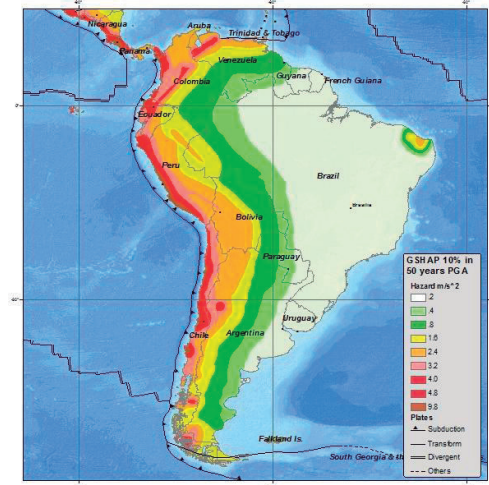


Fig. A.14 Mapa de riesgo sísmico en Sudamérica (USGS)

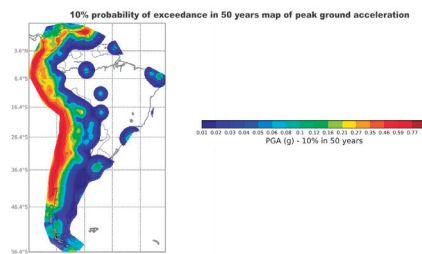


Fig. A.15 Riesgo sísmico en Sudamérica (USGS)

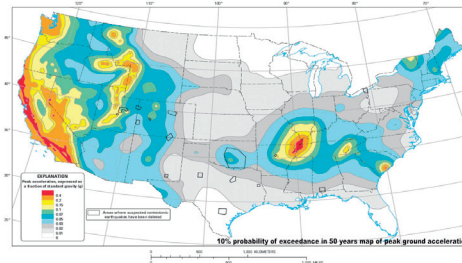


Fig. A.16 Riesgo sísmico en EE.UU. (USGS)

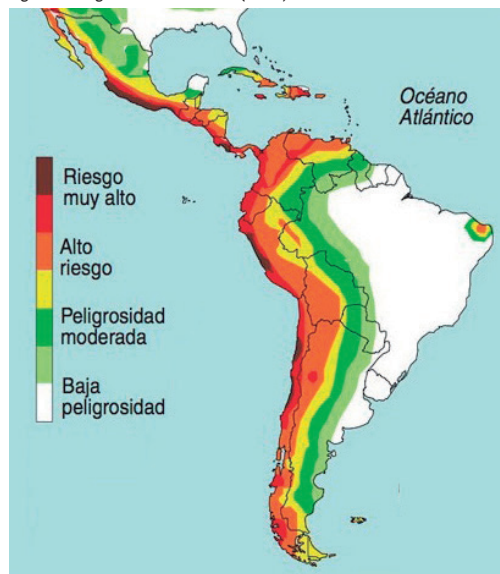


Fig. A.17 Riesgo sísmico en Sudamérica (USGS)



ÁFRICA - RIESGO SÍSMICO

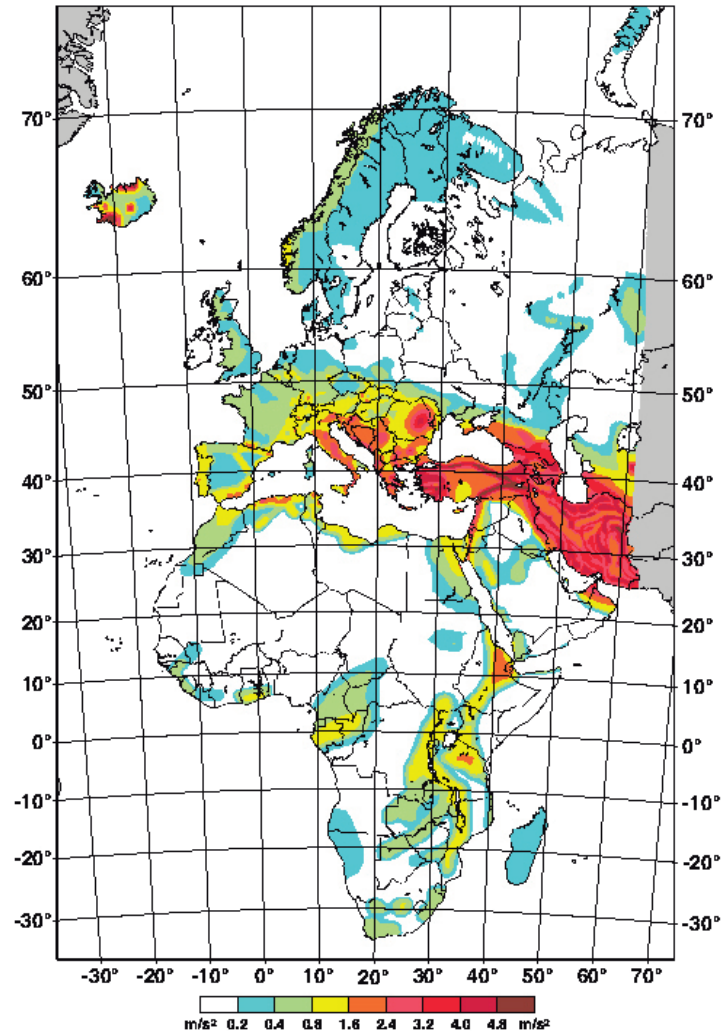


Fig.A.18 Riesgo sísmico en África (GSHAP)

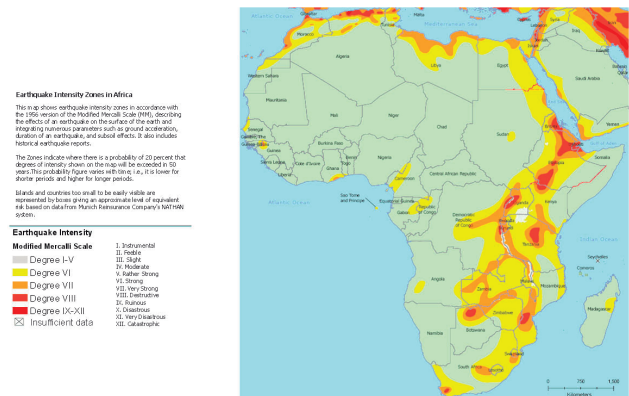


Fig.A.19 Mapa de riesgo sísmico en África (GALL)

ESPAÑA - RIESGO SÍSMICO

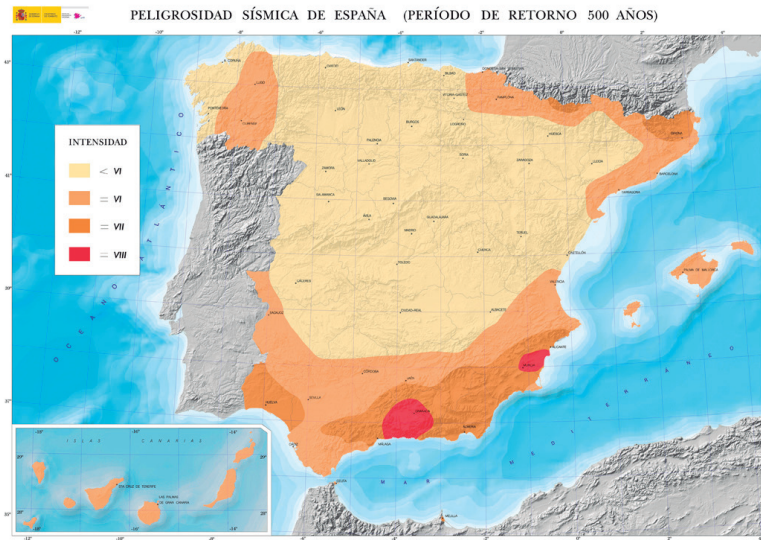


Fig. A.20 Mapa de peligrosidad sísmica de España 2002 (IGN)

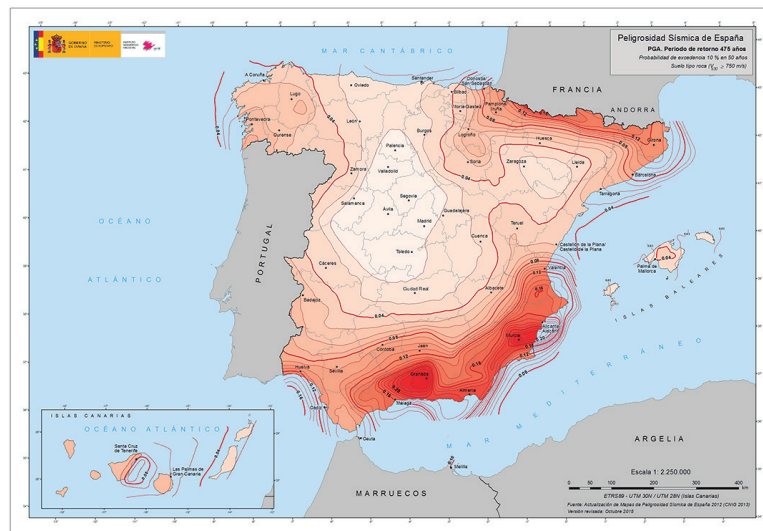


Fig. A.21 Mapa de peligrosidad sísmica de España 2015 (IGN)

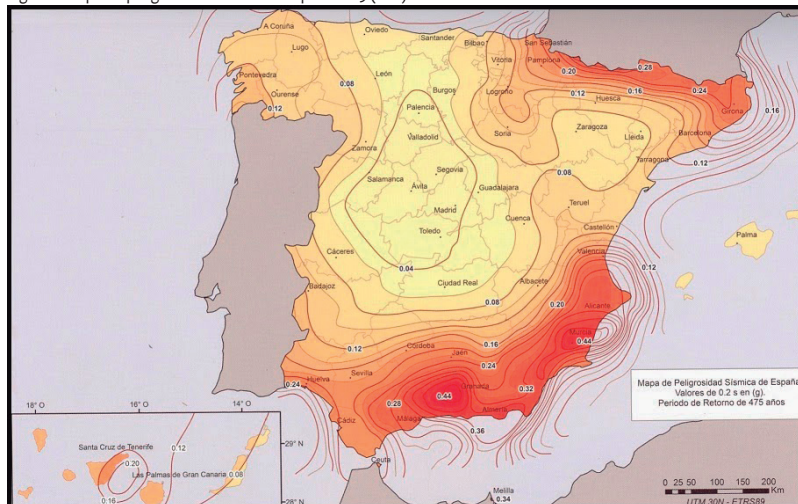


Fig. A.22 Mapa de peligrosidad sísmica en España (IGN)



## ESPAÑA - TERREMOTOS REGISTRADOS

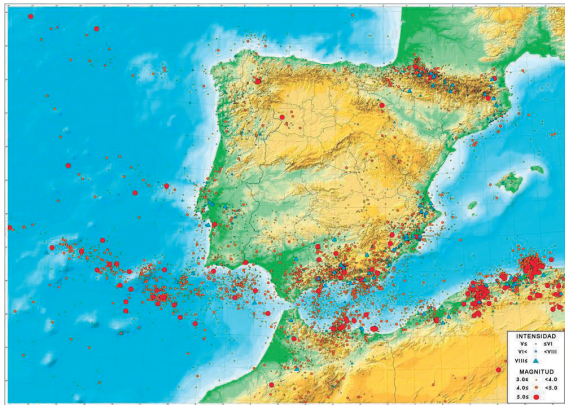


Fig.A.23 Terremotos - Mapa general de la sismicidad de la Península Ibérica (IGN)

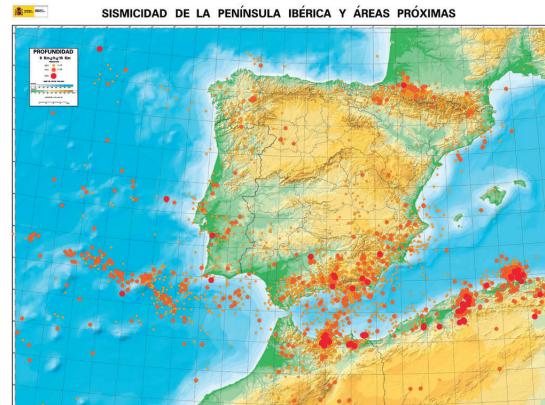


Fig.A.24 Terremotos en la Península Ibérica - profundidad menor 10 km (IGN)

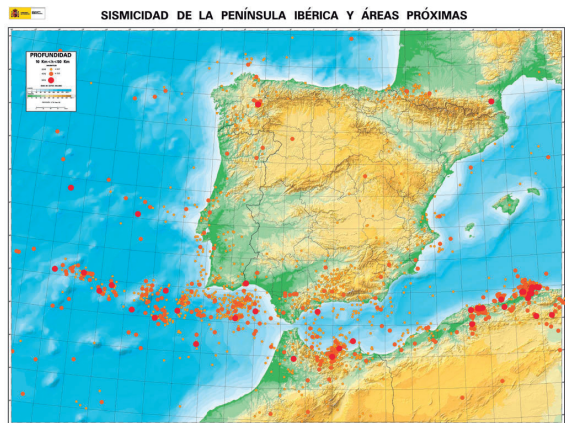


Fig.A.25 Terremotos en la Península Ibérica - profundidad entre 10-50 km (IGN)



Fig.A.26 Terremotos en la Península Ibérica - profundidad mayor 50 km (IGN)

## IRÁN - RIESGO SÍSMICO

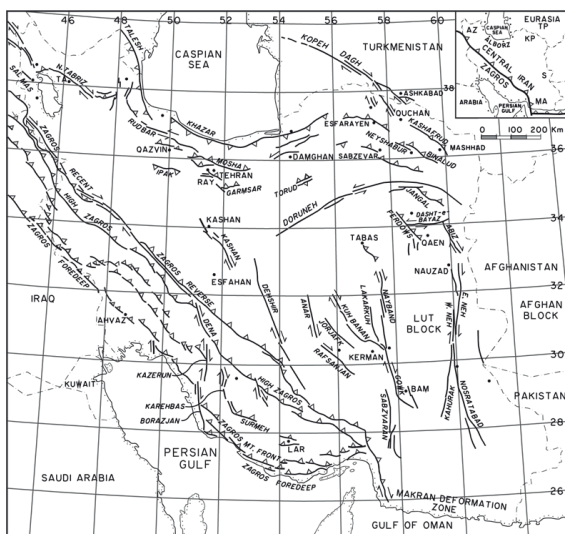


Fig.A.27 Tectónica Irán (Ashtari)

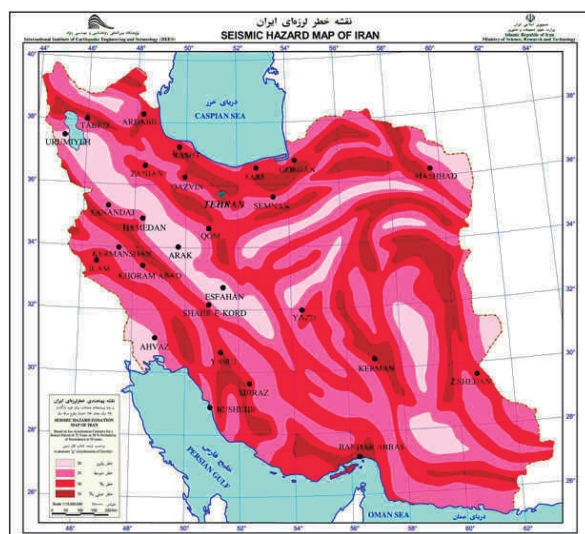


Fig.A.28 Mapa de riesgo sísmico (IIEES)



IRÁN - TERREMOTOS REGISTRADOS

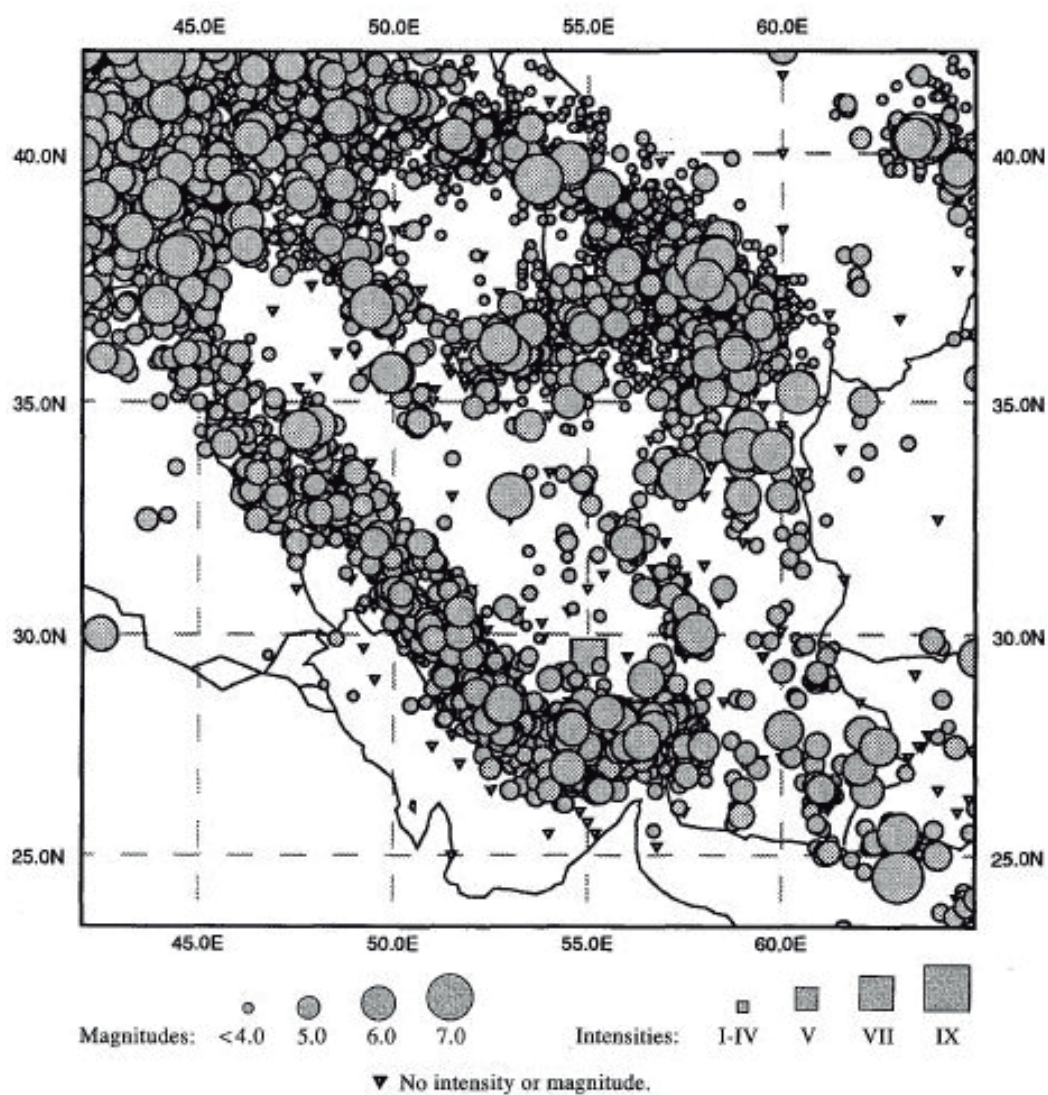


Fig. A.29 Sismicidad de Irán (M.Berberian)

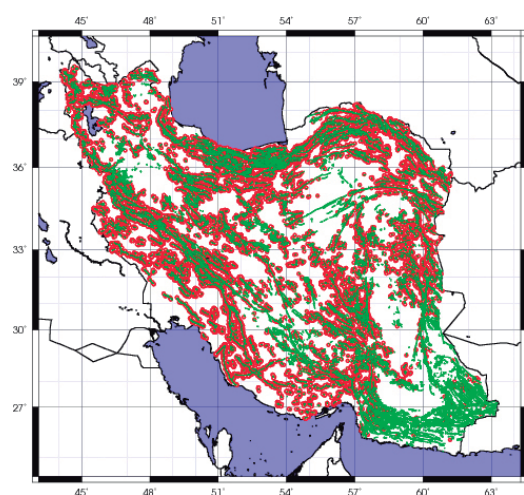


Fig. A.30 Terremotos y fallas iraníes (DEPS)

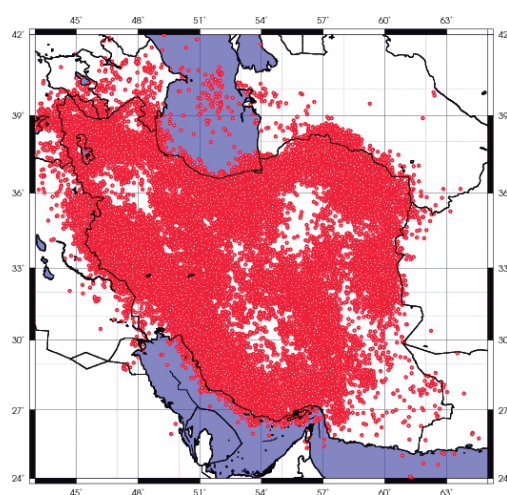


Fig. A.31 Terremotos iraníes 2006-2015 (DEPS)

PERÚ - RIESGO SÍSMICO

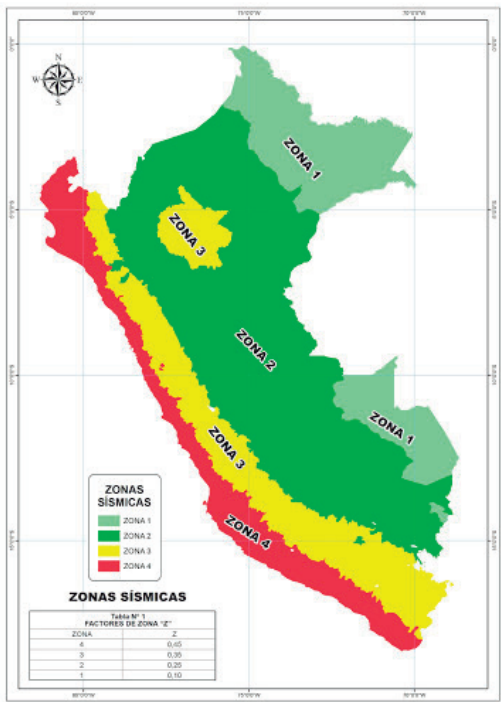


Fig. A.32 Mapa de zonificación sísmica (RNE Perú)

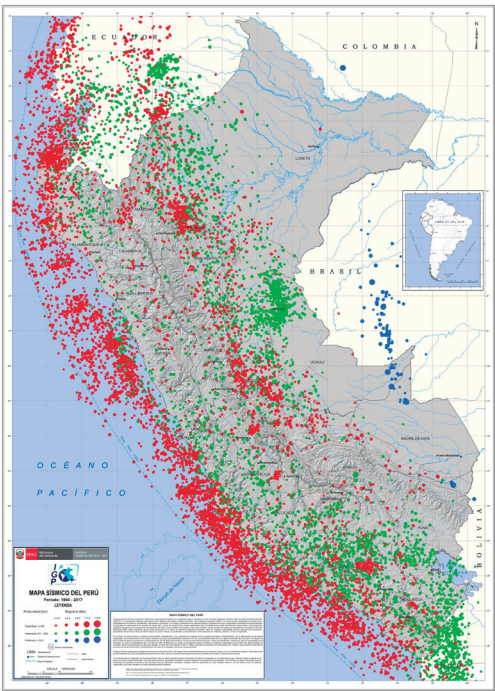


Fig. A.33 Mapa Sísmico 1960-2017 (IGP)

BENGALA - RIESGO SÍSMICO

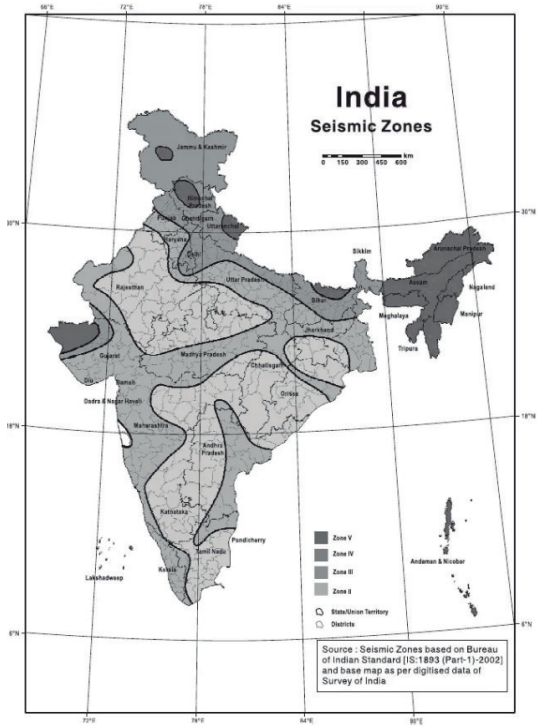


Fig. A.34 Mapa de riesgo sísmico de India (IS1893)



Fig. A.35 Mapa de riesgo sísmico de Bangladesh (BNBC)



## BENGALA - TERREMOTOS REGISTRADOS

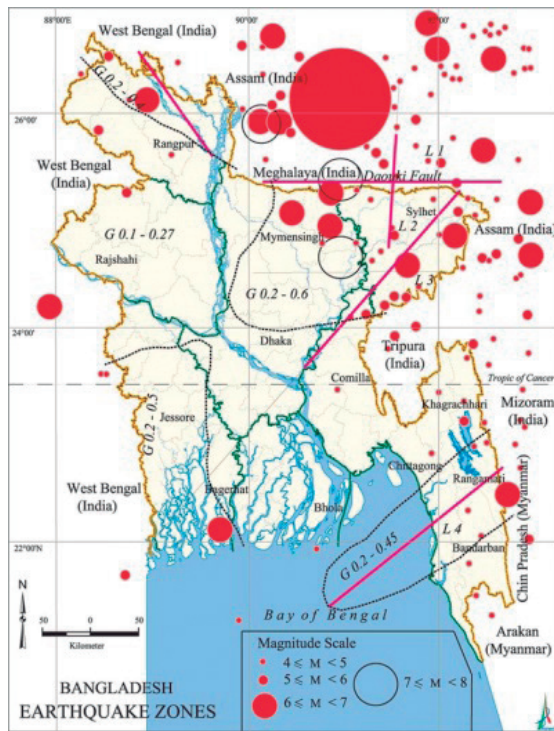


Fig. A.36 Riesgo sísmico en Bangladesh (Banglapedia)



## 6.2 Calendarios sísmicos históricos

## 5.2 CALENDARIOS SÍSMICOS HISTÓRICOS

Sismos históricos en Irán:

| REGIÓN<br>ZONA | CONSTRUCCIÓN Y FECHA (SIGLO)        | ALGUNOS SISMOS HISTÓRICOS (Siglos VIII-XVIII)                            |                                                                                               |
|----------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                |                                     | AÑO                                                                      | VÍCTIMAS REPORTADAS                                                                           |
| ISFAHAN        | Menar Jonban (XV)                   | 853 / 958 / 1755 / 1824                                                  | +1.000 / +1.000 / 40.000 / +1.000                                                             |
|                | Mausoleo del sultán Bakht Aqa (XIV) | 856 / 943 / 1052 / 1209 /<br>1270 / 1493 / 1498 / 1673 /<br>1678 / 1695  | 200.000 / 5.000 / +1.000 / +1.000 /<br>30.000 / +1.000 / +1.000 / 5.600 /<br>+1.000 / +1.000  |
| MASHAD         | Mausoleo del Iman Reza (XV)         | 893 / 1042 / 1272 / 1304 / 1641<br>/ 1667 / 1679 / 1721 / 1727 /<br>1780 | 150.000 / 40.000 / - / +1.000 / +1.000 /<br>80.000 / 7.600 / 40.000 / 77.000 / 50.000         |
|                | Mezquita Goharshad (XIV)            |                                                                          |                                                                                               |
| TABRIZ         | Puerta Arg-e-Tabriz (XIV)           |                                                                          |                                                                                               |
|                | Mezquita Azul de Tabriz (XV)        |                                                                          |                                                                                               |
| URMIA          | Mezquita Rezayieh (XIII)            | 893 / 1042 / 1304 / 1641 / 1667<br>/ 1679 / 1721 / 1727 / 1780           | 150.000 / 40.000 / +1.000 / +1.000 /<br>80.000 / 7.600 / 40.000 / 77.000 /<br>50.000          |
|                |                                     |                                                                          |                                                                                               |
| VARAMIN        | Mezquita de los viernes (XIV)       | 855 / 856 / 1119 / 1127 /<br>1177 / 1485 / 1498 / 1608 /<br>1665 / 1678  | +1.000 / 45.000 / +1.000 / +1.000 /<br>+1.000 / +1.000 / +1.000 / +1.000 /<br>+1.000 / +1.000 |
|                |                                     |                                                                          |                                                                                               |
| YAZD           | Mezquita de los viernes (XIV)       |                                                                          | - / - / - / - / -                                                                             |
|                | Mezquita Dahouk (XV)                | 734/1344/1459/1591/1752                                                  | - / Ms=5,7 / Ms=6,6 / Ms=5,9 / Ms=5                                                           |
| ZANJAN         | Mausoleo de Soltaniyeh (XIV)        | 893 / 1042 / 1304 / 1641 / 1667<br>/ 1679 / 1721 / 1727 / 1780           | 150.000 / 40.000 / +1.000 / +1.000 /<br>80.000 / 7.600 / 40.000 / 77.000 /<br>50.000          |
|                | Tumba de Molla Hassan Kashi (XVI)   |                                                                          |                                                                                               |

Fig. A.37 Sismos históricos Irán (Autor)

Sismos históricos en Perú:

| ALGUNOS SISMOS HISTÓRICOS (Siglos XVI-XVIII) |            |               |     |           |
|----------------------------------------------|------------|---------------|-----|-----------|
| ZONA                                         | FECHA      | MAGNITUD (Mw) | MMI | MUERTES   |
| Lima                                         | 1555-11-13 | 7,5 Ms        | -   | -         |
| Cañete                                       | 1578-07-17 | 7,7 Mw        | -   | -         |
| Arequipa                                     | 1582-02-22 | 7,9 Mw        | X   | 30        |
| Arequipa                                     | 1583-01-22 | -             | -   | -         |
| Lima y Callao                                | 1586-07-09 | 8,1 Mw        | IX  | 22        |
| Ica                                          | 1594-12-18 | -             | -   | -         |
| Arequipa                                     | 1600-02-19 | 7,8 Ms        | -   | 4000      |
| Arequipa                                     | 1604-11-24 | 8,4 Mw        | IX  | 1200-1700 |
| Lima y Callao                                | 1609-10-19 | 7,5 Ms        | -   | 200       |
| Arica                                        | 1615-09-16 | 8,8 Ms        | -   | -         |
| Trujillo                                     | 1619-02-14 | 7,8 Mw        | IX  | 3000-5000 |
| Lima y Callao                                | 1630-11-27 | 7,8 Ms        | -   | -         |
| Cusco                                        | 1650-03-31 | 7,2 Mw        | X   | 5000      |
| Lima                                         | 1655-11-13 | 7,4 Mw        | IX  | 1         |
| Ica y Pisco                                  | 1664-05-12 | 7,8 Mw        | X   | 460       |
| Arequipa                                     | 1666       | -             | -   | -         |
| Arequipa                                     | 1668       | -             | -   | -         |
| Lima y Callao                                | 1678-06-17 | 7,5 Ms        | -   | 9         |
| Arica                                        | 1681-03-10 | 7,3 Ms        | -   | 133       |
| Arequipa                                     | 1687       | -             | -   | -         |
| Huancavelica                                 | 1687-01-28 | 6,5 Mb        | -   | -         |
| Lima y Callao                                | 1687-10-12 | 8,2 Mw        | IX  | 1541      |
| Lima                                         | 1690       | -             | -   | -         |
| Lima                                         | 1699-07-14 | 6,5 Mb        | -   | -         |
| -                                            | 1709-09-17 | 7,0 Mb        | -   | -         |
| Lima                                         | 1716       | -             | -   | -         |
| Lima y Trujillo                              | 1725-01-06 | 7,8 Ms        | -   | -         |
| Lima                                         | 1732       | -             | -   | -         |
| Lima                                         | 1734       | -             | -   | -         |
| Lima                                         | 1743       | -             | -   | -         |
| Lima                                         | 1746-10-28 | 8,4 Mw        | X   | 1141      |
| Lima                                         | 1777-01-26 | 6,5 Mb        | -   | -         |
| Arequipa                                     | 1784-05-13 | 8,0 Mw        | X   | 53        |

Fig. A.38 Terremotos históricos Perú (Autor)

Sismos históricos en Bengala:

| ALGUNOS SISMOS HISTÓRICOS EN BENGALA (Siglos XII-XVIII) |             |               |      |               |
|---------------------------------------------------------|-------------|---------------|------|---------------|
| ZONA                                                    | FECHA       | MAGNITUD (Mw) | MMI  | MUERTES       |
| Assam (IN)                                              | 810-400a.C. | -             | -    | -             |
| Assam (IN)                                              | 535-530a.C. | -             | -    | -             |
| Assam (IN)                                              | 645-980     | -             | -    | -             |
| Assam (IN)                                              | 825-835     | 8             | -    | -             |
| Bangladesh                                              | 1440-1470   | -             | -    | -             |
| Sylhet y Chittagong                                     | 1548        | 7             | IX   | -             |
| Assam (IN)                                              | 1596        | 7             | IX   | -             |
| Assam (IN)                                              | 1601        | -             | -    | -             |
| Sylhet, Assam (IN)                                      | 1642        | 6             | -    | -             |
| Assam (IN)                                              | 1649        | 3             | III  | -             |
| Sylhet, Assam (IN)                                      | 1663-02-19  | 8             | III  | -             |
| Bangladesh                                              | 1664        | 7,79          | -    | -             |
| Bangladesh                                              | 1676-09/10  | 5,7           | VII  | -             |
| Assam (IN)                                              | 1696        | -             | -    | -             |
| Bangladesh y Kolkata (IN)                               | 1737-10-11  | 7             | X    | 3.000-300.000 |
| Assam (IN)                                              | 1749        | -             | -    | -             |
| Dhaka, Chittagong                                       | 1762-04-02  | 8,8 Mw        | XI   | 200           |
| Kolkata (IN)                                            | 1762-07-13  | 4,3           | V    | -             |
| Bangladesh                                              | 1764-06-04  | 6             | VIII | -             |
| Bangladesh                                              | 1765        | -             | -    | -             |
| Assam (IN)                                              | 1772        | 6,5           | -    | -             |
| Dhaka                                                   | 1775-04-10  | 4,3           | V    | -             |
| Bangladesh                                              | 1787        | 7             | X    | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1808-04-13  | 4,3           | V    | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1810-04-01  | 3,7           | IV   | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1810-05-13  | 4,3           | V    | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1811-02-01  | 5             | VI   | -             |
| Sylhet                                                  | 1812-05-11  | 6             | VIII | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1816-07-11  | 3,7           | IV   | -             |
| Bangladesh                                              | 1822-04-03  | 7,1           | VIII | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1822-08-16  | 5             | VI   | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1823-09-09  | 5             | VI   | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1823-02-09  | 5             | VI   | -             |
| Bangladesh                                              | 1825-01-08  | 4,3           | V    | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1827-01     | 4,3           | V    | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1827-01-19  | 4,3           | V    | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1828-07-08  | 5,7           | VII  | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1828-09-18  | 4,3           | V    | -             |
| Dhaka                                                   | 1828-10-08  | 5             | -    | -             |
| Kolkata (IN)                                            | 1829-09-18  | 4,3           | V    | -             |
| Chittagong                                              | 1830-12-31  | 6,5           | -    | -             |
| Assam (IN)                                              | 1832        | 6,5           | -    | -             |
| Rangpur                                                 | 1834-07-08  | 6             | VIII | -             |
| Rangpur                                                 | 1834-07-21  | 6             | VIII | -             |
| Bengala                                                 | 1842-05-21  | 5,7           | VII  | -             |

Fig. A.39 Sismos históricos Bengala (Autor)

## Sismos contemporáneos en Irán, Perú y Bengala:

| SISMOS CONTEMPORÁNEOS EN IRÁN, PERÚ Y BENGALA |                      |            |          |      |                 |
|-----------------------------------------------|----------------------|------------|----------|------|-----------------|
|                                               | ZONA                 | FECHA      | MAGNITUD | MMI  | MUERTES         |
| IRÁN                                          | Lorestan             | 1909-01-23 | 7,3      | IX   | 6.000 - 8.000   |
|                                               | Khorasan-e Razavi    | 1929-05-01 | 7,2      | IX   | 3.257 - 3.800   |
|                                               | West Azerbaijan      | 1930-05-06 | 7,1      | IX   | 1.360 - 3.000   |
|                                               | South Khorasan       | 1947-08-05 | 7,3      | -    | 500             |
|                                               | Qazvin               | 1962-09-01 | 7,1      | IX   | 12.225          |
|                                               | South Khorasan       | 1968-08-31 | 7,4      | X    | 15.000          |
|                                               | South Khorasan       | 1978-09-16 | 7,4      | IX   | 15.000 - 25.000 |
|                                               | Gilan                | 1990-06-20 | 7,4      | X    | 35 - 50         |
|                                               | South Khorasan       | 1997-05-10 | 7,3      | X    | 1.567           |
|                                               | Kerman               | 2003-12-22 | 6,6      | IX   | 26.271 - 43.200 |
|                                               | Sistan y Baluchestan | 2013-04-13 | 7,7      | VII  | 35              |
|                                               | Kermanshah           | 2017-11-12 | 7,3      | VIII | 630             |
| PERÚ                                          | Caravelí             | 1913-08-06 | 7,7      | X    | -               |
|                                               | Lima y Callao        | 1940-05-24 | 8,2      | VIII | 1.000           |
|                                               | Nasca                | 1942-08-24 | 8,4      | IX   | 33              |
|                                               | Centro del Perú      | 1947-11-01 | 7,7      | -    | 2.233           |
|                                               | Norte del Perú       | 1953-12-12 | 7,8      | -    | 48              |
|                                               | Lima y Callao        | 1966-10-17 | 8,2      | -    | 220             |
|                                               | Norte del Perú       | 1970-05-31 | 7,9      | -    | 100.000         |
|                                               | Lima e Ica           | 1974-10-03 | 8,1      | -    | 252             |
|                                               | Sur del Perú         | 2001-06-23 | 8,4      | -    | 240             |
|                                               | Pisco e Ica          | 2007-08-15 | 8,0      | -    | 595             |
| BENGALA                                       | Sur del Perú         | 2014-04-01 | 8,2      | -    | -               |
|                                               | Noreste Perú         | 2019-05-26 | 8,0      | -    | 2               |
|                                               | Kishorganj (BA)      | 1918-07-08 | 7,6      | -    | 9               |
|                                               | Mymensingh (BA)      | 1923-09-09 | 7,1      | -    | 50              |
|                                               | Assam (IN)           | 1930-07-02 | 7,1      | -    | 1               |
|                                               | Bangladesh           | 1930-09-02 | 7,1      | -    | -               |
|                                               | Norte de Bangladesh  | 1932-03-24 | 7,4      | -    | -               |
|                                               | Bangladesh           | 1932-03-27 | 7,4      | -    | -               |
|                                               | Bangladesh           | 1933-03-06 | 7,6      | -    | -               |
|                                               | Pabna (BA)           | 1935-03-21 | 6,3      | -    | -               |
|                                               | Sylhet (BA)          | 1997-05-08 | 6,0      | -    | -               |
|                                               | Mizoram (IN)         | 1997-11-21 | 6,1      | -    | 23              |
|                                               | Borkal (BA)          | 2003-07-26 | 5,7      | -    | 3               |
|                                               | Manipur (IN)         | 2016-01-03 | 6,7      | -    | -               |

Fig. A.40 Resumen sismos contemporáneos (Autor)

## Sismos contemporáneos en España:

| SISMOS CONTEMPORÁNEOS CON AFECTACIÓN EN ESPAÑA |            |          |        |         |
|------------------------------------------------|------------|----------|--------|---------|
| ZONA                                           | FECHA      | MAGNITUD | MMI    | MUERTES |
| Dúrcal, Granada                                | 1922-07-27 | -        | VII    | -       |
| Dúrcal, Granada                                | 1954-03-29 | 7,8      | V      | -       |
| La Zubia, Granada                              | 1955-06-04 | 5,1      | VII    | -       |
| Albolote, Granada                              | 1956-04-19 | 5,1      | VIII   | 11      |
| Galera, Granada                                | 1964-06-09 | 4,8      | VII    | -       |
| Cabo de San Vicente                            | 1969-02-28 | 7,8      | VII    | 7       |
| Partaloea, Almería                             | 1972-03-17 | -        | -      | -       |
| Granada                                        | 1979-07-31 | 5,5      | -      | -       |
| Tenerife                                       | 1989-05-09 | 5,3      | III    | 0       |
| Berja, Almería                                 | 1993-12-23 | 5,0      | VI-VII | 0       |
| Lugo                                           | 1997-05-22 | 5,3      | VI     | -       |
| La puebla de Mula, Murcia                      | 1999-02-02 | 5,2      | VI     | 0       |
| Bourmedas, Argelia                             | 2003-05-21 | 6,6      | IX-X   | 0       |
| Alhucemas, Marruecos                           | 2004-02-24 | 6,3      | IX-X   | 0       |
| La Paca, Murcia                                | 2005-01-29 | 4,6      | VII    | 0       |
| Isla Cristina, Huelva                          | 2009-12-17 | 6,3      | -      | 0       |
| Albuñuelas, Granada                            | 2010-04-11 | 6,3      | -      | 0       |
| Lorca, Murcia                                  | 2011-05-11 | 5,1      | VII    | 9       |
| Mar de Alborán                                 | 2016-01-25 | 6,3      | VI     | 1       |

Fig. A.41 Sismos España (Autor)



## Otros registros históricos:

| ZONAS DE ALTO RIESGO SÍSMICO<br>(Países) | SISMOS HISTÓRICOS<br>(Año)                             | PELIGROSIDAD DE LA ZONA<br>(Muy alta - Alta - Media - Baja - Muy baja)* |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| BIRMANIA                                 | 2004                                                   | MUY ALTA                                                                |
| CHILE                                    | 1575-1647-1730-1751-1880-1868-1922-1939-1960-2010-2015 | MUY ALTA                                                                |
| EL SALVADOR                              | 1951-1968                                              | MUY ALTA                                                                |
| INDIA                                    | 1063-1737-1897-1950                                    | MUY ALTA                                                                |
| BANGLADÉS                                | 1737                                                   | MUY ALTA                                                                |
| ECUADOR                                  | 1797-1868-1906-1942-1987                               |                                                                         |
| GRECIA                                   | 365-826-856-1622                                       | MUY ALTA                                                                |
| GUATEMALA                                | 1976                                                   | ALTA                                                                    |
| INDONESIA                                | 1833-2004-2005-2012                                    | MUY ALTA                                                                |
| IRAK                                     | 847-1007                                               | ALTA                                                                    |
| IRÁN                                     | 856-893-1042-1052-1755-1780-1844                       | MUY ALTA                                                                |
| ITALIA                                   | 1117-1170-1279-1328-1582-1638-1693-1694-1783-1857      | MUY ALTA                                                                |
| ISRAEL                                   | 502-754-2004                                           | MEDIA                                                                   |
| MÉXICO                                   | 1475-1496-1542-1589-1864-1985                          | MUY ALTA                                                                |
| NEPAL                                    | 1934                                                   | MUY ALTA                                                                |
| PAKISTÁN                                 | 325-894-1737                                           | ALTA                                                                    |
| PERÚ                                     | 1555-1578-1582-1586-1687-1600-1746-1868-1946-1970-2001 | MUY ALTA                                                                |
| STO. DOMINGO                             | 1542-1551-1562                                         | ALTA                                                                    |
| SIRIA                                    | 526-844-847-1042-1138-1170-1201-1822                   | ALTA                                                                    |
| TURQUÍA                                  | 407-1268-1509-1557-1668-1754-1766-1872-1999            | MUY ALTA                                                                |

\* (Muy alta = 5,6 m/s<sup>2</sup> ; Alta = 4,0 m/s<sup>2</sup> ; Media = 2,4 m/s<sup>2</sup> ; Baja = 0,8 m/s<sup>2</sup> ; Muy baja = 0,2 m/s<sup>2</sup>)  
 Máxima aceleración del suelo (m/s<sup>2</sup>), que tiene lugar en una zona, una vez cada 500 años de media.  
 (10% de probabilidad de un terremoto de este tipo en los próximos 50 años)

Fuente: Global Seismic Hazard Program

Fig. A.42 Fechas de sismos históricos en el mundo (Autor)

| Date              | Location               | Reported Casualties |
|-------------------|------------------------|---------------------|
| 10 B.C.E.-10 C.E. | Parthian Nesā          | K+                  |
| ca. 734/111-120   | Zurung/Sistān          | n.a.                |
| 743/125           | Tang-e Sār Darra       | K                   |
| 840/225           | Ahvāz                  | K                   |
| 855/241           | Ray                    | K+                  |
| 856/242           | Dāmghān/Kūmeš          | 45,096              |
| 872/258           | Saymara-Darra Sahr     | 20,000              |
| 943/331           | Samalqān               | 5,000               |
| 958/346           | Ray-Rūyān              | K                   |
| 1008/398          | Dīnavar                | 16,000+             |
| 1008/398          | Sirāf (Tāhari)         | K                   |
| 1042/434          | Tabriz                 | 40,000              |
| 1052/444          | Bayhaq (Sabzavār)      | K                   |
| 1052/444          | Arjān                  | K                   |
| 1107/500          | Kargasar/Dīnavar       | K                   |
| 1119/513          | Qazvin                 | K                   |
| 1127/521          | Farīm                  | K                   |
| 1177/572          | Ray-Karaj-Qazvin       | K                   |
| 1209/605          | Nīšāpūr                | 10,000              |
| 1270/669          | Nīšāpūr                | 10,000              |
| 1273/671          | Tabriz                 | 250                 |
| 1301/700          | Farīm                  | K                   |
| 1304/704          | Tabriz                 | K                   |
| 1336/737          | Jīzd-Zūzan             | 20,000              |
| 1389/791          | Nīšāpūr                | K+                  |
| 1405/808          | Nīšāpūr                | 30,000              |
| 1440/844          | Kārzīn-Qīr             | 10,000              |
| 1485/890          | Šakūr-Tonekābon        | K+                  |
| 1493/898          | Nowzād                 | K+                  |
| 1497/902          | Hormoz-Bandar-e ‘Abbās | K+                  |
| 1498/903          | Jorjān (old Gorgān)    | 1,000               |
| 1593/100          | Lār                    | K                   |
| 1608/1017         | Rūdbarāt-Tāleqān       | K+                  |
| 1619/1028         | Dūghābād               | 800                 |
| 1641/1050         | Dehḡārḡān-Tabriz       | K+                  |
| 1665/1075         | Damāvand               | K                   |
| 1666/1076         | NW Ardāl               | K                   |
| 1673/1084         | Mašhad                 | 5,600               |
| 1678/1088         | Lāhijān                | K                   |
| 1678/1089         | Gonābād                | K                   |
| 1695/1106         | Esfarayen              | K+                  |
| 1721/1133         | Šebli-Tabriz           | 40,000              |
| 1780/1194         | Tabriz                 | 50,000              |
| 1808/1223         | Rešm                   | K                   |
| 1809/1224         | Āmol                   | K                   |
| 1825/1239         | Harāz                  | K                   |
| 1830/1245         | Damāvand               | K                   |
| 1838/1254         | Nošratābād             | K                   |
| 1844/1260         | Miāna-Garmirūd         | K+                  |
| 1851/1267         | Sarvelāyat             | 2,000+              |
| 1871/1288         | Qūčān                  | K                   |
| 1879/1296         | SE Bozqūš              | 2,000+              |
| 1890/1307         | Tāš                    | K+                  |
| 1893/1311         | Qūčān                  | 10,000+             |

- Continued on next page -

Fig. A.43 Terremotos históricos en Persia (M.Berberian)

- 1785, 12 de Julio - Santa Fe, Nueva Granada
- 1797, 4 de Febrero - Quito

## SIGLO XIX

- 1805, 16 de Junio - Colombia
- 1822, 19 de Noviembre - Chile
- 1826, 17 de Junio - Colombia
- 1828, 30 de Marzo - Lima
- 1831, 8 de Octubre - Tacna y Arica
- 1833, 18 de Setiembre - Tacna
- 1835, 20 de Febrero - Chile
- 1844, 18 de Octubre - Salta, Jujuy, Tucumán, Argentina
- 1845, 19 de Febrero - Colombia
- 1861, 20 de Marzo - Mendoza, Argentina
- 1868, 13 de Agosto - Sur del Perú, Norte de Chile
- 1868, 18 de Agosto - Ecuador
- 1868, 30 de Diciembre - Colombia
- 1875, 18 de Mayo - Colombia y Venezuela
- 1877, 9 de Mayo - Iquique
- 1883, 8 de Marzo - Colombia
- 1894, 27 de Octubre - Tucumán, Argentina
- 1894, 28 de Abril - Venezuela y Colombia

Fig.A.44 Terremotos en Sudamérica (E.Silgado)

## TERREMOTOS DESTRUCTIVOS EN AMERICA DEL SUR 1530-1894

## INDICE

## INTRODUCCION

## SIGLO XVI

- 1530, 10 de Setiembre - Cumaná, Venezuela
- 1575, 16 de Diciembre - Sur de Chile
- 1582, 22 de Febrero - Arequipa, Perú
- 1586, 9 de Julio - Lima y Callao
- 1587, 30 de Agosto - Quito y su Provincia
- 1594, 18 de Diciembre - Ica, Perú
- 1599, 5 de Febrero - La Grita, Venezuela

## SIGLO XVII

- 1604, 1605, 1611, 1612 - Venezuela
- 1604, 24 de Noviembre - Sur del Perú, Norte de Chile
- 1619, 14 de Febrero - Trujillo, Saña, Santa; Perú
- 1628, 26 de Junio - Quito
- 1641, 11 de Junio - Caracas y la Guaira, Venezuela
- 1644, 16 de Marzo - San Cristóbal y Pamplona, Venezuela
- 1647, 13 de Mayo - Chile
- 1650, 31 de Marzo - Cusco, Perú
- 1655, 13 de Noviembre - Lima, Perú
- 1657, 15 de Marzo - Chile
- 1664, 12 de Mayo - Ica, Perú
- 1674, 29 de Agosto - Quito
- 1687, 20 de Octubre - Lima, Perú
- 1692, 13 de Setiembre - Argentina
- 1698, 20 de Junio - Quito

## SIGLO XVIII

- 1725, 6 de Enero - Lima
- 1730, 8 de Julio - Chile
- 1746, 28 de Octubre - Lima
- 1751, 25 de Mayo - Chile
- 1755, 26 de Abril - Quito
- 1757, 22 de Febrero - Quito
- 1766, 9 de Julio - Quito (Buga, Colombia)
- 1766, 21 de Octubre - Caracas
- 1777, 26 de Enero - Lima
- 1779, 25 de Enero - Caracas
- 1784, 13 de Mayo - Arequipa

Fig.A.45 Terremotos en Sudamérica (E.Silgado)



