*LA SENSIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS
A LOS TERREMOTOS: EL
TERREMOTO DE LISBOA DE 1755*

*Doctorado en Tecnología y Modelización
en Ingeniería Civil, Minera y Ambiental*

Autor: Andrés Sanz de Ojeda

Directores: Iván Alhama Manteca

Eugenio Sanz Pérez

Cartagena (2020)

Universidad
Politécnica
de Cartagena

La sensibilidad de los acuíferos a los terremotos: El terremoto de Lisboa de 1755

Andrés Sanz de Ojeda

Directores:

Iván Alhama Manteca

Eugenio Sanz Pérez

Doctorado en Tecnología y Modelización en Ingeniería Civil,
Minera y Ambiental

Cartagena, 2020

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D. Iván Alhama Manteca y Eugenio Sanz Pérez, Directores de la Tesis doctoral “La sensibilidad de los acuíferos a los terremotos: el terremoto de Lisboa de 1755

INFORMAN:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D Andrés Sanz de Ojeda dentro del Programa de Doctorado Tecnología y Modelización en Ingeniería Civil, Minería y Ambiental, dando nuestra conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

Informe positivo sobre el plan de investigación y documento de actividades del doctorando/a emitido por el Director/ Tutor (**RAPI**).

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es Ciencias.

En Cartagena, a 21 de abril de 2020

LOS DIRECTORES DE LA TESIS

Fdo.: Iván Alhama Manteca

Fdo.: Eugenio Sanz
Pérez

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA

D ángel Faz Cano, Presidente/a de la Comisión Académica del Programa Tecnología y Modelización en Ingeniería Civil, Minería y Ambiental,

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada, “La sensibilidad de los acuíferos a los terremotos: el terremoto de Lisboa de 1755”, ha sido realizada, dentro del mencionado Programa de Doctorado, por D Andrés Sanz de Ojeda, bajo la dirección y supervisión de los Directores Iván Alhama Manteca y Eugenio Sanz Pérez.

En reunión de la Comisión Académica, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director/a de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado.

- ☐ Evaluación positiva del plan de investigación y documento de actividades por el Presidente de la Comisión Académica del programa (**RAPI**).

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias

En Cartagena, a 21 de abril de 2020

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA

ANGEL
FAZ|CANO

Firmado digitalmente por ANGEL|
FAZ|CANO
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=ANGEL|FAZ|CANO,
serialNumbe [REDACTED]
givenName=ANGEL, sn=FAZ CANO,
ou=CIUDADANOS, o=ACCV, c=ES
Fecha: 2020.04.22 10:01:12 +02'00'

Fdo: Ángel Faz Cano

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Resumen

El desarrollo de un modelo analítico teórico parece considerar al coeficiente de agotamiento como un parámetro hidrogeológico útil para estudiar la afección hidráulica de un sismo en un manantial, manifestada especialmente en el incremento de descargas persistentes y de alteración de los manantiales en general. En el mantenimiento de caudales persistentes contribuye tanto la inercia del acuífero en su vaciado como el incremento del flujo debido a la presión de poro del terremoto en la parte inferior del acuífero. La numerosa información sobre las afecciones hidrogeológicas del terremoto histórico de Lisboa de 1755 ($M \in [8, 9]$) y su relación con el conocimiento actual de la geología e hidrogeología de Portugal y España y la estadística de manantiales de este último país, ha permitido identificar los factores que más han influido en la sensibilidad hidráulica de los acuíferos a este terremoto: fallas regionales importantes (especialmente las asociadas a sistemas hidrotermales), contactos entre grandes unidades geológicas, litología de rocas graníticas y acuíferos con coeficientes de agotamiento alto. En este terremoto se observa una única respuesta de incremento generalizado de la descarga postsísmica que abarca todo el cuadrante SO de la Península Ibérica y una duración de uno a 24 meses aproximadamente. La descarga persistente estuvo concentrada cerca de las fallas importantes de dirección NE-SO del SO de Portugal conectadas con la falla de desgarre Azores-Gibraltar. De la distribución geográfica de los fenómenos hidrológicos, se observa que en el campo cercano e intermedio de la zona fuente del terremoto coexisten incrementos persistentes en el caudal de manantiales en rocas duras con descargas difusas persistentes, licuefacción y ascensos del nivel del agua de los pozos por consolidación en formaciones geológicas superficiales. Los diferentes colores en la turbidez de los manantiales se explican muy bien por las formaciones geológicas superficiales.

Abstract

The development of a theoretical analytical model leads us to consider the recession coefficient as a useful hydrological parameter for studying the hydraulic impacts of an earthquake on spring flow in terms of the increase of persistent discharges and the overall alteration of springs. Both the inertia of the aquifer emptying and the increased pore pressure in the lower part of the aquifer caused by the earthquake contribute to maintaining the discharge of persistent springs. Abundant information on the hydrological phenomena induced or modified by the 1755 Lisbon earthquake ($M \in [8, 9]$) and its relationship with present-day knowledge of the geology and hydrogeology of Portugal and Spain, as well as Spanish spring statistics, have allowed us to identify the factors that most influence the hydraulic sensitivity of aquifers to that earthquake: regional faults, geological boundaries between large geological units, the granite lithology, and aquifers with high recession coefficients. We observe an overall single response, which was an increase in postseismic spring discharges over the entire of the SW quadrant of the Iberian Peninsula (1–24 months). The persisting discharges were concentrated close to the major NE-SW directional faults located in SW Portugal that are linked to the Azores-Gibraltar strike-slip fault. In terms of the geographical distribution of the hydrological phenomena, we observe that in the near and intermediate field of the earthquake source, there were persistent increases in spring flow in hard rocks occurring alongside persistent diffuse discharges, liquefaction, and rising water levels in wells due to consolidation of superficial geological formations.

Agradecimientos

Esta Tesis Doctoral ha podido salir adelante gracias a la dedicación y disponibilidad de los dos directores, D. Iván Alhama Manteca (Universidad Politécnica de Cartagena) y mi padre D. Eugenio Santos Sanz Pérez (Universidad Politécnica de Madrid).

Agradezco sinceramente el apoyo de mi madre, Pedro María Alcover Garau, Antonio Merlos Galián, Pablo Emilio Casas Martínez, Manuel Estrems Amestoy, Benito Calahorra Moreno de la Santa, Alejandro Muñoz Vizcaíno, Raúl Ortega, Oriol Cervera Serrano, Álvaro Medina, Willy de Ojeda Ruíz de Luna, etc.

Esta tesis se ha desarrollado en el contexto del proyecto de I+D+i «NEWFLOW: Nuevos modelos de flujo multifase en medios porosos: Procesos fundamentales y aplicación a problemas de gran escala en hidrología» (2015) y ha propiciado la publicación de un artículo científico en la revista *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (Sanz de Ojeda et al., 2019).

En Madrid, a diecisiete de mayo de 2020,

Andrés Sanz de Ojeda

Índice general

1. Introducción y objetivos	1
2. Metodología	5
2.1. Estructura de la tesis doctoral	5
2.2. Representatividad hidrológica de las encuestas	5
2.3. Estudio de sensibilidad al coeficiente de agotamiento, a la litología y a las grandes fracturas geológicas	10
3. Efectos hidrogeológicos inducidos por los terremotos	13
3.1. Introducción	13
3.2. Licuefacción de suelos	13
3.3. Volcanes de fango	15
3.4. Géiseres	16
3.5. Aparición o desaparición de manantiales e incremento de las descargas de arroyos y manantiales	18
3.6. Variación del nivel piezométrico	20
3.7. Cambios en la composición del agua y de la temperatura	23
3.8. Precursores hidrológicos	23
4. El terremoto de Lisboa	25
4.1. Introducción	25
4.2. Causas geológicas del terremoto	28
4.3. Efectos del terremoto en Portugal, España y norte de África	28
5. Repaso de los conceptos básicos de hidráulica subterránea y definición del coeficiente de agotamiento de un acuífero	31
5.1. Tipos de acuíferos	31
5.2. Ley de Darcy	32
5.3. Parámetros fundamentales de un acuífero libre	33
5.4. Definición general del coeficiente de agotamiento de un acuífero	35
5.5. Coeficiente de agotamiento de un acuífero libre sin recarga	36
5.6. Coeficiente de agotamiento de un acuífero libre con recarga	38
5.7. Análisis dimensional del coeficiente de agotamiento	41

6. Resultados: los efectos hidrogeológicos inducidos por el terremoto de Lisboa de 1755 en España y Portugal	43
6.1. Geología y efectos hidrológicos	43
6.2. Licuefacción y volcanes de fango	43
6.3. Alteración de manantiales y corrientes de agua	49
6.4. Relación con el coeficiente de agotamiento	50
6.5. Efectos hidrológicos persistentes	55
6.6. Color y composición	56
6.7. Variaciones del nivel de pozos	56
7. Discusión: los efectos hidrogeológicos inducidos por el terremoto de Lisboa de 1755 en España y Portugal	59
7.1. Introducción	59
7.2. El impacto sísmico en la licuefacción de los suelos	60
7.3. La afección de manantiales y corrientes de agua: La sensibilidad de las fallas	60
7.4. La afección de manantiales y corrientes de agua: La sensibilidad de la litología	61
7.5. Color y composición del agua	64
7.6. Variaciones en el nivel de los pozos	65
7.7. Las alteraciones hidrogeológicas y el mecanismo focal del terremoto de Lisboa	66
8. Discusión: el coeficiente de agotamiento como parámetro hidráulico de sensibilidad de los acuíferos a los sismos	69
8.1. Introducción y objetivos del capítulo	69
8.2. Influencia de la recarga, la extracción por bombeo y la acción sísmica en la curva de descarga de un acuífero	70
8.3. Relación conceptual entre el coeficiente de agotamiento y la afección hidráulica de un acuífero ante la acción sísmica	73
8.4. Influencia de la longitud característica del acuífero	74
8.5. Relación entre el confinamiento del acuífero y su afección sísmica	75
8.6. Variación del hidrograma del manantial por efecto del sismo o cálculo del volumen de agua desalojado por el sismo	76
8.7. Discusión sobre el modelo analítico teórico desarrollado	78
9. Conclusiones	83
10. Futuras líneas de investigación	85
10.1. Comprobación con otros sismos de la validez del coeficiente de agotamiento para conocer la sensibilidad de los acuíferos a los terremotos	85
10.2. Análisis de los diferentes tipos de curvas de agotamiento de un manantial o pozo tras una acción sísmica	85

10.3. De cómo la hidráulica de manantiales puede explicar los mecanismos de incremento de descargas en los manantiales	86
10.4. De cómo la hidráulica de manantiales puede explicar el origen de una parte de los yacimientos hidrotermales	86
10.5. Predicción del comportamiento de los caudales ante la acción sísmica	87
10.6. Aplicación de un modelo hidrogeomecánico al terremoto de Lisboa de 1755	88
10.7. Estudio de otros terremotos históricos en España	88
Bibliografía	94
A. Inventario e interpretación de las anomalías hidrogeológicas del terremoto de Lisboa de 1755	95
B. Identificación aproximada de la geología de los puntos de agua alterados por el terremoto de Lisboa de 1755 y algunos ejemplos de localización geológica	119
B.1. Identificación aproximada de la geología de los puntos de agua alterados por el terremoto de Lisboa de 1755	119
B.2. Ejemplos de localización geológica	133
C. Proceso de los datos de número de puntos de agua afectados en España por el terremoto de Lisboa de 1755	137
D. Recopilación de alteraciones hidrogeológicas de algunos sismos presentados en España hasta 1984	139

Índice de figuras

2.1. Calidad de las fuentes de información en Portugal del terremoto de Lisboa de 1775.	7
2.2. Municipios de España y Portugal en la actualidad.	8
3.1. Distribución de los diferentes efectos hidrológicos provocados por los terremotos en función de la magnitud y de la distancia al epicentro. .	14
3.2. Pequeños volcanes de licuefacción.	15
3.3. Efectos de vuelco en edificios debidos a la licuefacción (terremoto de Niigata, 1964)	16
3.4. Volcán de fango en la isla de Java (Indonesia).	17
3.5. Géiser en el Parque Nacional de Yellowstone (Estados Unidos)	17
3.6. Hidrogramas postsísmicos de los ríos San Lorenzo y Mattole	19
3.7. Cambios en la presión de poro y el nivel de agua después del terremoto de Islandia (2000).	21
4.1. Devastación de Lisboa.	25
4.2. Evolución temporal del tsunami asociado al terremoto de Lisboa de 1755.	26
4.3. Mapa tectónico de la zona de la falla de Azores-Gibraltar-Túnez y mapa de isosistas del terremoto de uno de noviembre de 1755.	27
5.1. Experimento de Darcy.	32
5.2. Parámetros geométricos básicos de un acuífero libre.	35
5.3. Representación de la descarga de un acuífero en recesión.	36
5.4. Esquema de la descarga de un acuífero libre sin recarga.	37
5.5. Representación del flujo en un acuífero libre y en un volumen diferencial del mismo.	39
5.6. Acuífero libre con descarga a nivel constante.	40
6.1. Mapa de unidades geotectónicas de la Península Ibérica.	44
6.2. Mapa litológico esquemático de la Península Ibérica.	45
6.3. Mapa de coeficientes de agotamiento de España.	46
6.4. Distribución del incremento de las descargas de agua subterránea a través de manantiales o cursos de agua permanentes. Distribución de la licuefacción y volcanes de fango.	47

6.5.	Áreas con manantiales y arroyos persistentes.	48
6.6.	Clasificación de los puntos alterados en función de su unidad hidro- geológica y de la intensidad sísmica que los produjo.	52
6.7.	Acuífero confinado en una falla conectada con la fuente sísmica. . . .	54
6.8.	Distribución de las variaciones en el nivel de agua y de la turbidez de los pozos.	57
7.1.	Diagrama que muestra el dominio de las fallas en función de la pro- fundidad y de la litología.	63
7.2.	Explicación de las alteraciones hidrológicas del terremoto de Lisboa de 1755 considerando como fuente sismogénica la falla de Azores- Gibraltar y un modelo cinemático de mecanismo focal correspondiente a una falla de desgarre.	67
8.1.	Pasos para el estudio de la influencia de un sismo en un acuífero. . . .	70
8.2.	Modelo conceptual de un acuífero libre bajo el efecto de un sismo. . .	71
8.3.	Influencia de la longitud de las fallas receptoras en el coeficiente de agotamiento de los manantiales drenados por las mismas y en su sensibilidad a los terremotos.	75
8.4.	Hidrograma en escala natural y semilogarítmica de un manantial en régimen no influenciado que sufre de forma instantánea el efecto de un bombeo profundo B por la acción de un sismo.	77
8.5.	Distintas reacciones de un acuífero libre ante un sismo.	79
10.1.	Diagrama de bloques un sistema acuífero genérico sometido a la ac- ción de un sismo en el que una ley universal de descarga predice su hidrograma.	87
B.1.	Geología de Jerez de los Caballeros.	134
B.2.	Geología de Paymogo.	135
B.3.	Geología de Puebla de Guzmán.	136

Índice de tablas

6.1. Clasificación según litologías de los manantiales de España y Portugal afectados por el terremoto de Lisboa de 1755 e incidencia hidrológica del mismo en cada grupo litológico.	50
6.2. Distribución de los manantiales alterados por el terremoto de Lisboa en España según coeficientes de agotamiento.	51
7.1. Porosidad media de los distintos grupos litológicos.	63

Nomenclatura

A [L^2]	Área de paso del fluido.
A	Índice de la Tabla 6.1.
AHU	Area of the Hydrogeological Unit, área de la unidad hidrogeológica.
AWP	Activated Water Points, número de puntos de agua activados en una unidad hidrogeológica e intervalo de intensidad sísmica determinados.
α [T^{-1}]	Coficiente de agotamiento.
B [L^3T^{-1}]	Bombeo profundo de abajo a arriba por efecto de un sismo.
BTF	Bajo-Tajo Fault, falla del Bajo-Tajo.
b [L]	Espesor saturado de un acuífero.
D [L^2T^{-1}]	Difusividad hidráulica de un medio poroso.
Δh [L]	Diferencia de potencial hidráulico (alturas de presión).
E	Este.
EQ	Earthquake, terremoto.
HU	Hydrogeological Unit, unidad hidrogeológica.
$h(x)$ [L]	Altura de la lámina libre de un acuífero en el punto x [L].
i	Gradiente hidráulico.
IGME	Instituto Geológico y Minero de España.
k [LT^{-1}]	Conductividad hidráulica o permeabilidad de un medio.
l [L]	Longitud característica de un acuífero.
l [L]	Longitud de falla.
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia (Portugal).
M	Magnitud del terremoto.
m_e [%]	Porosidad eficaz de un medio poroso.
MF	Messejana Fault, falla de Messejana.
MMI	Modified Mercalli Intensity, intensidad de Mercalli modificada.
MMI	Intensidad media del terremoto de Lisboa de 1755 en España.
N	Norte.
NE	Noreste.
NF	Nazaré Fault, falla de Nazaré.
NGDC	NOAA's National Geophysical Data Center.
NI [km^{-2}]	Normalized incidence, incidencia normalizada.
NI [%]	Normalized incidence, incidencia normalizada.

NNI [%]	Nonnormalized incidence, incidencia porcentual.
∇h	Gradiente de alturas de presión.
O	Oeste.
p [L]	Profundidad de un acuífero.
Q [L ³]	Caudal.
R [L ³ T ⁻¹]	Caudal de recarga de origen meteórico.
r [L ³ T ⁻¹ L ⁻¹]	Caudal de recarga de origen meteórico por unidad de longitud.
r [L]	Radio de terreno.
S	Coefficiente de almacenamiento de un acuífero.
S [L ²]	Sección.
S	Sur.
S_s [L ⁻¹]	Coefficiente de almacenamiento específico de un medio poroso.
SO	Suroeste.
T [L ² T ⁻¹]	Transmisividad de un medio poroso.
V_h [L ³]	Volumen hidrodinámico de un acuífero.
V_s [L ³]	Exceso de volumen de agua descargado por efecto de un sismo.
v_d [LT ⁻¹]	Velocidad de Darcy.
$z_0(x)$ [L]	Fondo de un acuífero en el punto x [L].

Capítulo 1

Introducción y objetivos

Son conocidos los efectos hidrogeológicos de distinto rango inducidos por terremotos lejanos y que incluyen licuefacción de suelos, volcanes de fango, géiseres, aparición y desaparición de manantiales, incremento de la descarga en manantiales y arroyos, cambios en las propiedades físicas y químicas del agua subterránea y de la presión de la misma (Montgomery y Manga, 2003; Wang y Manga, 2010a,b).

Las consecuencias hidrogeológicas más frecuentes de los terremotos son el aumento de la descarga de los manantiales y ríos y la subida del nivel freático de los acuíferos. Los efectos de los terremotos en las aguas subterráneas se suelen dividir en oscilaciones transitorias, que incluyen subidas o bajadas bruscas (Cooper Jr. et al., 1965), y un aumento gradual sostenido, que dura varios días después del terremoto (Roeloffs, 1998; Yan et al., 2014; Petitta et al., 2018). En función de la magnitud del sismo, así como de la longitud y del tipo de la falla, estas variaciones hidrológicas debidas a los sismos pueden afectar a una mayor o menor área. Los incrementos de las descargas persistentes postsísmicas constituyen una interesante manifestación que puede durar días, meses y hasta años. Estos fenómenos son el resultado de la interacción entre los procesos hidrogeológicos y las propiedades mecánicas y características tectónicas de la corteza terrestre ante una deformación de origen sísmico. En esta línea, los trabajos de Muir-Wood y King (1993) fueron pioneros en describir las respuestas hidrológicas al comportamiento cinemático de los diferentes tipos de fallas.

En el origen último de estos fenómenos se proponen diversos mecanismos: cambio de la permeabilidad por aumento de la presión de poro debido a la tensión estática cosísmica (Wakita, 1975; Jónsson et al., 2003), aumento de la permeabilidad debido a las tensiones dinámicas generadas por el terremoto, lo que permite un flujo más rápido por la limpieza de fracturas, incrementándose la descarga (Briggs, 1991; Rojstaczer et al., 1995; Sato et al., 2000; Wang et al., 2004a). También pueden influir la ruptura de barreras o precintos hidráulicos (Brodsky et al., 2003; Wang et al., 2004b), la liberación de exceso de agua después del terremoto por la consolidación o incluso licuefacción de formaciones geológicas superficiales no consolidadas (Manga, 2001; Manga et al., 2003; Montgomery y Manga, 2003).

La explicación hidráulica de los efectos de un sismo en un acuífero se basa en la facilidad o sensibilidad del mismo al incremento del potencial hidráulico por efecto del terremoto, y que tiene su manifestación en el ascenso del nivel del agua subterránea, con la posibilidad de que llegue a aflorar a la superficie en forma de nuevos manantiales o incrementando el caudal de manantiales y corrientes de agua ya existentes. Esto último está directamente relacionado con ciertos parámetros hidrogeológicos del acuífero, entre los que destacamos la difusividad y el coeficiente de almacenamiento, aunque también influyen la profundidad del nivel de agua subterránea antes del terremoto, la extensión y características geométricas y mecánicas del acuífero, así como su grado de aislamiento. Como se verá en esta tesis doctoral, gran parte de estos parámetros están reunidos en el denominado coeficiente de agotamiento. Esta tesis tiene un carácter eminentemente conceptual y en ella se exploran los factores que más han influido en las alteraciones hidrológicas del terremoto de Lisboa de 1755. Para ello, se propone una metodología que, aunque se acomoda a las características particulares de este terremoto, podría ser utilizada en otros casos similares. Existen algunos terremotos históricos como el de Lisboa que, aunque conservan una relativa buena documentación de los daños y de los efectos hidrológicos, no se conocen con precisión aspectos cuantitativos de los mismos debido a la época en que ocurrieron, pero que pueden ser aprovechables para relacionarlos con el actual conocimiento hidrogeológico del territorio.

Como se sabe, un terremoto causa cambios en los esfuerzos estáticos y dinámicos en la corteza, que disminuyen de manera diferente con la distancia. La investigación de los efectos hidrogeológicos relacionados con macrosismos, como el terremoto de Lisboa, por ejemplo, constituye una oportunidad de estudiar la respuesta en el espacio y en el tiempo de la hidrogeología de un extenso territorio. En España, donde el riesgo sísmico es bajo, aumenta el interés por analizar y conocer el comportamiento y los efectos de terremotos de gran magnitud como este, con periodos de recurrencia superiores a 200 años, que no se han vuelto a percibir desde 1755. Aparte del análisis de los daños en las edificaciones o de la distribución de la intensidad con la distancia para el cálculo de la peligrosidad sísmica (Martínez Solares y López Arroyo, 2004), hay otros aspectos que también adquieren interés, como los efectos en el medio ambiente. En este sentido, se reseñan los trabajos de Silva et al. (2017) o los de deslizamientos de ladera (Sanz Pérez, 1997; Vaz y Zêzere, 2016; Leynaud et al., 2017). Sin embargo, en ellos, los efectos hidrogeológicos solo se habían tratado de manera descriptiva (Martínez Solares, 2001).

En otro orden de cosas y dentro del tema del agua subterránea, creemos que la experiencia de este terremoto es muy interesante porque se enmarca en una situación de régimen natural de los sistemas hidrológicos e hidrogeológicos del siglo XVIII. La situación actual es muy distinta, ya que hay 1400 embalses de regulación en los ríos y amplias zonas de acuíferos alterados por la explotación (en ocasiones, sobreexplotación) del agua subterránea, donde consecuentemente el nivel freático está bastante profundo. El artesianismo en muchos acuíferos ha desaparecido y ha cambiado su difusividad, tanto en los libres como en los confinados. A pesar de

ello, todavía hay un 5 % de los abastecimientos de España que se hacen con pozos artesianos (Sanz Pérez, 1995).

Los objetivos que persigue esta tesis doctoral son los siguientes:

1. Repaso de los parámetros hidrogeológicos que más influyen en la afección hidrológica de los terremotos (capítulos 3, 4 y 5) y desarrollo de una teoría en la que se propone al coeficiente de agotamiento como parámetro principal de sensibilidad de los incrementos de descargas persistentes y de alteración de los manantiales en general ante las acciones sísmicas (capítulo 8).
2. Descripción y análisis de los fenómenos hidrogeológicos inducidos por el terremoto de Lisboa de 1755, explorando los factores geológicos e hidrogeológicos que más han podido influir en las alteraciones hidrogeológicas, entre los que destacamos: fracturas regionales, litologías, contactos entre unidades geológicas importantes y coeficientes de agotamiento de los acuíferos (capítulos 6 y 7).

Los resultados de esta investigación han sido publicados sintéticamente en la revista *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (Sanz de Ojeda et al., 2019).

Capítulo 2

Metodología

2.1. Estructura de la tesis doctoral

Antes de entrar en el cuerpo principal de la tesis doctoral (capítulos 6, 7 y 8), se incluyen primeramente unos capítulos introductorios que explican los tipos de alteraciones hidrogeológicas originadas por los terremotos (capítulo 3), por un lado, y las principales características del terremoto de Lisboa de 1755 (capítulo 4), por otro. Se incluyen después unos fundamentos de hidrogeología (capítulo 5), donde se explican los principales parámetros hidrogeológicos relacionados con los acuíferos, especialmente la difusividad y el coeficiente de agotamiento.

A continuación, se explican resumidamente los resultados obtenidos en el análisis de las fuentes de información y datos que sustentan esta investigación (capítulo 6). Asimismo, se discute acerca de las causas de los efectos hidrogeológicos inducidos por el terremoto de Lisboa de 1755 en España y Portugal (capítulo 7). Tras ello, se expone la parte más original y conceptual de esta tesis. Se trata de la discusión acerca del coeficiente de agotamiento como parámetro hidráulico de sensibilidad de los acuíferos a los sismos (capítulo 8). Se incluye el fundamento físico de esta teoría y se hacen otras consideraciones acerca de las características hidráulicas de los acuíferos y su relación con los sismos.

Finalmente, se recogen las conclusiones alcanzadas en la tesis (capítulo 9) y se exponen algunas líneas futuras de investigación que podrían desarrollar este trabajo (capítulo 10).

2.2. Representatividad hidrológica de las encuestas

El terremoto de Lisboa de 1755 es uno de los terremotos históricos mejor documentados gracias a las encuestas realizadas en España y en Portugal. En España, se parte de la encuesta promovida por el Reino días después del terremoto y conservada en el Archivo Histórico Nacional y en la Real Academia de la Historia, recogida en

Martínez Solares (2001), de donde se obtiene información de 1273 localidades repartidas por todo el territorio nacional, incluyendo las capitales de provincia y pueblos más importantes de España (Martínez Solares, 2001). De las ocho preguntas del cuestionario, una de ellas se refería a: «¿Qué movimientos se observaron en los suelos, paredes, edificios, fuentes y ríos?». Contestaron la encuesta con esta información hidrológica 272 localidades (anexo A).

En Portugal, se distribuyó un cuestionario con trece preguntas por todas las parroquias del país (Arquivo Ministério do Reino, 1756), de las que dos de ellas se referían a los aspectos geomorfológicos e hidrológicos inducidos por el terremoto. Desafortunadamente, en la zona norte y sur del país las respuestas se perdieron, siendo la zona meridional muy afectada por el sismo (Figura 2.1). Pereira de Sousa (1932) hizo un importante trabajo de sistematización de datos relativos a las partes sur y central del país utilizando las respuestas a los cuestionarios (Arquivo Ministério do Reino, 1756) cuando estaban disponibles, así como la información adicional recogida en otros documentos históricos, como el cuestionario enviado el 18 de enero de 1758 a todas las parroquias portuguesas solicitando información de toda índole, y en el que se incluían preguntas sobre el terremoto de 1755 (Pereira de Sousa, 1932). El resultado es que en Portugal se ha conservado la información de 129 localidades donde hubo alteraciones hidrológicas, concentrándose la información en el centro del país (Figura 2.1), por la razón que se ha comentado (pérdida de documentación).

En Marruecos también afectó el sismo de manera notable pero apenas se tienen datos (Abdelaziz, 2005; Levret, 1991). En Francia, Alemania y Bélgica se tienen noticias de la alteración en manantiales termales y en Inglaterra, Finlandia y Estados Unidos, de ligeras alteraciones hidrológicas (Reid, 1914) (Figura 4.3).

Las encuestas cubren la mayor parte de la Península Ibérica (596,740 km²) y son muy representativas, ya que la distribución de la población rural en la Península Ibérica en el siglo XVIII (también actualmente) estaba muy diseminada y se repartía de manera uniforme por todo el territorio. Según estas encuestas, las alteraciones hidrogeológicas se pueden ubicar a nivel municipal, aunque en bastantes casos hayamos localizado los puntos de agua concretos. Esta agrupación de la población rural estaba (y está) más diseminada en la zona norte de España y Portugal, respecto de la zona sur (Figura 2.2). La separación media entre los núcleos de población en España, por ejemplo, es del orden de 8 km (Sanz Pérez, 1995).

Estas encuestas de ámbito nacional son las primeras que se hicieron en países europeos y, aunque son muy meritorias para la época y tienen un carácter científico notable, no dejan asimismo de tener un carácter eminentemente cualitativo y semi-cuantitativo. Por otra parte, presentan cierta dificultad de interpretación debido a la grafía, cambios en el lenguaje, variaciones toponímicas, etc. Sin embargo, a pesar de la antigüedad, las encuestas son bastante amplias y ofrecen buenas garantías y se ha podido hacer un análisis cuantitativo al relacionarla con la actual información geológica e hidrogeológica del territorio.

En España, las 1273 localidades que contestaron la encuesta representan el 4,4 % de los núcleos de población del siglo XVIII. Y las que aportan información

Figura 2.1: Calidad de las fuentes de información en Portugal del terremoto de Lisboa de 1775 (Vaz y Zêzere, 2016).

(a) Términos municipales de España en la actualidad. Atlas Nacional de España (2015). Instituto Geográfico Nacional.

(b) Términos municipales de Portugal en la actualidad. Carta Administrativa Oficial de Portugal (2017). Direção-Geral do Território. <http://secad.unex.es/conocimiento/index.php?article/AA-00266/0/Mapa-de-municipios-freguesas-de-Portugal-continental.html>.

Figura 2.2: Municipios de España y Portugal en la actualidad.

hidrológica suponen el 0,9 %. Por otro lado, se ha estimado que en España peninsular hay unos 17000 manantiales con caudal superior a 0,5 l/s (y 1000000 de más de 0,2 l/s) (Sanz Pérez, 1996, 2001), de los cuales los manantiales alterados por el sismo suponen como máximo el 1,6 %. Si se asume que las localidades encuestadas que no reportaron información hidrológica fue porque no hubo en ellas afecciones (cero impacto hidrológico), entonces la muestra representa el 7,4 %.

Los pozos informados en la encuesta serían, como los de la época, poco profundos, con brocal y en su mayor parte con diámetros entre 0,5 y 1 m, aunque había también norias más grandes. La mayoría de los pozos se situaría en zonas de alteración o formaciones superficiales del Cuaternario fácilmente excavables, pero no en roca. Estarían situados principalmente dentro del casco urbano, para usos domésticos, o en campo, para su uso en regadío. Imaginamos que el nivel de la lámina de agua de los pozos no sería demasiado profundo salvo excepciones, menos de 10 m en la mayoría de los casos. Los pozos tenían, por lo general, menos de 20 m de profundidad. Estos pozos pueden considerarse una muestra de características homogéneas para todo el país y muy representativa de los efectos superficiales de las ondas del sismo en los acuíferos someros.

En España, las 272 localidades con alteraciones hidrológicas se pueden clasificar en: 2 volcanes de fango, 13 puntos de licuefacción, 64 de pozos y 234 de manantiales y arroyos (dentro de estos últimos hay también puntos con información de pozos). Exclusivamente de manantiales y arroyos alterados son 258 localidades. Según la encuesta, el terremoto de Lisboa produjo en al menos 50 localidades españolas la aparición de nuevos manantiales y arroyos persistentes que no se conocían, de los cuales se informa de la duración (mínima) de su permanencia en unos 30 lugares. De las 64 localidades con referencias a pozos, 33 tienen datos semicuantitativos de variación de niveles. Hay también 91 contestaciones de localidades donde hubo turbidez y cambio en la composición del agua de las fuentes o manantiales y en algún pozo, de los cuales 27 contestan sobre su duración. Solo hay 5 casos con información sobre variaciones en la temperatura del agua.

Las 129 localidades con respuesta a las encuestas que se han conservado en Portugal incluyen puntos de agua subterránea o superficial en conexión con acuíferos que sufrieron alteraciones y que son superiores en número al de localidades, debido a que en un mismo término municipal pudo haber varios puntos de agua alterados. Se clasifican así: 32 localidades con fenómenos de licuefacción (a veces se cuentan hasta 50 puntos de licuefacción en una sola localidad). En 6 sitios debió ser muy intensa pues las descripciones, aunque confusas, pudieran tratarse de volcanes de fango en algún caso. En 10 localidades se indican oscilaciones del nivel de pozos. En 54 localidades se reseñan alteraciones en fuentes y arroyos durante el día del terremoto o durante los días siguientes, de los cuales en 23 se indica si aumentó y/o descendió el caudal; en el resto solo se dice que los manantiales o arroyos se perturbaron sin ningún tipo de descripción. En 33 localidades se citan alteraciones de turbidez en fuentes y arroyos. El terremoto de Lisboa originó en 65 sitios manantiales y arroyos persistentes, o secados también de larga duración. De estos, en 31 puntos de agua

hubo incrementos persistentes en el caudal de manantiales y arroyos, indicándose en 30 de ellos su duración mínima en función de la fecha de cumplimentación de la encuesta: días, semanas o meses para la encuesta de 1755 y hasta algo más de dos años por lo menos para la encuesta de 1758. Aparecieron 19 nuevos manantiales persistentes y arroyos, uno termal y otro con SH_2 , y en 10 de ellos se indica su duración mínima. También se indica el secado persistente de 15 manantiales y su duración hasta su recuperación (días, semanas, meses o más de dos años).

En Marruecos solo hay una breve información de alteraciones hidrogeológicas en 4 localidades (Abdelaziz, 2005). En Francia se citan variaciones de caudal y temperatura en seis manantiales termales con uso en balnearios. En Bélgica aumentó la temperatura de un manantial termal de manera persistente. En Alemania surgió un nuevo manantial termal persistente en Camstadt y hubo alteraciones en otros dos manantiales termales. En el sur de Inglaterra se alteraron y enturbiaron las fuentes de al menos tres localidades. Asimismo, se observaron oscilaciones en el nivel de agua en Finlandia y Estados Unidos de América (Reid, 1914).

2.3. Estudio de sensibilidad al coeficiente de agotamiento, a la litología y a las grandes fracturas geológicas

Considerando los pozos como un caso aparte ya que corresponden a acuíferos superficiales, nos hemos centrado en el estudio de los manantiales y arroyos. A continuación, se explicarán los pasos seguidos en el estudio.

En primer lugar, todos los manantiales y arroyos afectados por el terremoto, ya estén próximos o lejanos a la falla fuente del terremoto, los hemos representado sobre los mapas litológicos, hidrogeológicos, geológicos, tectónico y de fallas activas de España y Portugal (Figuras 6.2 y 6.1), en los que aparecen las principales características geológicas del territorio que, en principio, podrían tener relación con el comportamiento sismológico del agua subterránea. Esta representación se ha hecho tras un análisis de la geología de cada punto de agua (anexos A y B). Pensamos que la litología, al estar relacionada con la porosidad y la permeabilidad, pudiera ofrecer una primera aproximación a los parámetros hidráulicos de sensibilidad. Concretamente, se han utilizado los siguientes mapas (anexo B):

- Mapa Geológico de España a escala 1:50000 (Instituto Geológico y Minero de España, 2003b).
- Mapa Geológico de España a escala 1:200000 (Instituto Geológico y Minero de España, 2003a).
- Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50.000 (Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2017).

- Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:200.000 (Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2018).
- Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:1000000 (Instituto Geológico y Minero de España, 2000).
- Carta Hidrogeológica de Portugal, na escala de 1:1000000 (Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, 1970)
- Mapa Tectónico de España (y Portugal) a escala de 1:2000000 (Instituto Geológico y Minero de España, 2004).
- Mapa Tectónico de España (Instituto Geográfico Nacional, 2016).
- Mapa de lineamientos observados en las imágenes Landsat y su relación con las principales estructuras geológicas de la Península Ibérica a escala 1:000000 (Antón Pacheco, 1979).

Asimismo, se ha utilizado el Mapa Litológico de España a escala 1:400000 (Riva Arderiu, 1969), y que ha sido sintetizado en nueve grupos de semejante comportamiento hidrogeológico (Sanz Pérez, 1996). Estos grupos no han podido ser diferenciados en Portugal dada la dificultad de separar las pizarras/esquistos de areniscas y cuarcitas, por lo que han sido agrupados en un solo grupo de «rocas metamórficas» y en «otras rocas». Aunque en la Figura 6.2 se representen nueve grupos, el análisis estadístico (Tabla 6.1) se refiere únicamente a seis. Los puntos de agua de Portugal se han clasificado según la litología obtenida en Pereira de Sousa (1932) y en los mapas geológicos 1:25000 y 1:50000 de los Servicios Geológicos de Portugal, ya citados. Complementariamente, cada manantial se ha estudiado en relación a su geología e hidrogeología del acuífero que drena. Para ello, aparte de consultar referencias bibliográficas de cada uno de ellos, si es que las había, se ha consultado el inventario de puntos de agua del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)¹ y las hojas geológicas 1:50000 de la serie antigua en España. Un 20 % de los manantiales de España se han visitado en el campo. En Portugal, se ha utilizado el Mapa Hidrogeológico Nacional 1:10000000 (Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, 1970) y la base de datos de recursos hidrogeológicos del Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)². La bibliografía es muy extensa y se omite en este trabajo.

En segundo lugar, para cada punto de agua se ha asignado el tipo de litología donde se localiza y la falla o contacto geológico importante más próximo. Se han considerado como contactos geológicos los de las grandes unidades geológicas de España (Instituto Geológico y Minero de España, 2004; Instituto Geográfico Nacional, 2016). Asimismo, se han considerado las fracturas de ámbito nacional o regional y,

¹<http://info.igme.es/catalogo/resource.aspx?portal=1&catalog=3&ctt=1&lang=spa&dlang=eng&llt=dropdown&master=infoigme&shdt=false&shfo=false&resource=38>

²http://geoportal.lneg.pt/index.php?option=com_content&id=70&lg=pt

dentro de estas, las que afectan también a los plutones graníticos y a los sedimentos miocenos de la Cuenca del Duero. Esta diferenciación no es arbitraria, sino que ha sido observada como la más frecuente al representar los puntos sobre el mapa geológico. Lógicamente, todo manantial drena un acuífero de litología o litologías determinadas, pero en la clasificación hemos dado preferencia a su relación con la existencia de alguna falla o contacto geológico importante reflejada en los citados mapas. Sólo aquellos manantiales o arroyos que no estaban directamente localizados sobre fallas y contactos geológicos importantes se han clasificado según su litología. Para conocer la sensibilidad de las diferentes rocas a la alteración hidrogeológica de los terremotos, se ha elaborado un índice (índice *A* de la Tabla 6.1), que se define como la relación del porcentaje del número de manantiales alterados por el terremoto respecto al porcentaje total de manantiales de una litología determinada para una región determinada. En este caso ha podido realizarse porque se conocía la clasificación del número de manantiales según la litología en la región de España (Sanz Pérez, 1996), y que suponemos representativa de toda la Península Ibérica.

En tercer lugar, se ha llevado a cabo un análisis de la distribución geográfica de las diferentes clases de respuesta hidrológica al terremoto de Lisboa de 1755, relacionándolas a veces con la más o menos proximidad a la zona SO de la Península Ibérica donde se piensa está la falla fuente del terremoto. En sentido riguroso, no es posible hacer una relación con la distancia ya que, como se ha dicho antes, un terremoto de esta magnitud presupone una longitud de rotura de falla de entre 200 y 1000 km, por lo que la mayoría de las observaciones hidrogeológicas se encuentran dentro de la distancia de la longitud de la falla fuente del terremoto.

Finalmente, se ha desarrollado una teoría en la que se propone al coeficiente de agotamiento como el principal parámetro hidráulico de sensibilidad a los sismos de los incrementos de descargas persistentes y de alteración de los manantiales, en general. Esta teoría se ha aplicado para este terremoto en España relacionando la distribución de las alteraciones hidrológicas con el mapa de coeficientes de agotamiento de los acuíferos (Ministerio de Medio Ambiente, 2000; Sanz Pérez y Recio, 2011) y con el coeficiente de agotamiento de las fracturas (Figura 6.3). En Portugal no ha podido hacerse porque dicho mapa no existe. Asimismo, en esta teoría se explica la elevación del nivel freático como consecuencia del aumento de la presión de poro, ajustándonos a las observaciones generalizadas en este terremoto del incremento de las descargas subterráneas.

Capítulo 3

Efectos hidrogeológicos inducidos por los terremotos

3.1. Introducción

Los efectos hidrogeológicos de la interacción entre agua subterránea y terremotos incluyen la licuefacción de suelos, volcanes de fango, geiseres, aparición de nuevos manantiales o desaparición de los existentes, incremento de la descarga en manantiales y arroyos, cambios en las propiedades físicas y químicas del agua subterránea o en su distribución de presiones (Wang y Manga, 2010a; Santillán et al., 2018). Como es sabido, las variaciones hidrológicas debidas a los sismos pueden afectar a varios cientos de kilómetros alrededor (Figura 3.1) y los procesos pueden durar incluso meses o años. Estos fenómenos son el resultado de la interacción entre los procesos hidrogeológicos, las propiedades mecánicas y características tectónicas de la corteza terrestre ante una deformación de origen sísmico. Un terremoto causa cambios en el estado tensional de la corteza, que disminuyen con la distancia. La mayor parte de estas alteraciones hidrológicas se manifiestan durante y después del terremoto, y solo en muy pocos casos pueden ser indicios de terremotos precursores.

A continuación, se hará un breve descripción de dichos fenómenos hidrológicos inducidos por los terremotos siguiendo a Wang y Manga (2010a).

3.2. Licuefacción de suelos

En terremotos de magnitud superior a 6 en la escala de Richter, incluso en zonas alejadas del epicentro (Figura 3.1), se pueden producir erupciones violentas de agua y sedimentos. La licuefacción se suele dar en arenas y limos arenosos flojos saturados y en ausencia de drenaje, en que la rigidez y las tensiones efectivas en los sedimentos saturados se reducen a cero. Se origina por el incremento de la presión de poro causada por la consolidación de los sedimentos sensibles durante la

Figura 3.1: Distribución de los diferentes efectos hidrológicos provocados por los terremotos en función de la magnitud y de la distancia al epicentro (Wang y Manga, 2010b).

vibración del terremoto, transformando el sedimento en un líquido viscoso a presión que sale con violencia hacia la superficie (Figura 3.2). Suele originar una serie de fenómenos asociados, como la subsidencia, el esparcimiento lateral, el flujo viscoso con el desplazamiento de bloques intactos del terreno sobre capas de suelo licuado, fracturas verticales y laterales rellenas de arena licuada, así como cráteres de arena. La licuefacción es de gran importancia en ingeniería civil, ya que puede acarrear grandes daños en las estructuras: subsidencias, hundimientos de la sustentación de las construcciones, asentos diferenciales, daños en las pistas de aterrizaje de aeropuertos, terraplenes, exhumación de tuberías enterradas, etc (Figura 3.3). Desde los años sesenta, la Ingeniería Sísmica ha realizado un gran esfuerzo de investigación de este fenómeno (Pitilakis, 2007).

Figura 3.2: Pequeños volcanes de licuefacción. Tomado de https://ciencia.estudiareneuropa.eu/img/wo/3/25/Coseismic_liquefaction-obrazek_duzy_4078325.jpg.

3.3. Volcanes de fango

Los volcanes de fango son estructuras superficiales formadas por la erupción de sedimentos de grano fino, agua y gases (como el CO_2 y el CH_4) procedentes del subsuelo. También puede haber expulsión de fragmentos de roca de la región, aunque no afloran en las cercanías, como ocurrió en los volcanes de fango de las marismas de Huelva durante el terremoto de Lisboa, que expulsaban pizarras del sustrato paleozoico. Los edificios volcánicos varían entre menos de 1 m, como los formados por licuefacción, hasta cerca de 100 m de altura y pueden extenderse lateralmente más de 1 km. Los fluidos y sedimentos pueden proceder de profundidades mayores a 1 km.

Figura 3.3: Efectos de vuelco en edificios debidos a la licuefacción (terremoto de Niigata, 1964). Tomado de https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_liquefaction#/media/File:Liquefaction_at_Niigata.JPG

Suelen darse en cuencas sedimentarias con potentes espesores de sedimentos poco consistentes. El origen de la mayoría de los volcanes de fango no está relacionado con los terremotos, pero los sismos de gran magnitud pueden provocarlos. En tal caso, se sitúan próximos al área fuente del sismo.

No se conocen bien los mecanismos que originan los volcanes de fango, pero se piensa que los terremotos modifican el campo de esfuerzos y aceleran la abertura de los conductos de salida que estaban próximos a la rotura, descomprimiendo almacenes a presión y liberando las burbujas de gases que ayudan a arrastrar y evacuar los sedimentos. Es decir, que su origen está relacionado con la liberación de presiones sísmicas en profundidad.

Sólo en las zonas epicentrales de terremotos de gran magnitud (Figura 3.1) pueden darse a veces grandes erupciones de fango que pueden inundar superficies de cerca de un kilómetro cuadrado y que pueden durar semanas o meses (Figura 3.4). Su origen está también relacionado con la liberación de presiones generadas por el sismo en profundidad. Los materiales expulsados no solo provienen de las formaciones superficiales cuaternarias y terciarias como en la licuefacción, sino de profundidades mucho mayores en forma de sedimentos, agua y gases (dominantemente CO_2 y CH_4), involucrando a veces fragmentos del sustrato rocoso.

3.4. Géiseres

Los géiseres son manantiales que erupcionan intermitentemente con mezcla de vapor y agua líquida (Figura 3.5). Los géiseres son raros, y no hay más de 1000 en todo el mundo, y este número está disminuyendo debido al aprovechamiento de la energía geotérmica. Su rareza refleja las condiciones especiales necesarias para

Figura 3.4: Volcán de fango en la isla de Java (Indonesia). Tomado de <http://static01.nyt.com/images/2015/09/22/science/22MUD1/22MUD1-master675.jpg>.

su formación: un suministro de calor que es lo suficientemente grande como para evaporar agua, y un sistema de conductos que tiene la geometría adecuada para permitir su descarga de manera regular y periódica.

De las respuestas hidrológicas a los terremotos vistas hasta ahora, los géiseres se destacan por su extrema sensibilidad a las ondas sísmicas, que producen alteraciones y obstrucciones en la red de conductos, y cambios en la periodicidad de la ebullición.

Figura 3.5: Géiser en el Parque Nacional de Yellowstone (Estados Unidos). Tomado de <https://s1.dmcndn.net/v/N3fVq1Qx8y5KxMB6d/x1080>

3.5. Aparición o desaparición de manantiales e incremento de las descargas de arroyos y manantiales

Un sismo puede causar el incremento en el caudal de corrientes de agua o también disminución y secado de manantiales y arroyos, pero lo habitual es observar un incremento de los mismos. Los terremotos originan una sobrepresión de poro creando un nuevo campo piezométrico y provocando un flujo de abajo a arriba, que se puede manifestar en las descargas mantenidas en el campo cercano e intermedio al terremoto cuando el nivel piezométrico supera la superficie topográfica (Figura 8.2). Se ha observado que las descargas mantenidas pueden durar días, semanas y hasta años; y que forman un hidrograma en el que se manifiesta una curva de agotamiento en régimen no influenciado.

Los cambios en la descarga de manantiales y arroyos que se producen después de los terremotos se consideran una de las respuestas hidrológicas más interesantes. Esto es porque constituyen alteraciones que se relacionan de manera evidente con los sismos y fácilmente perceptibles. Asimismo, se reconocen y se pueden estudiar bien, suelen afectar a grandes áreas y son bastante persistentes en el tiempo (habitualmente, de varias semanas a meses). Gran parte de estas respuestas han sido documentadas cuantitativamente durante mucho tiempo por el Servicio Geológico de los Estados Unidos desde principios del siglo XX.

El aumento de la descarga tras un terremoto en las corrientes de agua suelen ser al inicio muy rápido, pero luego experimenta una recesión post-sísmica en el caudal base (Figura 3.6). El exceso de descarga después de los terremotos es otro dato interesante y puede ser calculado mediante el análisis de los hidrogramas de los arroyos en periodo de agotamiento. El volumen total expulsado por los terremotos al exterior es bastante considerable. Por ejemplo, en el terremoto de Loma Prieta, en California, el exceso total de la descarga se estimó en $0,01 \text{ km}^3$ (Rojstaczer et al., 1995). Después del terremoto de Chi-Chi, de $M = 7,5$ (Wang et al., 2004b), el exceso fue de $0,7 - 0,8 \text{ km}^3$. Después del terremoto del lago Hebgen, de $M = 7,5$, el exceso fue de $0,5 \text{ km}^3$ (Muir-Wood y King, 1993). En el terremoto de Borah Peak, de $M = 7,3$, el exceso fue de $0,3 \text{ km}^3$ (Muir-Wood y King, 1993).

En ausencia de precipitaciones recientes o deshielos, un cambio en la descarga del arroyo o corriente de agua implica un cambio en el gradiente hidráulico creado por una nueva fuente de recarga desde abajo, o un cambio en la permeabilidad a lo largo del camino seguido por el flujo, o ambos efectos a la vez.

Se han propuesto los siguientes mecanismos para explicar los cambios en el caudal de los arroyos y manantiales debido a terremotos: (1) expulsión de fluidos corticales profundos procedentes de la corteza inferior y media resultantes de las deformaciones elásticas cosísmicas, (2) cambios en la permeabilidad cerca de la superficie, y (3) consolidación o licuefacción de los depósitos superficiales.

Las diferencias entre las distintas hipótesis no son triviales ya que suponen dife-

Figura 3.6: Hidrogramas de los ríos (a) San Lorenzo (California) y (b) Mattole (California), en los que se aprecia la respuesta postsísmica a los terremotos de Loma Prieta, en 1989 ($M = 6,9$), y Honeydew, en 1991 ($M = 6,2$), respectivamente. La línea vertical *EQ* indica la hora de terremoto. Las flechas pequeñas muestran el momento de precipitaciones. Tomado de Wang y Manga (2007).

rentes procesos hidrológicos durante y después de terremotos y tienen implicaciones respecto a la naturaleza de los caminos seguidos por el flujo de agua subterránea. Por ejemplo, se objeta que si la procedencia del agua expulsada es de la corteza media, tal como se entiende en la propuesta (1), esta agua profunda sería caliente y de composición química muy diferente a las aguas subterráneas superficiales, aspectos estos que no se suelen observar en la realidad, donde no hay cambios sustanciales ni de temperatura ni de composición. El mecanismo podría explicarse con un aumento de la permeabilidad en niveles someros que facilite la expulsión del agua, o debido a la licuefacción por consolidación de sedimentos superficiales. La mayoría de los estudios tratan las alteraciones causadas por un terremoto en una zona amplia, pero también se ha estudiado la respuesta de una cuenca o manantial a varios terremotos, como en Sespe Creek, California, donde Manga et al. (2003) encontraron que las respuestas del caudal en el arroyo siempre aumentaron, independientemente de si la tensión estática inducida por el terremoto fuera de contracción o expansión.

Un problema para el modelo de incremento de la permeabilidad (2) es explicar por qué las curvas de recesión antes y después del terremoto son las mismas, lo cual parece indicar que no ha habido un aumento sustancial de la misma. En nuestra opinión, esta afirmación es demasiado atrevida, ya que en la curva de recesión, además de la permeabilidad, influyen también las dimensiones del acuífero, el coeficiente de almacenamiento y el espesor saturado. Un análisis de sensibilidad de estos parámetros aclararía esta cuestión (sección 10.3).

También se han observado contraejemplos al mecanismo (3), ya que ha habido terremotos que han expulsado más agua en rocas que en terrenos no consolidados. Según Wang y Manga (2010a), la anisotropía en la permeabilidad puede explicar algunas de estas supuestas contradicciones, ya que no es lo mismo un acuífero con disposición de capas verticales o inclinadas favorecedoras de los flujos ascendentes, que los estratificados horizontalmente, que lo dificultan.

Por otro lado, se ha observado que, después de los terremotos, en los sistemas hidrotermales son frecuentes los aumentos bruscos en el caudal y las variaciones de temperatura y composición.

3.6. Variación del nivel piezométrico

Los cambios en el nivel de agua de los pozos durante y después de los terremotos se han observado desde la antigüedad. Asimismo, desde principios del siglo XX, los registros instrumentales han proporcionado datos precisos para el análisis cuantitativo, que han servido para el avance en la comprensión de las respuestas de los sistemas hidrogeológicos a los terremotos. Hasta ahora, las observaciones se han centrado en los cambios en el nivel de agua subterránea en la tierra, pero también hay cambios de presión de poro en el fondo del mar, como evidencia por ejemplo, la aparición de volcanes de fango en el lecho marino.

Como se verá, la gran variedad de respuestas del nivel piezométrico a los te-

remotos puede resultar a primera vista desconcertante. A pesar de ello, hay una tendencia de comportamiento que está en relación con la disminución de la densidad de energía sísmica a medida que aumenta la distancia con la falla fuente. Así, muy cerca de la falla rota, un fuerte temblor puede generar fracturas nuevas o abrir las preexistentes, lo que lleva a una disminución escalonada en el nivel del agua. En el campo cercano, pero fuera de la falla rota, la consolidación de sedimentos sueltos puede conducir a un aumento gradual en el nivel piezométrico ya que una mayor consolidación implica una disminución en el coeficiente de almacenamiento. Las rocas cristalinas fracturadas, sin embargo, muestran un patrón característico de aumento y disminución de los niveles piezométricos similar a los cambios producidos por deformación estática cosísmica (Figura 3.7). En el campo intermedio, los cambios de permeabilidad pueden explicar los cambios sostenidos positivos o negativos en el nivel del agua. En el campo lejano, los cambios y las oscilaciones del nivel del agua subterránea se explican como la respuesta a las ondas Rayleigh, S y de Love.

Figura 3.7: Cambio en la presión de poro debido a la deformación volumétrica cosísmica y la teoría de la poroelasticidad (mapa de colores) y cambios cosísmicos observados en el nivel de agua (círculos) después del terremoto de Islandia (2000) ($M = 6,5$). Los círculos en blanco y negro indican aumento y disminución del nivel del agua, respectivamente. La línea blanca muestra la ruptura en superficie. Tomado de Jónsson et al. (2003).

En general, en los estudios sobre estos temas se han seguido dos enfoques para documentar los cambios de nivel debidos a los terremotos: los basados en un solo pozo ante varios terremotos, o los que examinan datos de muchos pozos que responden a un solo terremoto.

Usando los registros de un solo pozo, por ejemplo, en el centro de California Roeloffs (1998) se identificaron tres categorías de respuesta del nivel de agua subterránea. En el campo cercano, el nivel del agua subterránea mostró incrementos escalonados. En el campo intermedio, los cambios en el nivel del agua subterránea fueron más graduales y persistieron durante horas y semanas. A distancias aún mayores (campo lejano), sólo se registraron oscilaciones transitorias.

Por el contrario, un estudio basado en una amplia red de pozos del centro de Taiwán reveló la aparición de distintos tipos de respuestas cosísmicas y postsísmicas en el terremoto de Chi-Chi de 1999. En las inmediaciones (unos pocos kilómetros) de la falla sísmica (falla fuente), el nivel del agua subterránea mostró disminuciones escalonadas seguido de un aumento o disminución exponencial con el tiempo. Más lejos, pero aún en el campo cercano, el nivel del agua subterránea experimentó incrementos escalonados seguidos de una disminución exponencial con el tiempo. Aún más lejos, el nivel del agua subterránea mostró cambios sostenidos. Por lo tanto hay una similitud general entre las observaciones de los dos enfoques.

A continuación, se estudian separadamente los cambios en el nivel del agua subterránea en los campos cercanos, intermedio y lejano de terremotos. Las hipótesis sobre los mecanismos que causan las oscilaciones del nivel piezométrico son:

- Hipótesis de tensión estática. Se pueden comparar tanto el signo como la magnitud de los cambios cosísmicos del nivel de agua con los pronosticados a partir de modelos poroelásticos, donde el nivel del agua aumenta en zonas de contracción y disminuye en las de dilatación. Sin embargo, hay ejemplos que se ajustan muy bien a esta teoría y otros en los que ocurre todo lo contrario.
- Hipótesis de la consolidación de suelos no drenados. Un modelo diferente para explicar el cambio del nivel de agua subterránea durante los terremotos es el que supone que la sacudida sísmica hace que los sedimentos de alrededor de un pozo se consoliden o se dilaten, lo que origina cambios en la presión de poro y, consecuentemente, cambios en el nivel del agua subterránea en el pozo. Esto ha sido experimentado en laboratorio y se ha comprobado que la disminución de la porosidad por reajuste de granos durante la vibración (consolidación) produce la subida del nivel de agua. No obstante, si se llega a un umbral crítico de esfuerzos, entonces se produce aumento de porosidad por generación de microfracturas, lo que hace disminuir el nivel del agua.

En el campo intermedio, definido aquí como el área que está a más de una longitud de la falla fuente del terremoto, pero dentro de un radio r [L] de 10 longitudes de falla ($r \in [l, 10l]$), los cambios en el nivel del agua subterránea pueden ser positivos o negativos, y se caracterizan generalmente por cambios graduales sostenidos.

Parece que la explicación más plausible para estos cambios es que son debidos a un incremento de la permeabilidad por desobstrucción de obstáculos y barreras hidrológicas, que comunicaría el pozo con zonas de presión de poro más alta (cambios positivos de nivel) o más baja (cambios negativos).

La oscilación del agua subterránea en el campo lejano son un fenómeno que se ha observado desde hace mucho tiempo (antigüedad). Las oscilaciones suelen ser rápidas y de menor magnitud que las de los campos cercano e intermedio, aunque a veces pueden llegar a 6 m y a cientos de kilómetros de distancia. Parece que la explicación de esto esta relacionada con la respuesta a la tensión volumétrica ante el efecto de las ondas Rayleigh, donde las oscilaciones de presión de poro pueden inducir el flujo de fluido dentro y fuera del pozo, que a su vez puede establecer movimientos resonantes en la columna de agua. Pero también pueden observarse pequeñas oscilaciones del nivel de agua asociadas con las ondas S y de Love, las cuales generan un flujo de agua subterránea dentro y fuera del acuífero que hace aumentar la permeabilidad.

Después de sismo, el flujo en el acuífero se reconduce a un nuevo estado de equilibrio, una recuperación postsísmica dependiente del tiempo. Para el análisis de esta recesión postsísmica, se toman los hidrogramas de los pozos y se comprueba que siguen una ley exponencial de agotamiento, semejante a la de los manantiales y caudal base de arroyos.

Al igual que en el análisis de flujo, la interpretación de la recesión postsísmica en el nivel de los pozos puede obtener el volumen de agua liberado debido a la consolidación del acuífero. La recesión postsísmica del nivel del agua subterránea corresponde a una disminución de la presión de poro, e implica una consolidación postsísmica y, por lo tanto, una reducción de porosidad para la mayoría de los acuíferos que, según el periodo de recurrencia de las fallas y los tiempos geológicos, puede suponer un proceso de consolidación significativo.

3.7. Cambios en la composición del agua y de la temperatura

Son también cambios que han sido observados desde muy antiguo. Estos cambios indican que las modificaciones hidráulicas generadas por los terremotos son efectivas respecto al transporte de calor y solutos.

Aparte de que en la falla pueden generarse cantidades significativas de calor por fricción, el aumento de temperatura puede deberse a la salida de aguas profundas más calientes, y donde el incremento de la permeabilidad por rotura de barreras puede favorecer la conexión hidráulica con el interior.

3.8. Precursores hidrológicos

Dada la falta de éxito con el empleo de anomalías hidrológicas o de otro tipo para predecir terremotos (incluidas las tres características deseadas: magnitud, ubicación y fecha) no es sorprendente que la predicción de terremotos no sea el foco de la sismología moderna.

Los precursores hidrológicos de los terremotos, si existen, pueden considerarse como un subconjunto de una amplia gama de fenómenos transitorios que incluyen temblores lentos y silenciosos, fluencia transitoria, deslizamientos episódicos y enjambres sísmicos (Bernard, 2001).

Capítulo 4

El terremoto de Lisboa

4.1. Introducción

El terremoto de Lisboa de uno de noviembre de 1755, fiesta de Todos los Santos, es posiblemente el sismo de mayor tamaño sentido en Europa y uno de los terremotos relativamente más extraordinarios que han sucedido en época reciente en el Mundo. Causó un enorme impacto en su época ya que produjo varios miles de víctimas en Portugal, España y Marruecos y daños económicos muy elevados. Es llamado terremoto de Lisboa ya que esta ciudad sufrió con especial virulencia sus efectos devastadores (Figura 4.1): el terremoto propiamente dicho y un tsunami (Figura 4.2) como consecuencia del sismo que provocaron la devastación en la ciudad.

Figura 4.1: Grabado que representa la devastación de Lisboa por el terremoto, tsunami e incendios de 1755. Tomado de <http://1.bp.blogspot.com/-aa75KJAb3t4/UKouAnKYf4I/AAAAAAAAAKw/hfJoomcHusY/s1600/Terremoto+Lisboa+2.png>

Figura 4.2: Evolución temporal (en horas) del tsunami asociado al terremoto de Lisboa de 1755. Fuente: NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC). http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/icons/1755_1101.jpg.

La duración de este terremoto fue de unos 7 minutos, aunque no en único movimiento continuo. Se sucedieron tres movimientos con dos intervalos de quietud. Esto ha hecho pensar a algunos autores (Vilanova et al., 2003) en un contagio de las fallas relacionadas con la falla de Azores-Gibraltar y que se orientan en dirección NE-SO hacia la Península Ibérica (Figura 4.3).

Es considerado por muchos como el punto de partida de la ingeniería sísmica, ya que es el primero de gran escala que fue estudiado científicamente. Fue sentido en toda la Península Ibérica y en gran parte de Europa occidental, norte de África, incluso en América. En estos sitios se registraron anomalías hídricas (Figura 4.3) (Martínez Solares, 2001). Se ha estimado una magnitud aproximada entre 8,2 y 9 así como una intensidad epicentral de XI-XII (Martínez Solares et al., 1979; Martínez Solares, 2001; Martínez Solares y López Arroyo, 2004).

Figura 4.3: Mapa tectónico de la zona de la falla de Azores-Gibraltar-Túnez y mapa de isosistas del terremoto de uno de noviembre de 1755 basado en Levret (1991), Martínez Solares y López Arroyo (2004) y Oliveira (2008). Intensidades según la escala de Mercalli Modificada (MMI). La estrella roja grande señala la posible localización del epicentro. Las otras posibles localizaciones propuestas por diferentes autores (Vilanova et al., 2003) están representadas por estrellas rojas pequeñas. En puntos azules, se señalan alteraciones hidrogeológicas fuera de la Península Ibérica.

4.2. Causas geológicas del terremoto

Respecto al contexto sismotectónico de la zona, cabe señalar que la Península Ibérica se halla situada cerca del borde sudoeste de la placa euroasiática, en su contacto con la placa africana. El límite entre estas dos placas sigue una dirección general O-E hasta el final oriental del Mediterráneo. Este desplazamiento tectónico entre ambos continentes es el responsable de la actividad sísmica de los países mediterráneos y del norte de África. La parte más occidental de la conjunción entre dichas placas son las islas Azores, ubicadas donde se sitúa la triple unión entre las placas de Norteamérica, al O, y las de Eurasia y África, al E (Figura 4.3). El límite con la placa norteamericana la constituye la dorsal centro-atlántica, que marca la separación entre Eurasia y África. La parte más occidental de la conjunción entre dichas placas es la fractura denominada de Azores-Gibraltar-Túnez, que puede ser dividida en dos partes. La primera llegaría desde el final de la unión triple de las Azores (25°O) hasta los 13°O , con movimientos de desgarre en sentido E-O (Martínez Solares y López Arroyo, 2004). En esta zona ocurren terremotos de gran magnitud. Este límite entre ambas placas, desde Azores hasta Gibraltar, está configurado sobre la litosfera oceánica (Andrés et al., 2018). La segunda parte, denominada área ibero-magrebí, comprende desde el Banco de Gorringe (13°O) hasta Túnez y es en donde la Península Ibérica conformaría un bloque semindependiente, aunque unido a la placa europea (Martínez Solares y López Arroyo, 2004; Martínez Solares, 2017; Neres et al., 2016). En su zona más occidental, desde el inicio hasta el estrecho de Gibraltar (6°O), los sismos presentan mecanismos de fallas inversas y eje de presión orientado en la dirección N-S hacia NO-SE (Udías et al., 1976). Según Udías et al. (1976), Martínez Solares et al. (1979) y Martínez Solares (2001) esta sería la zona donde se produjo el terremoto de Lisboa de 1755, situando el epicentro en la falla Azores-Gibraltar, a varios cientos de kilómetros al suroeste del Cabo de San Vicente (Figura 4.3, estrella roja grande), aunque hay diversas ubicaciones según otros autores tal como se muestra en esta Figura. Un terremoto de esta magnitud $M \in [8, 9]$ presupone una longitud de rotura de 200-1000 km. Aunque el comienzo de la ruptura se nuclea en un sector determinado, la situación de este sector de falla sísmica no se conoce.

Así pues, aunque el terremoto de Lisboa ha sido bastante estudiado tanto en España y Portugal (Mendes-Victor et al., 2009; Oliveira, 2008, entre otros), cualquier hipótesis sobre la ubicación del segmento de falla sísmica y del foco sigue estando abierta a posibles discusiones y sometida a futuras investigaciones.

4.3. Efectos del terremoto en Portugal, España y norte de África

Debido a la cercanía con el epicentro, el SO de Portugal fue la zona más afectada por el sismo de 1755. Sufrió especialmente la ciudad de Lisboa, que tenía

150000 habitantes (Pereira de Sousa, 1932, volumen III), de los cuales fallecieron 12000, según Martínez Solares (2001) (no existe unanimidad entre los autores acerca de la cifra de muertos). Lisboa quedó asolada no sólo por el terremoto sino por incendios sucesivos que aparecieron a causa de las velas encendidas conmemorando a todos los Santos (uno de noviembre). Asimismo, unos cuarenta minutos después del terremoto sobrevino un tsunami sobre la urbe que arrasó el puerto y el centro de la ciudad. Casi todos los edificios de la misma quedaron destruidos o gravemente dañados, como el Teatro de la Ópera, el Palacio Real, el Teatro Real do Paço da Ribeira, la Catedral de Santa María, las basílicas de São Paulo, Santa Catarina y São Vicente de Fora, la iglesia de la Misericordia, el Hospital Real de Todos los Santos, etc¹.

La organización en la reconstrucción de Lisboa recayó fundamentalmente en el primer ministro del Rey José I, el marqués de Pombal Sebastião José de Carvalho e Melo. En menos de un año se logró limpiar la ciudad de escombros y se comenzó a urbanizar más ordenadamente, con anchas avenidas y calles rectas.

En España, según Martínez Solares (2001), el tsunami ocasionó más muertes (1214) que el terremoto (61). Sufrieron especial afección las provincias de Cádiz y Huelva. Las fuentes de información provienen fundamentalmente del Archivo Histórico Nacional y de la Real Academia de la Historia. Entre ellas, destaca el informe del gobernador del Supremo Consejo de Castilla, elaborado por orden de Fernando VI.

En el norte de África también hubo daños personales importantes, destacando las ciudades de Fez (desplome de la mezquita y de muchas casas), Marrakesh, Larache, Mequinez (judería), Sale y Tetuán (Martínez Solares, 2001).

¹https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_Lisboa_de_1755#cite_note-info1-3

Capítulo 5

Repaso de los conceptos básicos de hidráulica subterránea y definición del coeficiente de agotamiento de un acuífero

5.1. Tipos de acuíferos¹

Se denomina acuífero a una formación geológica que permite el almacenamiento y la circulación del agua por sus poros o grietas. Son terrenos permeables, tales como los aluviales cuaternarios, sistemas kársticos, etc. En un acuífero libre se distinguen dos zonas: una de aireación o zona no saturada, y otra de saturación.

Los acuíferos, según su comportamiento hidrodinámico, se clasifican principalmente en:

- Acuíferos libres. Son aquellos en los que el nivel freático se encuentra a presión atmosférica ya que se comunica con la atmósfera a través de los espacios huecos del terreno permeable.
- Acuíferos cautivos o confinados. Son aquellos en los que la base y el techo son impermeables y su nivel piezométrico está por encima del techo del acuífero. El agua, por tanto, está a presión o en carga. En rigor no existen acuíferos cautivos puros, dado que no hay materiales absolutamente impermeables, si bien, a efectos prácticos, se pueden considerar como tales aquellas formaciones que permanecen confinadas en una gran extensión y afloran en superficie por algunos de sus extremos por los que se verifica la recarga y en las que se sitúa el nivel freático.
- Acuíferos semiconfinados. Los materiales que los rodean no son todos impermeables y es clásico el esquema geológico donde existe una capa semi-

¹Tomado de Sanz Pérez (2013).

permeable (acuitardo) que separa un acuífero semiconfinado inferior con otro libre superior, permitiendo el paso de agua de uno a otro acuífero.

En comparación con los confinados, podemos diferenciar las siguientes propiedades de los acuíferos libres: el agua que ceden es la que tienen almacenada en los poros y no procede de la descompresión, como en los cautivos. Por ello, tienen más inercia, los conos de bombeo presentan mayores descensos y es más corto su radio de influencia. En los acuíferos semiconfinados, la velocidad de reacción ante un bombeo es más moderada que en los confinados y los radios de influencia tienen valores medios entre libres y cautivos.

Una falla con buzamiento subvertical podría considerarse como un acuífero confinado debido su elevada longitud y su bajo espesor (sección 6.4).

5.2. Ley de Darcy

Si un tubo de material poroso de sección S y longitud l es sometido a una diferencia de potencial hidráulico Δh , será atravesado por un caudal:

$$Q = k \frac{\Delta h}{l} S \text{ [L}^3\text{T}^{-1}\text{]} , \quad (5.1)$$

donde la constante de proporcionalidad k , llamada permeabilidad, tiene dimensiones de $[\text{LT}^{-1}]$ (Figura 5.1). Esta expresión es conocida como ley de Darcy.

Figura 5.1: Experimento de Darcy.

Como, de forma genérica, un caudal es el producto de la sección atravesada por el fluido por su velocidad de avance, a partir de la ley de Darcy (ecuación 5.1) se define la velocidad de Darcy como:

$$v_d = -k \frac{\Delta h}{l} \text{ [LT}^{-1}\text{]} .$$

Esta velocidad no es la velocidad de avance real del flujo por el medio, ya que el agua no atraviesa la sección entera sino que sólo circula a través de los poros.

En la Figura 5.1 se puede observar que el cociente $i = -\Delta h/l$ es la pendiente de la recta de alturas de presión a lo largo del conducto. En definitiva, i es el módulo del gradiente de alturas de presión ∇h . Naturalmente, la dirección del flujo será contraria al gradiente (el agua se mueve desde los niveles de potencial altos hacia los bajos).

Se puede observar, por tanto, que la expresión 5.1 es el caso particular (bidimensional) de la expresión genérica:

$$\vec{v}_d = -k\nabla h.$$

5.3. Parámetros fundamentales de un acuífero libre

Para describir un acuífero desde el punto de vista hidrogeológico, las magnitudes básicas que se utilizarán son la permeabilidad, el espesor saturado, la transmisividad (que es una combinación de los dos anteriores), el coeficiente de almacenamiento, la difusividad (compendio de los anteriores parámetros) y la longitud característica del acuífero. En este trabajo se toman como parámetros básicos para el estudio de los acuíferos la conductividad hidráulica, el espesor saturado, el coeficiente de almacenamiento y la longitud del acuífero.

El parámetro k [LT^{-1}] de la ley de Darcy cuantifica la conductividad hidráulica o permeabilidad del terreno, que es la facilidad con la que el terreno permite la circulación de agua a su través. Es un coeficiente de proporcionalidad entre el vector velocidad de Darcy y el gradiente de alturas de presión (un tensor).

Para comprender el concepto de conductividad hidráulica, se puede comparar al de la masa m en la segunda ley de Newton ($\vec{F} = m\vec{a}$), al de conductividad térmica k en la ley de transferencia de calor por conducción ($\vec{q} = -k\nabla T$), o al de conductancia G (que es el inverso de la resistencia, $G = 1/R$) en la ley de Ohm ($I = G\nabla V$).

El espesor saturado es la altura de la lámina libre de un acuífero libre en la descarga, es decir, la profundidad del acuífero en la horizontal del manantial. Mide la altura del medio saturado de agua y se denota por b [L].

La transmisividad T es el caudal que atraviesa una sección de altura igual al espesor saturado del acuífero y anchura unidad por unidad de gradiente hidráulico. Se calcula como el producto de la conductividad hidráulica k por el espesor saturado del acuífero b :

$$T = kb \text{ [L}^2\text{T}^{-1}\text{]} .$$

El coeficiente de almacenamiento de un acuífero se define como el volumen de agua cedido por la unidad de área de acuífero al disminuir el nivel piezométrico (potencial hidráulico) un metro. Se denota por S y es una magnitud adimensional.

Para un acuífero confinado, $S \in [10^{-6}, 10^{-4}]$; para un acuífero semiconfinado $S \in [10^{-4}, 10^{-3}]$. Para un acuífero libre, $S \in [10^{-3}, 10^{-1}]$ (Custodio y Llamas, 1976). El coeficiente de almacenamiento es el producto del espesor saturado por el coeficiente de almacenamiento específico:

$$S = bS_s.$$

A su vez, el coeficiente de almacenamiento específico S_s $[L^{-1}]$ se define como el volumen de agua cedido por unidad de volumen real del acuífero cuando el potencial hidráulico de dicho volumen disminuye un metro (el nivel piezométrico baja un metro). Sus dimensiones son de longitud a la menos uno.

La difusividad hidráulica es una magnitud que se define como el cociente de la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento específico de un medio poroso. También puede calcularse como el cociente de la transmisividad entre el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

$$D = \frac{k}{S_s} = \frac{T}{S} [L^2T^{-1}] .$$

Esta magnitud reúne todos los parámetros no geométricos (independientes de la longitud) del acuífero y es muestra del comportamiento de la unidad de longitud de acuífero ante una acción exterior como un bombeo o una recarga. Para el caso de bombeo, cuanto mayor sea la difusividad, más grande será la base del cono de bombeo (cono de absorción o de disminución de potenciales) y menor la profundidad del mismo. Dicho de otra forma, cuanto mayor sea la difusividad, más rápidamente se ve alterado el nivel piezométrico (y el caudal de descarga del manantial) de un acuífero ante una acción exterior. Mide la rapidez con la que se difunden los cambios de presión (de altura piezométrica) y de caudal en un acuífero. Por todo esto, se puede entrever que esta magnitud será de especial interés en el estudio de las afecciones de un acuífero ante una acción sísmica.

Finalmente, en un modelo bidimensional de acuífero, la longitud característica l $[L]$ del mismo es la proyección horizontal de la distancia que media entre el manantial (zona de descarga) y el punto más alejado del acuífero.

Desde el punto de vista geométrico y dentro de la simplificación bidimensional de los acuíferos, la longitud característica l y el espesor saturado b del acuífero son los dos parámetros que caracterizan la geometría del mismo (Figura 5.2). El volumen hidrodinámico V_h $[L^3]$ es el volumen de agua del acuífero libre que queda por encima de la horizontal del manantial (que podría salir por gravedad). Será igual al volumen real V_r $[L^3]$ del acuífero saturado multiplicado por el coeficiente de almacenamiento. Si se denota por $h(x)$ $[L]$ la altura de la lámina libre de agua en el punto x $[L]$ (que por ser acuífero libre coincide con la altura piezométrica) y por $z_0(x)$ $[L]$ a la línea del fondo del acuífero, el volumen hidrodinámico será:

$$V_h = SV_r = Sp \int_0^l (h(x) - z_0(x))dx,$$

donde p $[L]$ es la profundidad del acuífero (dimensión perpendicular al papel).

Figura 5.2: Parámetros geométricos básicos de un acuífero libre. La longitud horizontal se denota por l , b es el espesor saturado, h es la función que describe la altura piezométrica del agua y z_0 la que describe el fondo del acuífero.

5.4. Definición general del coeficiente de agotamiento de un acuífero

El coeficiente de agotamiento es un parámetro característico de un acuífero utilizado para describir la manera en que se comportará el caudal de descarga (y por ende el volumen hidrodinámico) del acuífero cuando deja de influenciarse, es decir, cuando se deja de recargar por efecto de las precipitaciones o de bombear por efecto de la actividad humana.

En el camino del estudio de la afección hidráulica de un acuífero ante la acción sísmica es previo el análisis del comportamiento hidráulico del mismo en condiciones de no sismicidad. En este sentido, se estudiará a continuación la evolución de la descarga del acuífero cuando no recibe recarga.

Se parten de las siguientes hipótesis (Custodio y Llamas, 1976):

- El acuífero es homogéneo y anisótropo.
- La recta de alturas piezométricas h es prácticamente constante. Es decir, es asimilable a una recta, de forma que su pendiente, $\delta h(x)/\delta x$ es constante e igual a la pendiente de la superficie de la zona saturada.
- La pendiente de dicha superficie es pequeña.
- No hay recargas (lluvia, inyecciones o acción sísmica) ni descargas (filtraciones, bombeos o evatranspiración) en el sistema del acuífero. El acuífero se encuentra, por tanto, en régimen no influenciado.

Como se verá más adelante (sección 8.2), la disminución del caudal de descarga, Q [L^3], a través de un manantial cuando se anula la recarga y el bombeo sigue una ley exponencial decreciente en función del tiempo (Figura 5.3):

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t}, \quad (5.2)$$

donde el coeficiente de recesión $\alpha [T^{-1}] > 0$ es el llamado coeficiente de agotamiento y $Q_0 [L^3]$ es el caudal de descarga del acuífero en condición estacionaria. Es, por tanto, el caudal al inicio de la descarga: $Q_0 = Q(0)$.

Si la ecuación 5.2 se representa en una gráfica semilogarítmica, adopta la forma de una recta de pendiente $-\alpha$ (Figura 5.3). Es decir, el coeficiente de agotamiento es la pendiente de la curva de descarga de un acuífero en recesión (periodo sin recarga).

Figura 5.3: Representación de la descarga de un acuífero en recesión (sin recarga) en la que el caudal sigue una ley de descenso según la exponencial decreciente $Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t}$.

5.5. Coeficiente de agotamiento de un acuífero libre sin recarga

Supóngase una sección de profundidad unidad ($p = 1$ m) de acuífero como la representada en la Figura 5.4. Este acuífero, en el instante de tiempo inicial $t = 0$, pierde su recarga ($R = 0$ m³/s, es decir, se supondrá que está en régimen no influenciado). El acuífero tiene en el extremo más lejano a la descarga del manantial ($x = 0$) una altura de presión que será función del tiempo $h(x = 0, t) = h_0(t)$.

La distribución de alturas de presión del acuífero (nivel piezométrico) a lo largo del eje x se asume lineal entre los valores $h_0(t)$ y 0. Por tanto, su gradiente en función del tiempo es:

$$i(t) = \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \approx \frac{h_0(t)}{l}.$$

En consecuencia, la ecuación de Darcy quedaría:

$$Q(t) = -ki(t)A = -k \frac{h_0(t)}{l} A,$$

donde el área de paso del fluido es $A = bp$, siendo b el espesor saturado del acuífero y p la profundidad del mismo. Como se está considerando un acuífero de profundidad

Figura 5.4: Esquema de la descarga de un acuífero libre sin recarga. La altura de presión en el extremo del mismo $h_0(t)$ va disminuyendo con el tiempo. El gradiente del nivel piezométrico se asume lineal. Los cálculos se realizan por unidad de profundidad p del acuífero.

unidad, se puede reescribir la ecuación de Darcy expresando el caudal por unidad de anchura o profundidad:

$$q(t) = \frac{Q(t)}{p} = -kb \frac{h_0(t)}{l}. \quad (5.3)$$

Por otra parte, el caudal $Q(t)$ es la variación del volumen hidrodinámico del acuífero a lo largo del tiempo:

$$Q(t) = \frac{dV_h(t)}{dt},$$

donde la expresión del volumen hidrodinámico es el volumen real del acuífero $(lh_0(t)p/2 + blp)$, que se puede deducir de la Figura 5.4) por el coeficiente de almacenamiento S :

$$V_h(t) = \left(\frac{1}{2}lh_0(t)p + blp\right)S.$$

Si el caudal se expresa por unidad de sección, queda:

$$q(t) = \frac{Q(t)}{p} = \frac{dV_h(t)}{dt} = S \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}lh_0(t)p + blp\right) = \frac{1}{2}lS \frac{dh_0(t)}{dt}. \quad (5.4)$$

Combinando las ecuaciones 5.3 y 5.4, se tiene:

$$-kb \frac{h_0(t)}{l} = \frac{1}{2}lS \frac{dh_0(t)}{dt} \Leftrightarrow \frac{\frac{dh_0(t)}{dt}}{h_0(t)} = -\frac{2kb}{l^2 S}.$$

Integrando en el tiempo la expresión anterior, se tiene:

$$\int_0^t \frac{dh_0(t)}{h_0(t)} dt = \int_0^t -\frac{2kb}{l^2 S} dt \Rightarrow \ln(h_0(t)) = -\frac{2kb}{l^2 S} t \Rightarrow h_0(t) = h_0(t=0)e^{-\frac{2kb}{l^2 S} t}.$$

La ecuación anterior expresa la variación de la altura piezométrica del acuífero en el extremo a lo largo del tiempo. A partir de ella y de la ley de Darcy aplicada a este caso concreto (ecuación 5.3), se obtiene la variación del caudal a lo largo del tiempo:

$$q(t) = -\frac{kb}{l} h_0(t) = -\frac{kb}{l} h_0(t=0)e^{-\frac{2kb}{l^2 S} t} = q(t=0)e^{-\frac{2kb}{l^2 S} t} = q(t=0)e^{-\alpha t},$$

donde la expresión:

$$\alpha = \frac{2kb}{l^2 S} = \frac{2T}{l^2 S} \quad [\text{T}^{-1}] \quad (5.5)$$

es el coeficiente de agotamiento (un coeficiente de recesión del caudal a lo largo del tiempo).

Se debe notar que la expresión 5.5 corresponde al coeficiente de agotamiento de un acuífero libre sin recarga (régimen no influenciado). Asimismo, se debe recordar que el producto de la conductividad por el espesor saturado del acuífero es la transmisividad del mismo ($T = kb$).

5.6. Coeficiente de agotamiento de un acuífero libre con recarga

En este epígrafe se deducirá la ley de descarga de un acuífero libre con recarga y cuya descarga se realiza a un nivel constante h_d [m].

Supóngase un acuífero de longitud l y cuyo fondo impermeable (a lo largo del espacio y tiempo) sigue el contorno dado por la función $z_0(x, t)$ y en el que la superficie piezométrica (en el espacio y tiempo) viene dada por la función $h(x, t)$ (Figura 5.5a). Sobre este acuífero se define el volumen de control diferencial de la Figura 5.5b.

El caudal por unidad de profundidad trasegado en este volumen de control, según la ley de Darcy, será:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{p} &= (h(x, t) - z_0(x, t))v_d = -(h(x, t) - z_0(x, t))ki = \\ &= -(h(x, t) - z_0(x, t))k \frac{\partial h(x, t)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Por otra parte, este caudal será igual a la variación de volumen de control respecto del tiempo multiplicado por el coeficiente de almacenamiento del acuífero (ecuación de la continuidad):

$$Q = S \frac{\partial V}{\partial t} = S p \frac{\partial A}{\partial t} \Leftrightarrow \frac{Q}{p} = S \frac{\partial}{\partial t} \int_x^{x+dx} (h(x, t) - z_0(x, t)) dx \quad (5.7)$$

Figura 5.5: Representación del flujo en un acuífero libre y en un volumen diferencial del mismo.

Igualando los caudales de las ecuaciones 5.6 y 5.7:

$$\begin{aligned}
 S \frac{\partial}{\partial t} \int_x^{x+dx} (h(x, t) - z_0(x, t)) dx &= -k (h(x, t) - z_0(x, t)) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \Rightarrow \\
 \Rightarrow S \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial t} \int_x^{x+dx} (h(x, t) - z_0(x, t)) dx \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-k (h(x, t) - z_0(x, t)) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \right) \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow S \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_x^{x+dx} (h(x, t) - z_0(x, t)) dx \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-k (h(x, t) - z_0(x, t)) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \right) \Rightarrow \\
 \Rightarrow S \frac{\partial}{\partial t} (h(x, t) - z_0(x, t)) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(-k (h(x, t) - z_0(x, t)) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \right).
 \end{aligned}$$

Para el caso en que el lecho del acuífero no varía con el tiempo (que será lo normal), se tiene que

$$\frac{\partial z_0(x, t)}{\partial t} = 0$$

y, por lo tanto:

$$S \frac{\partial}{\partial t} h(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-k (h(x, t) - z_0(x, t)) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \right). \quad (5.8)$$

Esta ecuación, conocida como de Boussinesq (1877), sirve para describir el comportamiento del nivel piezométrico de un acuífero libre bidimensional a lo largo del tiempo.

Para el caso de un acuífero libre con descarga a nivel constante h_d y con una recarga de caudal por unidad de longitud r [$L^3T^{-1}L^{-1}$], se puede demostrar (Custodio y Llamas, 1976) que la superficie piezométrica adopta la parábola de Dupuit (Figura 5.6):

$$h(x, t) = h(0, t) - \frac{rx^2}{2T} = h(0, t) - (h(0, t) - h_d) \frac{x^2}{l^2}. \quad (5.9)$$

Figura 5.6: Acuífero libre con descarga a nivel constante h_d y cuya superficie piezométrica sigue la parábola de Dupuit.

Supóngase que, en el instante de tiempo inicial $t = 0$ s se anula la recarga y, en consecuencia, el acuífero empieza a descargarse. Esto conllevará una disminución del volumen hidrodinámico del acuífero y un «aplanamiento» de la superficie piezométrica. En consecuencia, también el caudal de descarga $Q(t)$ se irá reduciendo. En este sentido, para encontrar la expresión de la altura piezométrica del acuífero a lo largo del tiempo se deberá de resolver el siguiente problema (la ecuación diferencial en derivadas parciales 5.8 completada con la ecuación 5.9 de la parábola de Dupuit y unas condiciones de contorno):

$$\begin{cases} S \frac{\partial}{\partial t} h(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-k (h(x, t) - z_0(x, t)) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \right) \\ h(x, t) = h(0, t) - \frac{rx^2}{2T} = h(0, t) - (h(0, t) - h_d) \frac{x^2}{l^2} \\ h(0, 0) = h_0 \\ h(l, t) = h_d \\ \frac{\partial h(0, t)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

Se puede demostrar que la solución al problema 5.10 obtiene como expresión de la altura piezométrica del acuífero a lo largo del tiempo (Custodio y Llamas, 1976):

$$h(x, t) = h_0 + \frac{32(h_0 - h_d)}{\pi^3} \left(e^{-\alpha t} \cos\left(\frac{\pi x}{2l}\right) - \frac{1}{27} e^{-9\alpha t} \cos\left(\frac{3\pi x}{2l}\right) + \frac{1}{125} e^{-25\alpha t} \cos\left(\frac{5\pi x}{2l}\right) - \dots \right), \quad (5.11)$$

donde α es el llamado coeficiente de agotamiento:

$$\alpha = \frac{\pi^2 T}{4Sl^2} = \frac{\pi^2 D}{4l^2} \text{ [T}^{-1}\text{]}. \quad (5.12)$$

A partir de la ecuación 5.11 se obtiene que el caudal de descarga es:

$$Q(t) = \frac{16T(h_0 - h_d)}{\pi^2 l^2} \left(e^{-\alpha t} + \frac{1}{9} e^{-9\alpha t} + \frac{1}{25} e^{-25\alpha t} + \dots \right) \quad (5.13)$$

Las series de Fourier anteriores (expresiones 5.11 y 5.13) pueden ser aproximadas a las fórmulas de Boussinesq:

$$\begin{cases} h(x, t) = h(x, 0)e^{-\alpha t} \\ Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} \end{cases},$$

donde $Q_0 = Q(0)$ es el caudal al inicio de la descarga.

5.7. Análisis dimensional del coeficiente de agotamiento

El coeficiente de agotamiento es un parámetro que caracteriza la rapidez exponencial de la descarga hidráulica de un manantial.

De forma genérica, es proporcional a:

- La transmisividad T [$L^2 T^{-1}$]. A su vez, la transmisividad puede ser expresada como el producto de la conductividad por el espesor saturado del acuífero: $T = k$ [$L T^{-1}$] b [L].
- Al inverso del coeficiente de almacenamiento S (adimensional).
- Al inverso del cuadrado de la distancia característica del acuífero l [L].

Es decir, $\alpha \propto \frac{kb}{Sl^2}$ y, por tanto, sus dimensiones son de tiempo a la menos uno:

$$[\alpha] = \frac{LT^{-1}L}{L^2} = T^{-1}.$$

Así pues, el coeficiente de agotamiento puede ser entendido como un tiempo característico.

Puede ayudar a la comprensión del concepto de coeficiente de agotamiento la forma en que se descarga un condensador de capacidad C y con potencial inicial V_0 que se conecta en serie a una resistencia R , que sigue la ecuación:

$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

El factor $(RC)^{-1}$ sería análogo al coeficiente de agotamiento.

Capítulo 6

Resultados: los efectos hidrogeológicos inducidos por el terremoto de Lisboa de 1755 en España y Portugal

6.1. Geología y efectos hidrológicos

Las localidades con alteraciones hidrológicas del terremoto se representan en el mapa tectónico de España (y Portugal) a escala de 1:2000000 (Instituto Geológico y Minero de España, 2004) (Figura 6.1), en el mapa litológico de España y Portugal (Figura 6.2) y en el mapa de coeficientes de agotamiento de los acuíferos de España (Figura 6.3).

6.2. Licuefacción y volcanes de fango

Las zonas donde se registraron fenómenos de licuefacción están cercanas a la fuente del terremoto dentro de las formaciones susceptibles de licuefactarse y con nivel piezométrico próximo a la superficie. Se identifican dos fenómenos de volcanes de fango en las marismas españolas de Huelva y hay citados también volcanes de fango submarinos, debidos probablemente a este terremoto en Lolita Salt Diapir y Valle de Cádiz, con coordenadas aproximadas 36°N, 8°O (Figura 6.4) (Leynaud et al., 2017). La distribución geográfica de las formaciones geológicas superficiales cuaternarias o miocenas que se vieron afectadas por la licuefacción se extiende en centenares de kilómetros a lo largo de la costa atlántica y a través de los aluviales de los ríos.

Figura 6.1: Mapa de unidades geotectónicas de la Península Ibérica (adaptado del Instituto Geológico y Minero de España, 2004) y situación de las alteraciones hidrogeológicas inventariadas producidas por el terremoto de Lisboa de 1755.

Figura 6.2: Mapa litológico esquemático de la Península Ibérica (para España, adaptado de Riva Arderiu, 1969, escala original 1:400000; y elaboración propia para Portugal) y situación de las alteraciones hidrogeológicas inventariadas producidas por el terremoto de Lisboa de 1755. (1) Sedimentos aluviales; (2) conglomerados; (3) areniscas; (4) rocas carbonatadas (calizas y dolomías); (5) limos, arcillas, arenas, margas y margas calcáreas que corresponden en general a las grandes cuencas terciarias de los principales ríos españoles, salvo las calizas del Páramo; (6) cuarcitas (diferenciadas sólo para España; en el caso de Portugal, se incluyen dentro de 7); (7) pizarras; (8) racas plutónicas; (9) otras rocas (yesos y volcánicas).

Figura 6.3: Situación de las alteraciones hidrogeológicas inventariadas producidas por el terremoto de Lisboa de 1755 en España sobre un mapa de coeficientes de agotamiento $\alpha \times 10^5 \text{ día}^{-1}$ (adaptado de Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

Figura 6.4: Distribución del incremento de las descargas de agua subterránea a través de manantiales o cursos de agua permanentes. Distribución de la licuefacción y volcanes de fango. (1) Manantiales o arroyos nuevos; (2) Incremento en el caudal de manantiales y arroyos duraderos; (3) Incremento del caudal en manantiales termales persistentes; (4) Posible disminución o secado de manantiales duraderos y/o posible cambio de lugar del nacimiento de manantiales; (5) Alteración hidráulica de manantiales no duraderos que están asociados a fallas; (6) Posibles volcanes de fango; (7) Licuefacción.

Figura 6.5: Áreas con manantiales y arroyos persistentes. (1) Duración de más de tres meses; (2) Duración de más de dos meses; (3) Duración de más de 20 días; (4) Manantiales termales duraderos que han tenido una duración de más de 20 días o un mes; (5) Sectores de fallas con manantiales persistentes de más de dos años de duración; (6) Sectores de fallas sísmicas en la falla Azores-Gibraltar del terremoto de Lisboa de 1755. Detalle: Relación de manantiales de larga duración con las fallas principales del SO de la Península Ibérica. NF = Falla de Nazaré; BTF = Falla del Bajo-Tajo; MF = Falla de Messejana. (1) Manantiales persistentes de más de dos años de duración; (2) Manantiales de más de 4-5 meses de duración; (3) Manantiales persistentes de más de 20 días de duración; (4) Manantiales no duraderos.

6.3. Alteración de manantiales y corrientes de agua

Dentro de la alteración de los manantiales y corrientes de agua, se ha hecho primeramente un análisis conjunto general, para diferenciar luego el caso de descargas persistentes.

En el SO de Portugal, la alteración de manantiales y arroyos debió ser un fenómeno generalizado, a juzgar por la abundancia de los mismos en la zona centro, que es donde se han conservado las contestaciones a las encuestas. Los manantiales y arroyos alterados relacionados con fallas y contactos geológicos de unidades geológicas importantes son 143 (86 en España y 57 en Portugal), lo que representa el 37 % del total. De estos 143 manantiales, el 28 % está asociado a límites entre grandes unidades geológicas, donde suele haber cambios litológicos y de directrices estructurales. El 72 % restante lo está a fallas importantes de ámbito nacional y regional. En Portugal, el 19 % de los manantiales alterados están asociados a fallas consideradas activas por García Mayordomo et al. (2012). En España, el 13 % está asociado a fallas consideradas activas por el mismo autor. Respecto a España, el 14 % de las fallas afecta a granitos, 13 % a fallas indiferenciadas que afectan al Mioceno de la Cuenca del Duero y el 17 % a fallas importantes sin especificar.

El resto de los manantiales alterados, que son 220 (56 %), se han ordenado en diferentes grupos litológicos de semejante comportamiento hidrogeológico (salvo el grupo 6, que es heterogéneo) clasificados para España por Sanz Pérez (1996) (Tabla 6.1). En el mapa de la Figura 6.2 están también representados individualmente los conglomerados, las areniscas, las cuarcitas y las pizarras, pero no ha sido posible hacer una distinción tan apurada para la muestra de los manantiales afectados por el terremoto. Estos grupos son: (1) aluviales; (2) rocas carbonáticas (calizas y dolomías); (3) limos, arcillas, arenas, margas y margocalizas, que corresponden en general a las grandes cuencas terciarias de los grandes ríos peninsulares, salvo las calizas del Páramo (Ebro, Duero, Tajo y Terciario del bajo Tajo en Portugal, Guadalquivir y Guadiana); (4) rocas metamórficas (gneises, esquistos, pizarras, cuarcitas); (5) rocas plutónicas y (6) otras rocas (yesos, areniscas, conglomerados y rocas volcánicas).

En la Tabla 6.1 se presenta el índice A , que se define como la relación del número de manantiales alterados por el terremoto respecto del total de manantiales de una litología determinada para una región concreta, y que nos puede informar sobre la sensibilidad de las diferentes rocas a la alteración hidrogeológica de los terremotos. Es decir, el índice A mide el impacto hidrológico del terremoto en cada grupo litológico. En este caso, ha podido realizarse porque se conocía la clasificación de los manantiales según la litología en España (Sanz Pérez, 1996). La distribución del número de manantiales de más de 0,5 l/min por kilómetro cuadrado y por litologías (primera columna de la Tabla 6.1) se va a considerar representativa para toda la Península Ibérica y no solo para España. Esto se asume así porque dos de los factores que quizá más influyen en esta distribución, litología y climatología, son en ambos países bastante parecidos. Por un lado, la geología de Portugal es bastante

Grupos litológicos	Número de manantiales con caudal $\geq 0,5 \text{ l min}^{-1} \text{ km}^{-2}$	Superficie [km^2]	Superficie [%]	Número de manantiales con caudal $\geq 0,5 \text{ l/min}$	$X = \text{Manantiales con caudal } \geq 0,5 \text{ l/min [\%]}$	Número de manantiales afectados por el terremoto de Lisboa de 1755	$Y = \text{Manantiales afectados por el terremoto de Lisboa de 1755 [\%]}$	Índice $A = Y/X$
1. Aluviales	14,2	89094	15,2	1265135	21,5	21	9,5	0,44
2. Rocas carbonatadas	10,0	79077	13,5	790770	13,4	54	24,6	1,8
3. Limos, arcillas, arenas, margas y margocalizas	11,3	129757	22,1	1466254,1	24,9	42	19,1	0,76
4. Rocas metamórficas	6,2	146339	24,9	907302	15,4	50	22,7	1,47
5. Rocas plutónicas	5,5	78847	13,4	433658,5	7,4	53	24,1	3,25
6. Otras rocas (conglomerados, yesos, rocas volcánicas, areniscas)	15,9	64261	10,9	1021750	17,4	-	-	-
Total	63,1	587375	100	5884869,6	100	220	100	

Tabla 6.1: Clasificación según litologías de los manantiales de España y Portugal afectados por el terremoto de Lisboa de 1755 e incidencia hidrológica del mismo en cada grupo litológico.

semejante a la de España en la zona más afectada por este terremoto, donde las unidades del Macizo Ibérico se prolongan a uno y otro lado, aunque la distribución litológica total del país es diferente, con mayor abundancia relativa en Portugal de rocas metamórficas y granitoides. Y por otro, la climatología es también similar, con clima mediterráneo en ambos casos, aunque algo más lluvioso en Portugal (855 mm de media anual) que en España (687 mm).

6.4. Relación con el coeficiente de agotamiento

En la Figura 6.3 se ha representado el mapa de coeficientes de agotamiento medios calculados para las diferentes masas de agua de España, así como los manantiales y arroyos afectados por el sismo de Lisboa. Se observa que las afecciones se distribuyen principalmente a lo largo de fracturas y fallas importantes (Figuras 6.4 y 6.5) pero también en aquellas zonas con α más altos.

En la Tabla 6.2 se presenta la distribución de los manantiales alterados según los coeficientes de agotamiento de los acuíferos de España, calculándose la incidencia porcentual (NNI) que presentaban los distintos grupos de acuíferos clasificados según el valor de su coeficiente de agotamiento.

Sin embargo, no se pueden sacar conclusiones de esta incidencia porcentual ya que no considera la ubicación de los puntos. Efectivamente, la distribución de los acuíferos afectados (Figura 6.3 y 6.6) es dependiente de las intensidades a las que estos fueron sometidos (Figura 4.3 y 6.6). Por ejemplo, si existen muchos acuíferos alterados en la zona SO de la Península Ibérica, no se debe sólo a que estos tienen mayor coeficiente de agotamiento; también a que se encuentran más cerca de la fuente del sismo y, en consecuencia, sufrieron mayor descarga de energía sísmica. En consecuencia, se puede objetar que los resultados que arroja la NNI deberían de haberse procesado matemáticamente para independizarlos de estos valores de

Coefficiente de agotamiento $\times 10^5$ [días ⁻¹]	Número de manantia- les	Incidencia por- centual NNI [%]	Incidencia nor- malizada $NI \times$ 10^3 [km ⁻²]	Incidencia porcentual normali- zada NI [%]
Fallas y contactos entre uni- dades geológicas significati- vas $\gg 10000$	86	33,2	70,25	59,6
≥ 10000	106	40,9	20,14	17,1
5000 – 10000	3	1,2	10,71	9,1
1000 – 5000	11	4,3	4,49	3,8
500 – 1000	6	2,3	2,45	2,1
100 – 500	19	7,3	1,65	1,4
0 – 100	28	10,8	8,07	6,9
Total	259	100	117,76	100

Tabla 6.2: Distribución de los manantiales alterados por el terremoto de Lisboa en España según coeficientes de agotamiento (anexo C).

intensidad.

Por otra parte, la superficie de las distintas unidades hidrogeológicas agrupadas por rango de coeficiente de agotamiento no es la misma. De tal manera que aquella unidad hidrogeológica con mayor área probablemente presentará un mayor número de manantiales afectados.

En conclusión, los datos de número de manantiales afectados en España tras el terremoto de Lisboa de 1755 (NNI de la Tabla 6.2) deben de ser procesados para (1) expresarlos por unidad de superficie y (2) normalizarlos a una misma intensidad sísmica (se tomará la intensidad como equivalente a energía sísmica). Es decir, se trata de aplicar fórmulas matemáticas que anulen la desfiguración que producen el distinto tamaño de las unidades hidrogeológicas y las distintas energías sísmicas a las que estas fueron sometidas.

Así pues, se ha aplicado un tratamiento matemático de los datos para que estos puedan ser comparados entre sí, a través de un índice normalizado (NI). La consecuencia física de esto es la de evaluar la respuesta de los acuíferos españoles durante el terremoto de Lisboa de 1755 como si todos hubiesen sufrido la misma descarga de energía sísmica; es decir, se anula el factor de gradación de intensidades por efecto de la distancia, que hace que los datos no puedan ser comparables sin ser ponderados.

Para los cálculos, se ha asumido que las fallas regionales importantes tienen una anchura media de 400 m; y para los contactos geológicos importantes, una anchura de 1 km.

A continuación, se describen los pasos matemáticos seguidos:

- Tabla A. En primer lugar, para cada grupo de acuíferos (unidad hidrogeológica), se ha clasificado el número de puntos de agua activados según la energía

Figura 6.6: En la matriz 6.1 (Tabla A del anexo C) se clasifican los puntos alterados en función de su unidad hidrogeológica y de la intensidad sísmica que los produjo.

sísmica a que estuvieron sometidos ($MMI \in [2, 8]$) (Figura 6.6):

$$\text{Activated Water Points} = \begin{pmatrix} AWP_{11} & \cdots & AWP_{17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ AWP_{71} & \cdots & AWP_{77} \end{pmatrix}. \quad (6.1)$$

- Tabla B. Desglosa el área de las unidades hidrogeológicas:

$$\text{Area of the Hydrogeological Units} = \begin{pmatrix} AHU_{11} & \cdots & AHU_{17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ AHU_{71} & \cdots & AHU_{77} \end{pmatrix}.$$

- Tabla C. Se expresa el número de puntos de agua activados por unidad de área para cada intensidad sísmica y unidad hidrogeológica:

$$\text{Tabla C} = \begin{pmatrix} \frac{AWP_{11}}{AHU_{11}} & \cdots & \frac{AWP_{17}}{AHU_{17}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{AWP_{71}}{AHU_{71}} & \cdots & \frac{AWP_{77}}{AHU_{77}} \end{pmatrix}. \quad (6.2)$$

- Tabla D. Se calcula la intensidad media del terremoto de Lisboa de 1755 en España ($M\bar{M}I$). Esta magnitud es respecto a la que se van a normalizar los datos:

$$\begin{aligned} \text{Tabla D} = M\bar{M}I &= \frac{\sum_{j=1}^7 (M_j \sum_{i=1}^7 \frac{AWP_{ij}}{AHU_{ij}})}{\sum_{i=1}^7 (\frac{AWP_{ij}}{AHU_{ij}})} = \\ &= \frac{2 \sum_{i=1}^7 \frac{AWP_{i1}}{AHU_{i1}} + 3 \sum_{i=1}^7 \frac{AWP_{i2}}{AHU_{i2}} + \dots + 8 \sum_{i=1}^7 \frac{AWP_{i7}}{AHU_{i7}}}{\sum_{i=1}^7 \frac{AWP_{i1}}{AHU_{i1}} + \sum_{i=1}^7 \frac{AWP_{i2}}{AHU_{i2}} + \dots + \sum_{i=1}^7 \frac{AWP_{i7}}{AHU_{i7}}}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

- Tabla E. Se normalizan todos los datos a la intensidad media calculada en el paso anterior ($M\bar{M}I$):

$$\text{Normalized Incidence} = NI_i \text{ [km}^{-2}] = \sum_{j=1}^7 \frac{M\bar{M}I}{M_j} \frac{AWP_{ij}}{AHU_{ij}}.$$

Esta incidencia puede ser expresada en forma porcentual para ver la afección sobre los distintos tipos de unidades hidrogeológicas:

$$\text{Normalized Incidence} = NI_i \text{ [%]} = \frac{\sum_{j=1}^7 \frac{M\bar{M}I}{M_j} \frac{AWP_{ij}}{AHU_{ij}}}{\sum_{i=1}^7 (\sum_{j=1}^7 \frac{M\bar{M}I}{M_j} \frac{AWP_{ij}}{AHU_{ij}})}. \quad (6.4)$$

Finalmente, se expone en el anexo C la Tabla con los cálculos efectuados. A la vista de estos resultados (índice NI [%] de la Tabla 6.2), se observa que los puntos de agua activados se presentan principalmente en las fallas y contactos geológicos (59,6 %) y secundariamente en los acuíferos de rocas duras, con $\alpha \geq 10000 \times 10^{-5} = 0,1 \text{ días}^{-1}$ (17,1 %), que destacan por encima del resto y muestran una tendencia general decreciente a medida que disminuye α .

Por otra parte, en la Tabla 6.2 se ha considerado que el coeficiente de agotamiento de las fallas es $\alpha \gg 10000 \times 10^{-5} = 0,1 \text{ días}^{-1}$, que es el valor máximo del mencionado mapa. Parece razonable esperar de las fallas estos valores porque suelen ser acuíferos confinados, con el coeficiente de almacenamiento S muy pequeño y una longitud l grande (ecuación 5.12).

Supóngase una falla F que drena a través de un manantial (Figura 6.7). Esta falla tiene un espesor saturado b pequeño (pocos metros), una longitud l (cientos de metros) y un buzamiento subvertical (no vertical) suficiente para que a poca profundidad el acuífero de la zona de la falla se confine.

Como se sabe (ecuación 5.12), el valor del coeficiente de agotamiento es:

$$\alpha = \frac{\pi^2 kb}{4Sl^2},$$

donde k es la permeabilidad, b el espesor saturado, S el coeficiente de almacenamiento y l la longitud característica del acuífero.

Se pueden asignar valores normales para una falla de este estilo:

Figura 6.7: Acuífero confinado en una falla conectada con la fuente sísmica.

- $k = 10^{-3}$ m/s para zonas fracturadas (Hoek y Bray, 1981).
- $S = 10^{-6}$ para acuíferos confinados como este.
- $b = 10$ m, ya que es una falla importante.

De esta forma, se tiene que:

- Si $l = 1000$ m $\Rightarrow \alpha = 2131,83$ días $^{-1}$.
- Si $l = 5000$ m $\Rightarrow \alpha = 85,27$ días $^{-1}$.
- Si $l = 10000$ m $\Rightarrow \alpha = 21,31$ días $^{-1}$.

Se puede observar que todos los $\alpha \gg 0,1 = 10000 \times 10^{-5}$ días $^{-1}$ y que a medida que disminuye la longitud l de la falla, aumenta α (su sensibilidad hidráulica ante los terremotos). Se podrían variar los otros factores (k, b, S) pero creemos que estos cálculos son suficientes para comprobar que las fallas tienen, en general, elevados α .

En conclusión, los valores de coeficiente de agotamiento α correspondientes a fallas de gran longitud, como las que comunican la superficie terrestre con las profundidades de la corteza, donde se generan los sismos, suelen ser altos ($\alpha \gg 0,1$ días $^{-1}$). Esto hace que sean más sensibles a la presión de poro que el resto de litologías.

6.5. Efectos hidrológicos persistentes

Según la encuesta, en el terremoto de Lisboa aparecieron, en al menos 103 sitios (50 en España y 53 en Portugal), nuevos manantiales y arroyos que no se conocían, así como el brote de manantiales efímeros casi siempre secos o que manaban en épocas lluviosas, además del incremento significativo del caudal de los manantiales y arroyos permanentes (Figuras 6.4 y 6.5). Hubo 30 casos como mínimo de disminución persistente de caudales, 28 en Portugal y 2 en España. En el SO de Portugal, los manantiales y arroyos persistentes debieron ser muchos más, a juzgar por la abundancia de los mismos en la zona centro, que es donde se han conservado las contestaciones a las encuestas de 1756. El incremento del caudal tardó un día en manifestarse, pero fue muy considerable, de tal manera que los arroyos y los manantiales que los alimentaban fueron capaces de mover todos los molinos sin necesidad de represas. En algunos casos, destruyeron las represas por desbordamiento. Esto supone caudales mayores de 50 y 100 l/s. Según la encuesta, se deduce que no hubo precipitaciones significativas un mes después del terremoto, por lo que estos caudales son producto en su mayor parte del incremento de la aportación en las descargas de agua subterránea.

Una característica general de todas estas corrientes de agua es que duraron bastante tiempo aunque, como las encuestas en España se recibieron en su mayoría entre 20 y 40 días después del terremoto, no se sabe cuándo los caudales se estabilizaron hasta los que se tenían antes del sismo, ni si superaron estos tiempos.

En Portugal, la existencia de dos encuestas desfasadas dos años aproximadamente ha permitido acotar mejor este dato: de los 30 manantiales o arroyos persistentes con información del tiempo de duración del incremento o disminución en sus caudales, 2 de ellos se sitúan entre 8 y 15 días, 4 entre 2 y 4 meses, 3 entre 4 y 5 meses, 9 en más de 4 meses, 5 en más de 5 meses y 7 en más de 2 años. En realidad, manantiales con más de dos años de duración pueden ser 14 si contamos todos los brotes de una misma zona de manantial, según se indica, aunque de manera poco precisa, en las respuestas de las encuestas. Hay 15 localidades donde se señala que en el mismo término municipal hubo al mismo tiempo disminución o secado de algunos manantiales y aumento de caudal o subida de nivel de pozos en otros. Sin descartar la compatibilidad en algunos casos, esta contradicción es solo aparente, ya que en la mayoría de los casos parece entenderse que se trata de un cambio en el lugar de brote del manantial y no de un verdadero secado, aunque haya casos que indudablemente lo son. Entre los últimos casos, la distribución a lo largo del centro de Portugal (que es dónde se ha llevado la encuesta) es aleatoria, afectando a todo tipo de litologías rocosas pero no a formaciones superficiales. La tendencia general es sin duda de incremento del caudal.

A pesar de esta limitación, gracias a estos datos se ha podido delimitar una amplia zona más cercana a la zona de la falla fuente del terremoto, que es donde se sitúan manantiales y arroyos con duración mayor a un mes, por lo menos. Es en esta zona donde se concentra la mayoría de la información y, según se refleja en la

encuesta en España, parece que los caudales de la inmensa mayoría de las corrientes y puntos de agua en este país no habían dado todavía síntomas de disminución, por lo que es de suponer que este régimen influenciado por el sismo durase todavía varios meses más, tal como se ha comprobado con las encuestas de Portugal más al O. Hay que recordar que el periodo de réplicas de este terremoto duro al menos un año (Martínez Solares, 2001), por lo que la zona no estaría estabilizada desde el punto de vista tectónico.

6.6. Color y composición

Hay 125 contestaciones de localidades donde hubo turbidez (91 en España y 36 en Portugal) en las fuentes y en algún pozo (Figura 6.8b), y de las cuales 27 contestan en España acerca de la duración de esta turbidez. Sobre esta duración, ya estén cerca o lejos de la falla fuente del terremoto, la media se sitúa en 2 días, no superándose los 5. Hay tres excepciones de más de 30 días en el manantial termal de Caldas de Maravella, en Girona, a más de 1500 km de distancia, en Alhama de Granada, con más de 15 días y en Peñíscola, con más de 10 (Figuras 6.4 y 6.5).

6.7. Variaciones del nivel de pozos

Hay referencias a 78 localidades con datos de pozos (64 en España y 14 en Portugal) (Figura 6.8a). En España todas las respuestas indican que subió el nivel de agua de los pozos menos en dos. En Portugal, suelen subir cuando coincide con casos cercanos de manantiales que han incrementado de manera persistente el caudal y, viceversa, desciende el nivel si disminuyen los caudales de los manantiales y arroyos. También hay algunos casos de balsas que representaban el afloramiento del nivel freático en zonas llanas que también subieron. En Portugal no hay apenas información cuantitativa. En España, sólo se tienen datos cuantitativos de subida de nivel de 17 localidades a los que hay que sumar otros 16, de los cuales se tenía la profundidad inicial y que salió el agua por el brocal de los pozos, por lo que hay que considerar que al menos subió esa profundidad (es un mínimo). Aunque son pocos datos, la red de pozos está distribuida de manera amplia y se puede construir una distribución espacial continua de la respuesta del nivel del agua subterránea a este terremoto.

En España, en casi todos los casos se produjeron ascensos mínimos entre 0 y más de 8 m, que corresponden a las áreas más cercanas a la falla fuente del terremoto, y también en aquellas localidades más cercanas a las fracturas regionales importantes, donde la intensidad fue mayor. Se ha hecho una tentativa de isosubidas de niveles (Figura 6.8a), donde se ha podido pintar relativamente bien el límite con subidas por encima de los 5 m, que cubre la mitad del territorio peninsular.

La zona por encima de los 5 m es la más cercana al epicentro y donde la intensidad está por encima de V aproximadamente. Son llamativas las espectaculares

(a) Distribución geográfica del incremento del nivel del agua en los pozos (metros). (1) Incremento del nivel de los pozos (metros); (2) Descenso del nivel de los pozos (metros).

(b) Turbidez y su duración (días) en manantiales y pozos.

Figura 6.8: Distribución de las variaciones en el nivel de agua y de la turbidez de los pozos.

subidas de más de 80 m para cuatro pozos (suponemos puntuales) de gran diámetro en una alineación SO-NE. En algunos casos originaron arroyos nuevos.

Capítulo 7

Discusión: los efectos hidrogeológicos inducidos por el terremoto de Lisboa de 1755 en España y Portugal

7.1. Introducción

Como se vio en el capítulo 3, los efectos hidrogeológicos causados por los terremotos incluyen la licuefacción de suelos (sección 3.2), volcanes de fango (sección 3.3), geiseres (sección 3.4), aparición de nuevos manantiales o desaparición de los existentes e incremento de la descarga en manantiales y arroyos (sección 3.5), cambios en las propiedades físicas y químicas del agua subterránea (sección 3.7) o en su distribución de presiones (sección 3.6).

A la vista de los resultados recopilados para el terremoto de Lisboa de 1755 (capítulo 6), se discutirán en los siguientes epígrafes las causas del impacto sísmico en la licuefacción de los suelos (sección 7.2), en el caudal de los manantiales y corrientes de agua (secciones 7.3 y 7.4), en el color y composición del agua (sección 7.5) y la variación en el nivel de los pozos (sección 7.6).

Finalmente, se verán las alteraciones hidrogeológicas y el mecanismo focal del terremoto de Lisboa (sección 7.7).

Merece una especial atención la discusión sobre la sensibilidad de los acuíferos según el coeficiente de agotamiento y el mantenimiento del flujo que, por su entidad, se estudiará en el siguiente capítulo.

7.2. El impacto sísmico en la licuefacción de los suelos

En España, la licuefacción se da preferentemente en formaciones superficiales cuaternarias de marisma y aluviales (74 %) próximas a la zona cercana de la falla fuente del terremoto. Asimismo, se da secundariamente en arenas pliocenas y miocenas (26 %). En Portugal, según Vaz y Zêzere (2016), la licuefacción afectó a formaciones geológicas superficiales (63 %) y rocas sedimentarias y volcánicas estratificadas (29 %). En ambos casos, la zona de licuefacción coincide en gran medida con la zona de manantiales y arroyos persistentes. Esta licuefacción contribuyó a la descarga subterránea de ríos y arroyos y al incremento de la turbidez de las aguas durante el terremoto.

7.3. La afección de manantiales y corrientes de agua: La sensibilidad de las fallas

Es significativo que gran parte de los manantiales influenciados por el terremoto se encuentren en fallas, lo que puede explicarse, entre otras causas por:

1. La buena comunicación de las fallas activas con las zonas profundas (altas presiones de poro) y con la falla sísmica.
2. La preferente transmisión de las ondas sísmicas a su través.
3. El hecho de que las fallas son frecuentemente acuíferos confinados.
4. El alto valor de coeficiente de agotamiento de las fallas (sección 6.4).
5. La posible activación de las fallas por efecto de un sismo.

En España, de los 30 manantiales y arroyos de más de 1 mes de duración, situados al SO, 19 de ellos (63 %) están relacionados claramente con las fracturas (14 de las cuales tienen orientación NE-SO y 5 son cabalgamientos E-O de la zona sur portuguesa). Esto no significa que las 11 restantes (37 %) no esté relacionado con fracturas, sino que no se sabe. Estas fracturas NE-SO corresponden a la falla del Guadalquivir y otras que se prologan hacia Portugal, como la de Plasencia-Alentejo (Figuras 6.4 y 6.5). En Portugal, el 90 % de los manantiales y arroyos persistentes están relacionadas con fallas (Figuras 6.4 y 6.5), y más de la mitad están asociados a tres fallas importantes y que son fallas secundarias de la de Azores-Gibraltar: fallas de Nazaré, Bajo-Tajo y Plasencia-Alentejo.

Es también indicativo que gran parte de los manantiales están asociados simultáneamente a las fracturas y a los granitos. Es frecuente que los manantiales se alineen en los tramos de estas grandes fracturas que cruzan los plutones graníticos y no al resto de las litologías metamórficas que también las atraviesan, como se ve en

los mapas (Figura 8.3). También los puntos de agua se alinean en el Terciario de la Cuenca del Duero marcando la traza de las fallas que afectan al sustrato por debajo y donde las vibraciones en sus proximidades han sido mayores. Es de indicar también, que una parte relevante de los manantiales afectados son de carácter termal (20 %), a veces situados a más de 1500 km de distancia, dentro de la Península Ibérica y que están asociados a fallas importantes y profundas (Figuras 6.4 y 6.5). O a más de 2000 km, en Francia, Alemania y Bélgica (Figura 4.3). Es posible que en la sensibilidad de las fallas de sistemas termales ante una acción exterior intervenga el valor más alto de la difusividad hidráulica D que hay respecto a sistemas hidrogeológicos menos profundos. Al aumentar la conductividad hidráulica con la disminución de la viscosidad del agua subterránea (al aumentar la temperatura con la profundidad), también aumenta la transmisividad. Es decir, las fallas son más profundas que otros sistemas hidrogeológicos y, conforme aumenta la profundidad y la temperatura de la corteza, disminuye la viscosidad del agua subterránea y aumenta su temperatura. En consecuencia, aumenta la difusividad del acuífero.

7.4. La afección de manantiales y corrientes de agua: La sensibilidad de la litología

Teniendo en cuenta el índice A , se observa que las rocas plutónicas (en su mayoría son granitoides) son las más sensibles a los efectos sísmicos porque, aunque solo suponen el 7,4 % del número total de manantiales de España y Portugal (el valor más bajo de todas las litologías), representan el 24,1 % de los manantiales alterados: $A = 3,25$ (Tabla 6.1). Si se considera el valor del índice solo para España (A_S), sería todavía más acusado: $A_S = 6,7$. Le siguen las rocas carbonáticas con $A = 1,8$ y las metamórficas con $A = 1,47$. En el caso de considerar España solamente, las rocas metamórficas serían las segundas más afectadas con $A_S = 3,84$ y después las carbonáticas con $A_S = 1,27$. En este sentido, hay que tener en cuenta que al considerar Portugal, la muestra no es tan uniforme como en España, ya que las respuestas conservadas se concentra en el centro del país, donde las rocas calcáreas son más abundantes. Por eso, creemos que la sensibilidad de las rocas plutónicas y metamórficas es todavía más acusada. Podría pensarse que en la zona más cercana a la falla fuente del terremoto abundan estos dos últimos tipos de rocas, pero entre ellas dos se pueden precisamente comparar. Además, las que están más cerca son las metamórficas. Pero es que, incluso en zonas alejadas, es raro no observar manantiales afectados en granitos. Este hecho fue observado también y por ejemplo por (Brodsky et al., 2003) para pozos perforados en granito en zonas alejadas de la fuente del sismo.

Los aluviales de zonas alejadas son poco sensibles y en las zonas epicentrales parece que se produce sobre todo licuefacción. Tampoco son especialmente sensibles las cubetas sedimentarias terciarias, en especial la Cuenca del Ebro, que es la única donde son claramente dominantes los sedimentos arcillosos y las evaporitas. En la Figura 6.2, la Cuenca arcillosa del Ebro se presenta como una isla carente de

afecciones importantes.

Se quiere indicar, finalmente, que el grupo de «Otras rocas (conglomerados, areniscas, rocas volcánicas, yesos)» no tiene asignados manantiales alterados, lo cual debe ser así en realidad para las volcánicas y conglomerados (relativamente poco abundantes) así como para los yesos (no son manantiales potables y salen del interés de las encuestas). Las areniscas se han incluido dentro de «Otras rocas» ya que es difícil distinguir si un manantial alterado por el sismo drena de esta litología únicamente o también de las otras rocas metamórficas a las cuales es frecuente que se asocie, como ocurre con el Paleozoico del Macizo Ibérico portugués y español. Es decir, es posible que algunos manantiales de areniscas alterados por el sismo estén ubicados en el grupo de «Rocas Metamórficas». En todo caso, las areniscas representan el 6,3 % de toda la superficie de la Península Ibérica, lo cual creemos no resta validez a estas aproximaciones.

Se ha de tener en cuenta que la geología de esta zona donde ocurrieron la mayoría de estos incrementos duraderos corresponde a rocas entre muy impermeables y poco permeables, como pizarras, esquistos y granitos, excepto en la zona sur costera de España donde aparecen aluviales y calcarenitas permeables. En estas últimas y por su carácter de acuíferos homogéneos, el incremento se realizó mediante descarga difusa y lineal a arroyos y no de manera puntual a través de manantiales. En muy pocos casos hubo incrementos de caudal en otras formaciones medianamente permeables (cuarcitas). Por litologías, destacan claramente los granitos, donde se concentran en España el 50 % de los incrementos de los manantiales y arroyos persistentes, aunque muchos están también en las fracturas SO-NE.

Según Sanz Pérez (1996), el caudal medio de los esquistos, gneises y rocas plutónicas de España es de 0,041/s y es muy raro que superen los 101/s. El de las cuarcitas es de 0,121/s y tampoco superan los 501/s. Según los datos de la encuesta, los incrementos de caudal de los manantiales situados en estas litologías superaron ampliamente estos caudales, lo cual quiere señalar el origen interno del incremento y no el meteórico.

Fuera de esta zona (SO), los casos afectaron sobre todo a manantiales. En este sentido, es de destacar, una vez más, la sensibilidad de los termaleas asociados a grandes fracturas, como los de Mula, Alhama de Almería o de Caldas de Malavella, en Gerona, por ejemplo, donde el incremento de los caudales se prolongó por lo menos más de un mes. Asimismo, hubo alteraciones termaleas en zonas tan alejadas como Francia, Bélgica y Alemania, a más de 2000 km de distancia de la falla fuente del terremoto (Figura 4.3).

Los mecanismos que se han propuesto para explicar la respuesta de corrientes y manantiales a los terremotos son: la consolidación y licuefacción en formaciones geológicas superficiales (por ejemplo, depósitos aluviales que, como no son formaciones geológicas profundas, generalmente no están conectados a la fuente de presión de los terremotos) (Manga, 2001; Manga et al., 2003; Montgomery y Manga, 2003), la expulsión de los fluidos de la corteza media como resultado del esfuerzo elástico sísmico (Muir-Wood y King, 1993) y el cambio de permeabilidad cerca de la superfi-

Grupos litológicos	m_e [%]	$1/m_e$	Orden
1. Aluviales	15	0,067	5
2. Rocas carbonatadas	3	0,333	3
3. Limos, arcillas, arenas, margas y margocalizas	5	0,200	4
4. Rocas metamórficas	0,3	3,333	2
5. Rocas plutónicas	0,2	5	1

Tabla 7.1: Porosidad media de los distintos grupos litológicos.

cie (Briggs, 1991; Rojstaczer et al., 1995; Rojstaczer y Wolf, 1992; Sato et al., 2000; Tokunaga, 1999; Xue et al., 2013).

Dejando aparte el grupo de los aluviales (por no ser profundo y no estar conectado con la fuente de presiones del sismo) y nos restringimos a las litologías más o menos rocosas de la Tabla 6.1, estas se pueden ordenar de mayor a menor sensibilidad hidrogeológica a los terremotos de esta manera: granitos, rocas metamórficas, rocas calcáreas y rocas arcillosas. Esto concuerda con la profundidad que cada tipo de roca alcanza en la corteza terrestre no plástica (Figura 7.1). Y también sigue el orden inverso respecto a la porosidad media de estas rocas (Tabla 7.1).

Figura 7.1: Diagrama que muestra el dominio de las fallas en función de la profundidad y de la litología. Tomado de Mattauer (1976).

Así pues, las rocas graníticas bajan a más profundidad y transmiten mejor las presiones de la zona de expulsión de fluidos como resultado del esfuerzo elástico cosísmico de la corteza media. Este mayor espesor saturado en los granitos y otras rocas duras podría explicar el gran volumen de agua expulsado por esta litología y otras rocas duras en el terremoto de Lisboa de 1755 en el campo intermedio.

Por otro lado, los granitos tienen una porosidad y coeficiente de almacenamiento muy pequeños, y un coeficiente de agotamiento grande, por lo que pequeños caudales inyectados desde abajo (aunque sean pequeños), pueden suponer un ascenso importante del nivel piezométrico. Es exactamente lo que ocurre pero al revés,

con la experiencia de la afección en manantiales durante la perforación de los túneles en granito, donde pequeños caudales drenados por el túnel suponen descensos muy grandes en el nivel piezométrico, con el consiguiente secado y disminución de manantiales y arroyos.

7.5. Color y composición del agua

A la intensidad de la turbidez contribuyó no solo la magnitud del terremoto, si no su larga duración y su manifestación en tres temblores seguidos con pausas intermedias. El paso de las ondas sísmicas agitó los sistemas acuíferos, limpiando de finos la matriz de los acuíferos superficiales detríticos y retirando el relleno de las fracturas y diaclasas. Este incremento del flujo ascensional, a modo de pulsos según las tres sacudidas observadas y sus dos pausas, debió originar un flujo-reflujo con la consiguiente rotura de puentecillos de arcilla. Es parecido al efecto de desarrollo de pozo mediante pistoneo donde hay una inyección de flujo y reflujo para romper puentes y limpiar de finos el entorno del pozo y así aumentar la permeabilidad del acuífero y el caudal del pozo. También hay acuíferos kársticos que son sensibles a la turbidez porque los terremotos producen oscilaciones en el nivel de los ríos y conductos subterráneos alterando sus orillas de arcilla (ejemplo: Ucero, Vozmediano y otros del terremoto de Lisboa de 1755)

Por otro lado, se observa que la presencia de turbidez en los manantiales no guarda tanta relación con la intensidad y que primero se estabiliza la turbidez en los manantiales y después el caudal. Ya que una gran parte de los manantiales se localizan en los puntos de menor cota de los contactos permeables-impermeables o asociados a fracturas, el color de la turbidez del agua de las fuentes provocada por el terremoto está íntimamente asociado al color de estas formaciones geológicas próximas a las mismas, o al relleno de las fracturas. El color de la matriz arcillosa en los acuíferos detríticos o el color del relleno de las fracturas, que depende a su vez de su composición mineralógica, es determinante.

En las rocas graníticas donde hay fracturas rellenas de óxidos de hierro se origina turbidez roja, o turbidez blanca si están rellenas de caolín, producto de la alteración de los feldespatos. En Portugal, de acuerdo con Vaz y Zêzere (2016), un 20 % de los cambios en la calidad del agua están relacionados con agua de color lechoso, entre los que hay seguramente bastantes casos relativos a zonas graníticas. Los rellenos de las fracturas de las cuarcitas armoricanas del Ordovícico, por ejemplo, suelen ser de óxidos de hierro rojos. No son frecuentes los hidróxidos (color rojo), pero también hay algún caso de color amarillo. Los manantiales de acuíferos de rocas carbonáticas se enturbiaron de color rojo por la arcilla de decalcificación, tan frecuente en los conductos kársticos, o de color blanco, si tenían cerca a las arenas caoliníferas de la Facies Utrillas o margas blanquecinas en su base inferior impermeable.

Respecto a la composición, se ve cómo el sismo provoca un incremento del SH_2

en las fuentes de la facies Weald porque libera el agua más profunda (la concentración de este gas aumenta con la profundidad). Hay acuíferos, como el Weald de la Región de Cameros, que están confinados en pequeños acuíferos de capa y de fractura, y a cierta profundidad tienen mucho SH_2 por presencia de piritas. Ante pequeñas sacudidas dinámicas, se producen aumentos de SH_2 , como la fuente de Suellacabras (Soria), que era potable antes del terremoto. Igual ocurre con el contenido total de Fe (no sólo en disolución, sino también en arrastre), que aumenta con la profundidad y se oxida en la salida, manifestándose entonces de manera evidente el color rojo. De manera semejante ocurre con las aguas salinas cloruradas profundas de la facies Keuper, donde el sismo provoca un bombeo del agua más profunda. En las zonas cenagosas cuaternarias, ricas en materia orgánica anióxica, esta sale a la superficie, bien como licuefacción, bien en manantiales de color negro.

Por lo general, parece que en este terremoto no se observaron anomalías geoquímicas y de temperaturas significativas. Esto es sin embargo lo normal en la mayoría de los terremotos, lo cual ha sido argumentado como una objeción al origen cosísmico de estos fluidos, expulsados al exterior y que se suponen debieran proceder de la corteza media (Rojstaczer et al., 1995). Sin embargo, pensamos que esto se podría explicar porque lo que se transmite de abajo a arriba es fundamentalmente la presión y no el fluido. Este aumento del nivel piezométrico en superficie hace que el fluido que salga sea sólo el superficial.

7.6. Variaciones en el nivel de los pozos

En general, en el terremoto de Lisboa de 1755 hay una sola respuesta positiva de incremento del nivel del agua de los pozos y que suponemos corresponde a observaciones de corto plazo en el mismo momento del terremoto. Hay una tendencia de disminución de la altura de oscilación de los pozos a medida que aumenta la distancia de la falla rota.

Se ha especulado sobre los diferentes mecanismos que causan las oscilaciones de los pozos a corto plazo (minutos) o en periodos más largos (horas y días); por ejemplo, en Shalev et al. (2016) se propone que los cambios de incremento de niveles de pozos sostenidos a corto plazo por efecto del tránsito de las ondas sísmicas de terremotos lejanos son producidos por compactación. En el campo cercano, pero fuera de la zona inmediata de la falla rota, la consolidación de sedimentos sueltos puede conducir a un aumento escalonado en el nivel del agua. Esta consolidación debió ser especialmente importante en este terremoto por efecto de la duración del mismo, y porque los pozos eran poco profundos y estaban excavados en formaciones superficiales y zonas alteradas susceptibles de consolidarse; esto explicaría por qué en la mayor parte de ellos subió el nivel del agua. En Portugal, la subida o el descenso de los niveles son coherentes con el incremento o la disminución de los manantiales de los acuíferos cercanos a ellos asociados. Sin embargo, en las rocas cristalinas fracturadas, el patrón de cambios en el nivel del agua puede imitar la

deformación volumétrica cosísmica. En el campo lejano, las elevaciones instantáneas del nivel freático en los pozos observadas durante la sacudida parecen ser la respuesta transitoria al paso de las ondas sísmicas en subsuperficie que produce cambios de tensión o cambios alrededor del pozo.

7.7. Las alteraciones hidrogeológicas y el mecanismo focal del terremoto de Lisboa

A pesar de la limitación de disponibilidad de datos cuantificados en este terremoto, los flujos de fluidos inducidos tectónicamente después del sismo pueden tener implicaciones importantes para nuestra comprensión del comportamiento cinemático de la supuesta falla origen del mismo.

Las observaciones hidrogeológicas generadas por este terremoto corresponden, como se ha dicho, a un incremento generalizado de la descarga postsísmica que abarca todo el cuadrante SO de la Península Ibérica y que supone más de 90000 km² (Figuras 6.4 y 6.5). Quiere esto decir que este territorio ha tenido una sola respuesta respecto a los esfuerzos tectónicos actuantes en la falla sísmica. La gran magnitud de este terremoto, el volumen de agua liberado en un periodo de tiempo de 1 a algo más de 24 meses y su distribución en una gran extensión, sugieren que en este evento estuvo involucrada una profundidad considerable de corteza.

Como se dijo en la sección 4.2, una de las posibilidades sobre la fuente sismogénica es que este terremoto estuviera asociado a la falla Azores-Gibraltar; en su parte de falla inversa, a partir de los 13°O, donde la placa africana subduce bajo la euroasiática. Sin embargo, este tipo de modelo no explicaría las alteraciones hidrogeológicas, ya que la placa euroasiática comprimida antes del terremoto se relajaría después del mismo, aumentando la porosidad y disminuyendo por consiguiente los caudales y niveles, al revés de lo observado, siguiendo así los trabajos de Muir-Wood y King (1993) para una falla inversa pura.

Sin embargo, se explica muy bien si el modelo cinemático de este terremoto correspondiese con una falla de desgarre, como la de Azores-Gibraltar, donde el mayor desplazamiento de la placa eurasiática respecto de la africana generaría un estado progresivamente más traccionado en el entorno norte (incluyendo seguramente la parte SO de la Península Ibérica) de esta falla durante la fase de deformación elástica antes del sismo (Figura 7.2a). Tras el terremoto y dentro de la fase postsísmica, se produciría una relajación del terreno y disminución de las tracciones. Al volver el terreno al estado tensional de inicio de ciclo sísmico, el almacenamiento específico de la roca tendería a disminuir por la reducción de la porosidad, incrementándose por ello las presiones de poro que ocasionaría la liberación de fluidos (Figura 7.2b). Estos fluidos utilizarían como drenes las fallas de gran longitud que comunican precisamente la falla de Azores-Gibraltar con la Península Iberica, tal como la falla de Messejana (también llamada falla de Plasencia-Alentejo), falla del Bajo-Tajo, falla de Nazaré y falla del Guadalquivir (detalle de la Figura 6.5).

Figura 7.2: Explicación de las alteraciones hidrológicas del terremoto de Lisboa de 1755 considerando como fuente sismogénica la falla de Azores-Gibraltar y un modelo cinemático de mecanismo focal correspondiente a una falla de desgarre.

Es muy significativo que la mayoría de los manantiales persistentes y la totalidad de los que duraron más de dos años se concentren en estas citadas fallas secundarias. La gran duración de las descargas de estas fallas ha sido seguramente debido a:

- La magnitud de las presiones de fluido generadas y
- A la buena comunicación hidráulica de estas fallas secundarias con la falla fuente del terremoto y/o con la zona próxima postsísmica más comprimida.

Si se prolongan estas fallas hacia la de Azores-Gibraltar, es significativo que el segmento activado de la misma se emplaza en su mayor longitud en la parte correspondiente a la falla de desgarre (Figuras 6.4 y 6.5).

La localización y distribución aleatoria, en el centro de Portugal, de los escasos lugares que experimentaron descenso de caudales o casos mixtos de subida y descenso, no interfiere en lo dicho sobre la localización de la fuente sísmica o del mecanismo focal. Quizá indique que dentro de una zona con un mecanismo predominante de expulsión de los fluidos de la corteza media como resultado del esfuerzo elástico cósmico (Muir-Wood y King, 1993) ha habido también cambios de permeabilidad en las rocas cercanas a la superficie (Briggs, 1991; Rojstaczer y Wolf, 1992; Rojstaczer et al., 1995; Tokunaga, 1999; Sato et al., 2000).

Capítulo 8

Discusión: el coeficiente de agotamiento como parámetro hidráulico de sensibilidad de los acuíferos a los sismos

8.1. Introducción y objetivos del capítulo

La acción sísmica produce alteraciones hidráulicas en los acuíferos. Estos cambios dependerán fundamentalmente de tres grandes grupos de parámetros (Figura 8.1):

1. Estudio del sismo en sí mismo (parámetros característicos del terremoto). Aquí se pueden señalar como descriptores fundamentales del mismo su magnitud, su duración, la energía liberada, la distancia del hipocentro al epicentro, etc. Naturalmente, son asimismo importantes las réplicas posteriores que pudieran sucederse relativas al primer sismo.
2. Estudio de la propagación de la energía sísmica para determinar qué porción de ella tiene incidencia sobre el acuífero. El segundo grupo de parámetros está asociado a los mecanismos de transmisión de la energía sísmica desde su lugar de descarga (epicentro o hipocentro, según se considere) hasta el acuífero. Se deben considerar aquí características de transmisión tales como la distancia entre el sismo y el acuífero, los tipos de medios que atraviesa la onda (agua y diferentes litologías), discontinuidades en el terreno tales como fallas, montañas, etc.
3. El estudio de la alteración hidráulica que sufre el acuífero por efecto de la descarga sísmica. Finalmente, el tercer grupo de parámetros a considerar en la manifestación hidráulica del acuífero ante un terremoto son los característicos del acuífero. En este sentido, la hidráulica subterránea y la geología señalan

diversas variables y características a tener en cuenta, tales como la configuración del acuífero (libre o confinado), su régimen (influenciado o no), su tamaño (longitud característica l), su volumen hidrodinámico V_h , su espesor saturado b , la permeabilidad del terreno k , y su coeficiente de almacenamiento S .

Figura 8.1: Pasos para el estudio de la influencia de un sismo en un acuífero.

En este capítulo sólo se estudia el último paso para tratar de explicar de forma teórica los resultados recogidos en el capítulo 6. Es decir, se analizarán las relaciones entre la afectación de un acuífero una vez se ha descargado sobre él la energía sísmica. Asimismo, se tratará de determinar qué características de los acuíferos les hacen más sensibles desde el punto de vista hidráulico a igualdad de energía sísmica descargada sobre ellos. Para ello, se hace un análisis teórico acerca de si el coeficiente de agotamiento α de un acuífero puede ser entendido como un parámetro que explique la relación entre las afecciones hidráulicas del acuífero y la acción sísmica descargada sobre él.

8.2. Influencia de la recarga, la extracción por bombeo y la acción sísmica en la curva de descarga de un acuífero

Un acuífero libre que descarga a través de un manantial de caudal Q puede sufrir acciones exteriores como una recarga natural de origen meteórico R , la extracción de agua subterránea mediante un pozo de bombeo, o la de inyección por recarga artificial (bombeo con signo contrario). Esto último pudiera asemejarse al pulso de presión B de un sismo, aunque en este caso proviene de abajo y no de arriba (Figura 8.2).

La curva de descarga de un manantial que no es afectado por una recarga o bombeo puede ser calculada según Maillet (1905) mediante una ecuación de tipo exponencial:

$$Q(t) = Q_1 e^{-\alpha t}, \quad (8.1)$$

donde:

- t [T] es el tiempo transcurrido desde el inicio de la recesión del manantial.
- $Q(t)$ [L³T⁻¹] es el caudal de descarga del manantial.

Figura 8.2: Modelo conceptual de un acuífero libre bajo el efecto de un sismo y que descarga a través de un manantial de caudal Q existente antes del terremoto. Se distinguen: recarga natural de origen meteórico R , flujo B de abajo a arriba debido al incremento de la presión de poro producido por el terremoto, volumen hidrodinámico hidrodinámico V_1 anterior al terremoto, volumen hidrodinámico V_2 debido al terremoto.

- Q_1 [L^3T^{-1}] es el caudal del manantial en el inicio de la recesión; es decir, $Q_1 = Q(t_1)$.
- α [T^{-1}] es el coeficiente de recesión de la curva de descarga del acuífero (Figura 5.3). Es también llamado coeficiente de agotamiento del acuífero.

La curva descrita por la expresión 8.1 y representada en la Figura 5.3 puede ser conocida mediante la observación del comportamiento del manantial en periodos de no recarga (sequía o recesión).

Para obtener el volumen almacenado en un acuífero por encima de la cota del manantial (volumen hidrodinámico) en el instante de inicio de la descarga ($t = t_1$) basta con integrar la expresión 8.1 entre este tiempo e infinito:

$$\begin{aligned} V_1 = V(t_1) &= \int_{t_1}^{+\infty} Q(t)dt = \int_{t_1}^{+\infty} Q_1 e^{-\alpha t} dt = \\ &= -\frac{Q_1}{\alpha} (e^{-\alpha\infty} - e^{-\alpha 0}) = \frac{Q_1}{\alpha} [L^3] . \end{aligned} \quad (8.2)$$

La expresión 8.2 se puede expresar de forma discreta para un periodo de tiempo i como:

$$V_i = \frac{Q_i}{\alpha} [L^3] . \quad (8.3)$$

A continuación, se considera la recarga R_i [L^3T^{-1}] que debido a las precipitaciones se produce en el acuífero en el paso de tiempo i (de duración temporal t_p). El volumen hidrodinámico en el periodo de tiempo $i + 1$ se puede calcular haciendo un balance de caudales:

$$V_{i+1} = V_i - Q_i t_p + R_i t_p. \quad (8.4)$$

Aplicando sobre el balance 8.4 la expresión de 8.3, se obtiene la ley de descarga en régimen natural:

$$\begin{aligned}
V_{i+1} &= V_i - Q_i t_p + R_i t_p \Rightarrow \{\text{ex. 8.3}\} \Rightarrow \\
\Rightarrow \frac{Q_{i+1}}{\alpha} &= \frac{Q_i}{\alpha} - Q_i t_p + R_i t_p = Q_i \left(\frac{1 - \alpha t_p}{\alpha} \right) + R_i t_p \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow Q_{i+1} &= Q_i (1 - \alpha t_p) + \alpha t_p R_i \quad [\text{L}^3 \text{T}^{-1}] .
\end{aligned} \tag{8.5}$$

Sobre la expresión 8.4 se podría considerar asimismo la acción antrópica introduciendo el valor de extracción de agua de un acuífero por parte del hombre (signo contrario a la recarga).

Supóngase ahora que el manantial sufre una acción sísmica. Esta acción, desde el punto de vista hidráulico, se puede entender como un caudal de inyección de agua ascendente desde las profundidades del acuífero debido al aumento de presión de poro producido por el terremoto. Este caudal de bombeo positivo se denotará por B $[\text{L}^3 \text{T}^{-1}]$.

Se tratará ahora de encontrar la ley de descarga del manantial en la nueva situación de acción sísmica a partir de la ley de descarga en régimen natural (expresión 8.5).

El volumen hidrodinámico afectado por el sismo se denotará con una coma y se calcula aplicando un balance de caudales:

$$\begin{aligned}
V'_{i+1} &= V_i - Q_i t_p + R_i t_p + B_i t_p \Rightarrow \{\text{ex. 8.3}\} \Rightarrow \\
\Rightarrow \frac{Q'_{i+1}}{\alpha} &= \frac{Q_i}{\alpha} - Q_i t_p + R_i t_p + B_i t_p \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow Q'_{i+1} &= Q_i (1 - \alpha t_p) + \alpha t_p R_i + B_i \alpha t_p \Leftrightarrow \{\text{ex. 8.5}\} \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow Q'_{i+1} = Q_{i+1} + \alpha t_p B_i .
\end{aligned} \tag{8.6}$$

La expresión 8.6 se puede interpretar enunciando que el caudal de descarga de un acuífero en un determinado paso de tiempo que sufre una acción sísmica (cuantificada como un volumen de bombeo B) será igual al caudal de descarga de dicho acuífero en el citado paso de tiempo en condiciones de no afección sísmica más el caudal de bombeo sísmico del paso anterior multiplicado por el tiempo de paso y por el coeficiente de agotamiento del acuífero. Es decir y concluyendo, que el coeficiente de recesión α es un parámetro interno del acuífero que, además de su comportamiento en sequía, también describe la inercia hidráulica del acuífero ante la afección sísmica. Puede servir para comparar la sensibilidad de los acuíferos cuando son sometidos a una igual cantidad de energía sísmica (que produce un aumento de la presión de poro y genera un bombeo sísmico B), de forma que, a mayor α , mayor sensibilidad hidráulica del acuífero.

Asimismo, como se observa en la expresión 8.6, la afección en un manantial debido al incremento de la presión de poro generado por el terremoto dependerá lógicamente del valor del flujo B originado por esta presión. Y esto dependerá en

última instancia de la magnitud del terremoto y de la distancia al epicentro o a la falla fuente, porque esta presión aumenta con la magnitud y disminuye con la distancia.

Esta justificación teórica coincide con el análisis de los datos históricos recogidos del terremoto de Lisboa de 1755 (capítulo 6), que llegó a la conclusión de que:

- Las fallas (acuíferos confinados) mostraron mayor afección hidráulica.
- Los acuíferos con un elevado coeficiente de agotamiento experimentaron asimismo mayor afección hidráulica.

8.3. Relación conceptual entre el coeficiente de agotamiento y la afección hidráulica de un acuífero ante la acción sísmica

En el capítulo 6, a partir de la información disponible del terremoto de Lisboa, se ha podido correlacionar positivamente la afección hidráulica de un acuífero con el coeficiente de agotamiento α del mismo, concluyendo que a igualdad de descarga sísmica sobre dos acuíferos, el de mayor coeficiente de agotamiento se verá más afectado desde el punto de vista hidráulico. En la sección anterior, de una forma analítica, se ha llegado a la misma conclusión.

A continuación, se verá la relación entre las variables que configuran el coeficiente α y la respuesta de un acuífero a un sismo. Es decir, se estudiarán la permeabilidad k , el espesor saturado b , el coeficiente de almacenamiento S y la longitud l del acuífero.

- A mayor permeabilidad k e igualdad del resto de parámetros, el agua atravesará más rápidamente el acuífero. Es decir, el flujo de bombeo B producido por el sismo se manifestará más rápidamente en el manantial. Otra forma de entenderlo es que a mayor permeabilidad, más facilidad de propagación (conductividad) de la presión de poro en el acuífero, cuyas manifestaciones son el incremento del nivel piezométrico y del caudal.
- El espesor saturado b , como ya se ha visto (sección 5.3), es la profundidad del acuífero medida sobre la horizontal del manantial y, cuanto mayor sea, más agua supurará el volumen saturado de terreno cuando sea comprimido por efecto de la acción sísmica. Así pues, es razonable que la afección hidráulica sea directamente proporcional a esta altura.
- El coeficiente de almacenamiento S cuantifica la cantidad de volumen ocupado por agua por unidad de volumen real del acuífero. A mayor coeficiente de almacenamiento, mayor cantidad de agua almacenada por volumen específico

de acuífero (mayor «densidad» de agua). Si la acción sísmica se asocia a un bombeo inferior en el acuífero, cuanto menos coeficiente de almacenamiento, más volumen real ocupará el agua bombeada por el sismo y por tanto, más subirá el nivel piezométrico. Naturalmente, cuanto mayor sea esta subida, mayor será la manifestación hidráulica en el manantial. Es decir, el coeficiente de almacenamiento es inversamente proporcional a la afección hidráulica del acuífero.

- Finalmente, la longitud característica del acuífero l , entendiendo esta como la distancia horizontal entre el manantial y el punto del acuífero más alejado del mismo, también influye en la manifestación hidráulica del sismo. Cuanto más grande sea l más tardará el agua en viajar por el acuífero hasta el manantial; es decir, más tardarán en manifestarse los efectos de la descarga sísmica. Un análisis más profundo acerca de la influencia de la longitud característica se hará en la sección 8.4.

Así pues, teniendo en cuenta la definición de este parámetro α (definición 5.12), es razonable que la afección sísmica de un acuífero sea proporcional a la transmisividad $T = kb$ e inversamente proporcional al coeficiente de almacenamiento S . Efectivamente, la sobrepresión que un terremoto produce en el subsuelo es asimilable a un pulso de recarga subterránea B que produce un aumento del nivel piezométrico del acuífero. Y este aumento del nivel piezométrico tendrá mayor manifestación de caudal sobre el manantial del acuífero cuanto mayor sea la transmisividad del terreno. Asimismo, la razón de proporcionalidad entre el aumento del nivel piezométrico del acuífero y el volumen de agua que puede ser liberado por el acuífero está dada por $1/S$.

En conclusión, desde un punto de vista conceptual, resulta lógico que la manifestación hidráulica del acuífero ante una descarga sísmica sea directamente proporcional a la conductividad hidráulica k , al espesor saturado b , e inversamente proporcional al coeficiente de almacenamiento S y a la distancia característica l del acuífero. Todo este comportamiento encaja con la configuración dimensional del coeficiente de agotamiento ($\alpha \propto \{k, b, S^{-1}, l^{-2}\}$).

Las constantes multiplicativas que aparecen en las dos definiciones ofrecidas del coeficiente de agotamiento (2 en la definición 5.5 y $\pi^2/4$ en la definición 5.12) no tienen influencia desde el punto de vista dimensional (son adimensionales). Es decir, son dos factores multiplicativos que únicamente aportan información cuantitativa.

8.4. Influencia de la longitud característica del acuífero

La distancia característica del acuífero l es un factor que influye negativamente sobre la sensibilidad de un acuífero ante la sobrepresión producida por un sismo, de

tal forma que los acuíferos con elevada l mitigan el efecto del terremoto sobre la hidráulica del acuífero.

Veamos, por ejemplo, cómo influyen las longitudes de las fallas en el caso de tres fracturas profundas F_1 , F_2 y F_3 orientadas hacia el hipocentro. Este puede ser considerado no una fuente puntual (Figura 8.3, izquierda), sino una fuente lineal del terremoto, si el sismo es de gran magnitud (caso del terremoto de Lisboa) (Figura 8.3, derecha) donde se produce una recarga B debida al terremoto. Cada fractura tiene asociada un manantial del mismo caudal en los tres casos. Las tres fallas tienen también los mismos valores de k y S , la misma anchura y profundidad b , pero diferente longitud, siendo $l_2 = 2l_1$ y $l_3 = 3l_1$. Pues bien, esto conlleva que $\alpha_1 = \frac{\pi^2 T}{4Sl_1^2}$, $\alpha_2 = \frac{1}{2^2}\alpha_1$ y $\alpha_3 = \frac{1}{3^2}\alpha_1$.

Figura 8.3: Influencia de la longitud de las fallas receptoras en el coeficiente de agotamiento de los manantiales drenados por las mismas y en su sensibilidad a los terremotos. Caso de una fuente sísmica puntual (izquierda). Caso de una fuente sísmica de falla rota (derecha). La línea de trazos representa los mismos valores de B (caudal o flujo procedente de abajo causado por el aumento de presión de poro producido por el terremoto).

Se ve que una mayor longitud de las fallas hace disminuir cuadráticamente el parámetro α y por lo tanto su sensibilidad a la recarga del terremoto.

8.5. Relación entre el confinamiento del acuífero y su afección sísmica

La difusividad depende del coeficiente de almacenamiento por lo que, a igualdad de transmisividad, D es mucho mayor si el acuífero es confinado ($S \in [10^{-6}, 10^{-4}]$), que si es semiconfinado ($S \in [10^{-4}, 10^{-3}]$) o libre ($S \in [10^{-3}, 10^{-1}]$). Es conocido desde hace mucho tiempo que los acuíferos confinados se alteran con más facilidad durante los terremotos que los acuíferos libres y que la mayor parte de las fallas

conductoras de agua (permeables) en terrenos impermeables se comportan como acuíferos confinados.

En los acuíferos libres, la sensibilidad según la difusividad dependerá de la porosidad eficaz, ya que $S = m_e$, de la permeabilidad k y del espesor saturado b , ya que $T = kb$. A igualdad de espesor saturado b , la difusividad se podría poner como $D = kb/m_e$. Es decir, que depende mucho de los grupos de semejante comportamiento hidrogeológico con unas k y m_e características.

8.6. Variación del hidrograma del manantial por efecto del sismo o cálculo del volumen de agua desalojado por el sismo

En un terremoto se produce una sobrepresión de poro que crea un nuevo campo piezométrico y provoca un flujo de abajo a arriba que se puede manifestar en forma de descargas mantenidas en el campo cercano e intermedio al hipocentro cuando el nuevo nivel piezométrico supera la superficie topográfica. El agua sale por la parte superior de los acuíferos, empujada por la de abajo. Se ha observado que el régimen de vaciado de las descargas mantenidas en los terremotos interviene el coeficiente de agotamiento (Wang et al., 2004a). El que se manifieste una curva de recesión típica significa que el régimen es darciano y el que sea progresivamente decreciente significa probablemente que el valor de la carga hidráulica va disminuyendo por efecto de la despresurización de la zona profunda (parte de abajo) del acuífero.

Si en vez de un nuevo manantial o arroyo se trata del incremento del caudal de uno ya existente y en caso de recesión (ausencia de recarga), la curva de agotamiento del manantial sufre una alteración caracterizada por:

- Un aumento del caudal por efecto del sismo.
- Una nueva recesión desde este caudal que puede tener un coeficiente de recesión más rápido: $\alpha_2 > \alpha_1$ (α_1 es el coeficiente de recesión de la curva de descarga antes del sismo y α_2 el coeficiente de agotamiento debido al terremoto).

Un bosquejo de este hidrograma, en el que se desconsideran las inercias del acuífero, es la curva de recesión compuesta de la Figura 8.4.

En este caso, se tendría, en diagrama semilogarítmico, un hidrograma compuesto por dos rectas y la expresión de la curva de agotamiento sería:

$$Q = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_{2s} e^{-\alpha_2 t}, t > t_2,$$

donde Q_1 sería el caudal de inicio de la curva de agotamiento del manantial o arroyo anterior al sismo, α_1 el coeficiente de agotamiento de la curva de descarga del manantial anterior al sismo, Q_{2s} el incremento del caudal movilizado por el sismo y α_2 el coeficiente de su curva de agotamiento. Aunque podría también ocurrir que

Figura 8.4: Hidrograma en escala natural y semilogarítmica de un manantial en régimen no influenciado (recesión) que en el momento t_2 sufre de forma instantánea (sin inercias ni retardos) el efecto de un bombeo profundo B por la acción de un sismo. Se supone que la pendiente de la curva de agotamiento del manantial tras el sismo es mayor que la que tenía antes ($\alpha_2 > \alpha_1$). Para $t_1 \leq t \leq t_2$, la curva de agotamiento sigue la ecuación $Q(t) = Q_1 e^{-\alpha_1 t}$. A partir de t_2 , la curva de descarga tiene como expresión $Q(t) = Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_{2s} e^{-\alpha_2 t}$. Q_1 es el caudal del manantial al inicio de la recesión t_1 , Q_{2s} es el caudal inducido por el sismo en el instante t_2 y Q_2 es el caudal del manantial en el momento del terremoto: $Q_2 = Q_{2s} + Q(t_2) = Q_{2s} + Q_1 e^{-\alpha_1 t_2}$.

sólo se observase un incremento de caudal pero con la misma curva de agotamiento propia del manantial antes del terremoto ($\alpha_2 = \alpha_1$).

En algunos acuíferos se ha observado que, una vez equilibrada la zona, el acuífero se comporta hidráulicamente como siempre, conservando su α inicial (anterior al terremoto), de lo cual Wang y Manga (2010a) deducen que no hay incremento sustancial de permeabilidad debido al terremoto en las zonas de descarga (sección 10.3).

El volumen de agua descargado por el sismo V_s es el incremento de volumen hidrodinámico del acuífero que, a partir el hidrograma, puede calcularse como la resta del desalojado por el manantial a partir del sismo menos el que hubiese descargado si no hubiera sucedido el terremoto:

$$V_s \text{ [L}^3\text{]} = V_2 - V_1 = \int_{t_2}^{+\infty} (Q_1 e^{-\alpha_1 t} + Q_{2s} e^{-\alpha_2 t}) dt - \int_{t_2}^{+\infty} Q_1 e^{-\alpha_1 t} dt, \quad (8.7)$$

donde Q_1 es el caudal del manantial al inicio de la recesión y Q_{2s} es el caudal inducido por el sismo.

Una forma de estimar este volumen (expresión 8.7) es:

$$V_s \text{ [L}^3\text{]} = V_2 - V_1 = V_2 - \frac{Q_1}{\alpha_1} \approx \frac{Q_2}{\alpha_2} - \frac{Q_1}{\alpha_1}. \quad (8.8)$$

La expresión 8.7 gráficamente se relaciona con el área coloreada de la Figura 8.4 (V_s).

La gráfica anterior, sin embargo, sólo corresponde al caso en que el manantial ya estuviese manando en el momento de acaecimiento del terremoto. Las posibilidades, con sus respectivas gráficas (Figura 8.5) son las siguientes:

- Acuífero libre con manantial en recesión en que el terremoto produce un aumento de caudal (Figura 8.5a).
- Acuífero libre con manantial en recesión en que el terremoto produce primeramente el secado del manantial y posteriormente un aumento de su caudal (Figura 8.5b).
- Acuífero libre con manantial seco en que el terremoto hace que brote (Figura 8.5c).
- Acuífero libre con manantial seco en que el terremoto causa un aumento del nivel piezométrico pero sin que llegue a brotar el manantial (Figura 8.5d).

8.7. Discusión sobre el modelo analítico teórico desarrollado

Varios autores han estudiado las características del incremento de la descarga mediante el análisis de recesión, que ha sido un procedimiento útil para caracterizar

(a) El manantial está en recesión y el terremoto produce un aumento de caudal.

(b) El manantial está en recesión y el terremoto produce primeramente el secado del manantial y posteriormente un aumento de su caudal.

(c) Manantial seco que el terremoto hace que brote.

(d) El terremoto causa un aumento del nivel piezométrico del acuífero pero sin que llegue a brotar el manantial.

Figura 8.5: Distintas reacciones de un acuífero libre ante un sismo.

la respuesta del sistema hidrológico a escala de cuenca hidrográfica (Roeloffs, 1998; Manga, 2001; Manga et al., 2003; Brodsky et al., 2003; Wang et al., 2004a) se explica un procedimiento de la estimación del exceso de descarga debido a la acción de un terremoto para acuíferos con el mismo α antes y después del terremoto (2.2.1 de Wang y Manga, 2010a). Aquí se esboza la forma de calcular este volumen en caso de que el coeficiente de recesión del manantial después del sismo no coincida con el que tenía antes del mismo (expresiones 8.7 y 8.8).

En referencia al desarrollo analítico de afecciones en un acuífero debido a acciones exteriores, obsérvese que en la ecuación 8.6 interviene el tiempo ya que se calculan las afecciones producidas por B de tiempos pasados. Esto se cumple de alguna manera cuando los manantiales de larga permanencia tardan en reaccionar un día o dos después del terremoto. Al menos, así se observó en el terremoto de Lisboa. Las oscilaciones súbitas de caudal por efectos vibratorios son sin embargo muy rápidas.

Por otro lado, y según la expresión 8.6, la afección (la sensibilidad) será mayor en acuíferos con coeficientes de agotamiento mayores. Veamos, con un ejemplo, cómo influyen los valores de α en la afección a los caudales de los manantiales y arroyos. Vamos a suponer una falla permeable en granito con una $k = 0,1 \text{ m/días} = 10^{-4} \text{ m/s}$, $b = 5000 \text{ m}$ y $S = 4 \times 10^{-6}$, que se dan muchas veces en rocas cristalinas granitoides gneises, típicos valores de acuíferos confinados. Así, se tiene $\alpha = 0,12 \text{ días}^{-1}$. Para explicar un incremento de caudal en un manantial existente de $Q'_i - Q_i = 101 \text{ l/s}$, es necesario un flujo de $B_{i-1} = 83,331 \text{ l/s}$. Para un incremento de 1001 l/s requiere de $B_{i-1} = 833,31 \text{ l/s}$. Si cambiásemos el coeficiente de agotamiento a $\alpha = 0,01 \text{ días}^{-1}$ se necesitaría un flujo profundo $B_{i-1} = 10001 \text{ l/s}$ para un incremento de 101 l/s , o de 100001 l/s para un incremento de 1001 l/s . Se ve que, si los coeficientes de agotamiento son grandes, bastan pequeños caudales de B para afectar a los manantiales.

En la Figura 6.3 y en la Tabla 6.2 (incidencia porcentual normalizada NI) se observa que más de un 75 % de las afecciones de manantiales se distribuyen en aquellos acuíferos con α más altos, incluidas las fracturas regionales, cuyos α son especialmente altos. Parece razonable por lo tanto interpretar el coeficiente de agotamiento de un manantial como una medida de la afección que un acuífero experimentará ante la acción sísmica, de forma que a mayor α irá asociada una mayor repercusión del sismo sobre la hidráulica del acuífero.

Aparte de esto, una característica de los manantiales persistentes de los grandes terremotos, como el de Lisboa, es que el caudal se mantiene durante días, meses y hasta años. ¿A qué es debido este mantenimiento del caudal? ¿Es debido a la inercia al vaciado de agua subterránea del acuífero? ¿Es debido a la despresurización y equilibrado de la zona después del terremoto? ¿Es debido a las dos causas?

Hasta ahora, hemos visto que los acuíferos con coeficientes de agotamiento más altos son más sensibles a los terremotos, pero el vaciado es también más rápido. La rapidez de descarga del volumen hidrodinámico (el encerrado entre la horizontal del manantial y el nivel piezométrico) viene dado por la ecuación 5.2. Según la ecuación anterior, para que el caudal se reduzca a la mitad, es necesario que transcurra un

tiempo $t_{0,5} = 0,693147181/\alpha$ [T] (Figura 5.3):

$$\begin{aligned} \begin{cases} Q = Q_0 e^{-\alpha t} \\ Q = 0,5Q_0 \end{cases} &\Rightarrow 0,5Q_0 = Q_0 e^{-\alpha t_{0,5}} \Rightarrow \ln(0,5) = -\alpha t_{0,5} \ln(e) \Rightarrow \\ &\Rightarrow t_{0,5} = -\frac{\ln(0,5)}{\alpha} = 0,693147181\alpha \text{ [T]} . \end{aligned}$$

Si $\alpha = 0,01 \text{ días}^{-1}$, entonces se requieren $t_{0,5} = 69 \text{ días}^{-1}$ para que el caudal se reduzca a la mitad. Y si $\alpha = 0,001 \text{ días}^{-1}$, entonces $t_{0,5} = 693 \text{ días}^{-1}$.

Es decir, y como se ha dicho, a mayor el acuífero tarda menos tiempo en vaciarse y viceversa. Y como que se ha visto en el terremoto de Lisboa que los manantiales nuevos o los que se han incrementado están asociados a acuíferos con α altos pero que duran bastante tiempo antes de secarse, hay que admitir que la sola inercia del acuífero no es suficiente para explicar este secado lento. Esto hace pensar en la necesidad de una acción de recarga desde abajo que va progresivamente disminuyendo, ya que la despresurización se va haciendo poco a poco.

Capítulo 9

Conclusiones

Se ha elaborado una teoría en la que el coeficiente de agotamiento α puede ser un parámetro útil en la medida de la sensibilidad a los terremotos de los acuíferos y, en especial de los incrementos de descargas subterráneas persistentes y de alteración de los manantiales en general. De forma que, a mayor α , se dará una mayor repercusión del sismo sobre la hidráulica del acuífero.

Esto ocurre sobre todo en fallas, rocas duras, acuíferos confinados y con una geometría específica, tal como se ha podido demostrar en el Terremoto de Lisboa de 1755. La mayoría de los manantiales y arroyos de larga duración están claramente relacionados con afloramientos graníticos, con las fracturas SO-NE y con las fallas activas E-O del sur de Portugal.

Sin embargo, la gran duración de los caudales de manantiales asociados a acuíferos con valores de α altos (y por tanto sensibles pero de vaciado rápido), pueden ser explicados por la aparición de un flujo subterráneo de abajo a arriba, por efecto de la presión de poro debida al terremoto, y que va progresivamente disminuyendo con el tiempo, acorde con el restablecimiento del equilibrio tectónico de la zona.

De la distribución geográfica de los fenómenos hidrológicos, se observa que en el campo cercano e intermedio coexisten incrementos persistentes en el caudal de manantiales en rocas duras, con descargas difusas persistentes, licuefacción y ascensos del nivel del agua de los pozos por consolidación en formaciones geológicas superficiales. Se observa una única respuesta generalizada de incremento persistente de caudales en manantiales y arroyos en una zona de más de 90000 km² en el SO la Península Ibérica. Los manantiales persistentes de más duración (entre 5 meses y algo más de 2 años) se localizaron cerca de las fallas importantes del SO conectadas con la Falla de desgarre Azores-Gibraltar y por donde la disipación de presión de poros hasta el equilibrio debió tardar más.

Los diferentes colores en la turbidez de los manantiales se explican muy bien con las características geológicas de la región.

Capítulo 10

Futuras líneas de investigación

10.1. Comprobación con otros sismos de la validez del coeficiente de agotamiento para conocer la sensibilidad de los acuíferos a los terremotos

La teoría por la cual el coeficiente de agotamiento es un parámetro hidráulico útil para el estudio de la sensibilidad sísmica de los acuíferos en el terremoto de Lisboa debería probarse en otros sitios con datos más fiables que los históricos utilizados en esta tesis doctoral. Probablemente, un análisis en base a documentación bibliográfica sería el punto de partida. Puede ser interesante aprovechar la red piezométrica e hidrométrica de manantiales de una zona sísmica determinada.

10.2. Análisis de los diferentes tipos de curvas de agotamiento de un manantial o pozo tras una acción sísmica

En la sección 8.6 se ha hecho un análisis preliminar sobre las distintas posibilidades de curvas de agotamiento resultantes en un acuífero debido a un impulso sísmico. Sin embargo, no se ha estudiado suficientemente las variaciones de un hidrograma ante una recarga profunda en el acuífero.

10.3. De cómo la hidráulica de manantiales puede explicar los mecanismos de incremento de descargas en los manantiales

Wang y Manga (2010a) indican que el aumento de permeabilidad del terreno tras un sismo no debe darse como mecanismo explicatorio del aumento del caudal de los manantiales debido a terremotos, ya que el coeficiente de agotamiento después de un manantial antes y después de un terremoto no varía. Sin embargo, la no variabilidad (aparente) del coeficiente de agotamiento no implica la no variabilidad en la permeabilidad (sección 8.6). Un análisis de sensibilidad de las diferentes variables que intervienen en dicho coeficiente demuestra que incrementos importantes de permeabilidad se traducen en variaciones imperceptibles del coeficiente de agotamiento.

Por otra parte, respecto de este coeficiente α , podría establecerse un método para el cálculo de la longitud característica del acuífero. A pesar de que la difusividad D es un buen parámetro para estimar la sensibilidad de un acuífero ante una acción exterior de tipo sísmico, la teoría propuesta se basa el coeficiente de agotamiento como más apropiado que la difusividad para reflejar las acciones exteriores, ya que en la sensibilidad a una acción externa también influye la extensión del acuífero, y no solo la transmisividad T y el coeficiente de almacenamiento S . Mientras que la difusividad depende de las siguientes variables:

$$D \propto \{k, b, S^{-1}\},$$

el coeficiente de agotamiento incluye una variable geométrica:

$$\alpha \propto \{k, b, S^{-1}, l^{-2}\}.$$

Evidentemente, reducir la geometría de un acuífero a una longitud característica es una notable simplificación. En este trabajo, en concordancia con Custodio y Llamas (1976), se ha definido esta l como la distancia horizontal entre el manantial y el punto del acuífero más alejado del mismo. Sin embargo, esta definición podría ser reformulada (mediante un análisis más profundo de la geometría del acuífero) para obtener resultados más precisos. Naturalmente, para el ajuste en el cálculo de la l se debe disponer de datos experimentales (sección 10.1).

10.4. De cómo la hidráulica de manantiales puede explicar el origen de una parte de los yacimientos hidrotermales

Hay yacimientos metálicos de origen hidrotermal, como los de Pb-Zn de Mississippi-Walley, cuya fuente de agua termal mineralizada se aduce un origen sísmico asociado

a fallas. Sin embargo, esto no está bien estudiado ni cuantificado. La aplicación de la hidráulica subterránea y de modelos matemáticos puede arrojar mucha luz sobre el tema. Por ejemplo, estimar los volúmenes hidrodinámicos que moviliza un terremoto a lo largo de la historia geológica es fundamental para conocer el potencial mineralizante de un bombeo sísmico.

10.5. Predicción del comportamiento de los caudales ante la acción sísmica

Sin entrar en muchas consideraciones internas de los acuíferos (estudio de su geometría y parámetros hidrogeológicos), se podrían hacer estudios estadísticos de la respuesta de los manantiales y oscilaciones del nivel del agua en pozos dirigidos a la predicción de comportamiento de los mismos. Se trataría de encontrar, mediante análisis de regresión y otros procedimientos estadísticos, la respuesta de incremento y descarga del caudal de un manantial cualquiera ante una intensidad sísmica determinada en base a la observación del comportamiento de numerosos terremotos. Se trataría de buscar una ley universal de respuesta de manantiales y pozos ante terremotos a partir de unos pocos parámetros.

La generación de esta ley requeriría del análisis estadístico del comportamiento de cuantos más manantiales mejor, empezando por la información bibliográfica. Los datos a analizar deberían incluir hidrogramas y mediciones de intensidad sísmica sobre el acuífero. Wang y Manga (2010a, expresión 4.8) proponen una ley de descarga tras un sismo que considera la acción sísmica como un impulso instantáneo de valor determinado, pero pensamos que puede perfeccionarse. De esta forma, la ley de descarga universal sería la respuesta de un sistema acuífero genérico ante las entradas de intensidad y recarga en el tiempo (Figura 10.1).

Figura 10.1: Diagrama de bloques un sistema acuífero genérico sometido a la acción de un sismo en el que una ley universal de descarga predice su hidrograma.

10.6. Aplicación de un modelo hidromeomecánico al terremoto de Lisboa de 1755

El terremoto de Lisboa de 1755 es muy importante ya que, entre otras cosas, condiciona la norma sismoresistente de gran parte de Portugal y España. Al ser un terremoto histórico, la falta de datos limita mucho su estudio y, a día de hoy, muchas cuestiones del mismo no se conocen bien, como la localización de la fuente sísmica, la cinemática de la falla, etc. A parte de la información anterior que se dispone del terremoto (isosistas, etc) (Martínez Solares, 2017), se tiene también un conocimiento suficiente de la geometría de la falla de Azores Gibraltar y de las características de la corteza y manto de su entorno (Andrés et al., 2018). Hay asimismo datos sobre la distribución de presiones de poros en el mar (Leynaud et al., 2017). Se conoce la historia de activaciones de esta falla por los efectos de tsunamis en el catálogo del Holoceno (cinco eventos de tsunami generados por fuertes terremotos afectaron a esta área durante los últimos 7000 años) (Lario et al., 2011) por lo que el periodo de recurrencia para estos eventos catastróficos puede estar entre 1200 y 1500 años.

Si se añade a esta información el estudio proporcionado por esta tesis sobre la distribución espacial y temporal de las alteraciones hidromeomecánicas, y por ello de las presiones de poro durante el terremoto de Lisboa de 1755, creemos que se puede dar progresar en la cuantificación de este terremoto. En particular, se podría aplicar un modelo hidromeomecánico 2D o 3D en ecuaciones diferenciales que sirva para estimar el ciclo sísmico completo, la gama de fenómenos diversos asociados al sismo, teniendo en cuenta la ley de rotura de Mohr-Coulomb, la velocidad de deslizamiento de la falla, y la historia de velocidades de deslizamiento anteriores.

10.7. Estudio de otros terremotos históricos en España

Existen otros terremotos históricos de España de los que se tiene información sobre alteraciones hidromeomecánicas (anexo D). Nos referimos por ejemplo al terremoto de Andalucía de 1885 y que ha sido el más importante de España en los últimos 200 años. La documentación ha sido recopilada por nosotros aunque no se ha presentado en esta tesis, con la esperanza de que con la ayuda de otros se pudiera estudiar. Actualmente, hemos iniciado también el estudio del comportamiento hidromeomecánico ante los sismos de la falla de Talamantes-Castilruiz, al norte de la Cordillera Ibérica.

Bibliografía

- Abdelaziz, C. (2005). Os efeitos do terramoto de Lisboa em Marrocos 1 de novembro de 1755. *O Grande Terramoto de Lisboa*, 1:265–294.
- Andrés, J., Marzán, I., Ayarza, P., Martí, D., Palomeras, I., Torné, M., Campbell, S., y Carbonell, R. (2018). Curie point depth of the Iberian Peninsula and surrounding margins. A thermal and tectonic perspective of its evolution. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(3):2049–2068.
- Antón Pacheco, C. (1979). Mapa de lineamientos observados en las imágenes Landsat y su relación con las principales estructuras geológicas de la Península Ibérica. Escala 1:1000000.
- Arquivo Ministério do Reino (1756). Informações dos párrocos de diversas regiones do país relativas às consequências do terramoto de 1755. <https://digitalq.arquivos.pt/details?id=4741388>.
- Bernard, P. (2001). From the search of ‘precursors’ to the research on ‘crustal transients’. *Tectonophysics*, 338(3):225 – 232.
- Boussinesq, J. (1877). *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Imprimerie Nationale.
- Briggs, R. O. (1991). Effects of Loma Prieta earthquake on surface waters in Waddell Valley. *Journal of the American Water Resources Association*, 27(6):991–999.
- Brodsky, E. E., Roeloffs, E., Woodcock, D., Gall, I., y Manga, M. (2003). A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8):2390.
- Cooper Jr., H. H., Bredehoeft, J. D., Papadopoulos, I. S., y Bennett, R. R. (1965). The response of well-aquifer systems to seismic waves. *Journal of Geophysical Research*, 70(16):3915–3926.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea*. Omega, Barcelona.
- Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos (1970). Carta Hidrogeológica de Portugal, na escala de 1:1000000. <https://www.lneg.pt/servicos/164/1434/>.

- García Mayordomo, J., Insua Arévalo, J. M., Martínez Díaz, J. J., Jiménez Díaz, A., Martín Banda, R., Martín Alfageme, S. R., Álvarez Gómez, J. A., Rodríguez Peces, M. J., Pérez López, R., Rodríguez Pascua, M. Á., et al. (2012). The quaternary active faults database of Iberia (QAFI v.2.0). *Journal of Iberian Geology*, 38(1):285–302.
- Hoek, E. y Bray, J. D. (1981). *Rock slope engineering*. CRC Press.
- Instituto Geográfico Nacional (2016). Mapa Tectónico de España. <http://www.ign.es/web/ign/portal/espana-en-mapas>.
- Instituto Geológico y Minero de España (2000). Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:1000000. <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/mapa.aspx?parent=../tematica/tematicossingulares.aspx&Id=19>.
- Instituto Geológico y Minero de España (2003a). Mapa Geológico de España a escala 1:200000 (segunda serie). <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Geologico200.aspx?language=es>.
- Instituto Geológico y Minero de España (2003b). Mapa Geológico de España a escala 1:50000 (segunda serie). <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>.
- Instituto Geológico y Minero de España (2004). Mapa Tectónico de España (y Portugal) a escala de 1:2000000. <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/mapa.aspx?parent=../tematica/tematicossingulares.aspx&Id=24&language=es>.
- Jacob, C. E. (1943). Correlation of ground-water levels and precipitation on long island, new york. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 24(2):564–573.
- Jónsson, S., Segall, P., Pedersen, R., y Björnsson, G. (2003). Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. *Nature*, 424(6945):179–183.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia (1952-2017). Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50000. <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/egeo/DownloadCartas/>.
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia (2018). Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:200000. <https://www.lneg.pt/servicos/142/>.
- Lario, J., Zazo, C., Goy, J., Silva, P., Bardaji, T., Cabero, A., y Dabrio, C. (2011). Holocene palaeotsunami catalogue of SW Iberia. *Quaternary International*, 242(1):196 – 200. Earthquake Archaeology and Paleoseismology.
- Levret, A. (1991). The effects of the November 1, 1755 Lisbon earthquake in Morocco. *Tectonophysics*, 193(1-3):83–94.

- Leynaud, D., Mulder, T., Hanquiez, V., Gonthier, E., y Régert, A. (2017). Sediment failure types, preconditions and triggering factors in the Gulf of Cádiz. *Landslides*, 14(1):233–248.
- Maillet, E. T. (1905). *Essais d'hydraulique souterraine & fluviale*. A. Hermann.
- Manga, M. (2001). Origin of postseismic streamflow changes inferred from base-flow recession and magnitude-distance relations. *Geophysical Research Letters*, 28(10):2133–2136.
- Manga, M., Brodsky, E. E., y Boone, M. (2003). Response of streamflow to multiple earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 30(5):1214.
- Martínez Solares, J. M. (2001). Los efectos en España del terremoto de Lisboa.
- Martínez Solares, J. M. (2017). El terremoto de Lisboa de 1 de noviembre de 1755. *Física de la Tierra*, 29:47–60.
- Martínez Solares, J. M. y López Arroyo, A. (2004). The great historical 1755 earthquake. Effects and damage in Spain. *Journal of Seismology*, 8(2):275–294.
- Martínez Solares, J. M., López Arroyo, A., y Mezcua, J. (1979). Isoleismal map of the 1755 Lisbon earthquake obtained from Spanish data. *Tectonophysics*, 53(3):301 – 313. Proceedings of the 16th General Assemble of the European Seismological Commission.
- Mattauer, M. (1976). *Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Mendes-Victor, L., Sousa Oliveira, C., Azevedo, J., y Ribeiro, A. (2009). *The 1755 Lisbon earthquake: revisited*, volumen 7. Springer Science & Business Media.
- Ministerio de Medio Ambiente (2000). El Libro Blanco del Agua. <http://hispagua.cedex.es/node/66958>.
- Montgomery, D. R. y Manga, M. (2003). Streamflow and water well responses to earthquakes. *Science*, 300(5628):2047–2049.
- Muir-Wood, R. y King, G. C. P. (1993). Hydrological signatures of earthquake strain. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B12):22035–22068.
- Neres, M., Carafa, M. M. C., Fernandes, R. M. S., Matias, L., Duarte, J. C., Barba, S., y Terrinha, P. (2016). Lithospheric deformation in the Africa-Iberia plate boundary: Improved neotectonic modeling testing a basal-driven Alboran plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9):6566–6596.
- Oliveira, C. S. (2008). Review of the 1755 Lisbon earthquake based on recent analyses of historical observations. En *Historical Seismology*, páginas 261–300. Springer.

- Pereira de Sousa, F. L. (1919-1932). *O terramoto do 1 de Novembro de 1755 em Portugal: um estudo demográfico. I-Distritos de Faro, Beja e Évora; II-Distritos de Santarém e Portalegre; III-Distrito de Lisboa; IV-Distritos de Leiria, Castelo Branco, Coimbra, Guarda, Aveiro e Viseu.* Tipografia do Comércio. Serviços Geológicos, Lisboa.
- Petitta, M., Mastroiello, L., Preziosi, E., Banzato, F., Barberio, M. D., Billi, A., Cambi, C., De Luca, G., Di Carlo, G., Di Curzio, D., et al. (2018). Water-table and discharge changes associated with the 2016–2017 seismic sequence in central Italy: hydrogeological data and a conceptual model for fractured carbonate aquifers. *Hydrogeology Journal*, 26(4):1009–1026.
- Pitilakis, K. D. (2007). *Earthquake Geotechnical Engineering: 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering-Invited Lectures*, volumen 6. Springer, Dordrecht.
- Reid, H. F. (1914). The Lisbon earthquake of November 1, 1755. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 4(2):53–80.
- Riva Arderiu, O. (1969). Mapa Litológico de España a escala 1:400000.
- Roeloffs, E. A. (1998). Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B1):869–889.
- Rojstaczer, S. y Wolf, S. (1992). Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California. *Geology*, 20(3):211–214.
- Rojstaczer, S., Wolf, S., y Michel, R. (1995). Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake-induced hydrological changes. *Nature*, 373(6511):237–239.
- Samartín Quiroga, A. (2007). *Curso de Ingeniería Sísmica (I). La acción sísmica.* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Santillán, D., Sanz de Ojeda, A., Cueto, L., y Mosquera, J. C. (2018). Sismicidad inducida en embalses. Una aproximación mediante un modelo conceptual. Hidrogeología: Retos y experiencias, Madrid.
- Sanz de Ojeda, A., Alhama, I., y Sanz, E. (2019). Aquifer sensitivity to earthquakes: The 1755 Lisbon earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(8):8844–8866.
- Sanz Pérez, E. (1995). Captaciones y uso del agua para abastecimiento público en la zona rural de España. *Revista de Obras Públicas*, 142(3345):67–86.

- Sanz Pérez, E. (1996). Springs in Spain: classification according to their flows and lithologies and their hydraulic contributions. *Groundwater*, 34(6):1033–1041.
- Sanz Pérez, E. (1997). The Güvejar landslide (Granada) during the earthquakes in Lisbon (1755) and Andalucía (1884). *Bulletin of Engineering Geology*, 56:83–87.
- Sanz Pérez, E. (2001). Distribution functions of spring discharges according to their lithologies and the influence of lower limit to flow: an example from Spain. *Groundwater*, 39(2):203–209.
- Sanz Pérez, E. (2013). *Hidráulica subterránea aplicada*. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Sanz Pérez, E. y Recio, B. (2011). A method to assess annual average renewable groundwater reserves for large regions in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 56(1):99–107.
- Sato, T., Sakai, R., Furuya, K., y Kodama, T. (2000). Coseismic spring flow changes associated with the 1995 Kobe earthquake. *Geophysical Research Letters*, 27(8):1219–1222.
- Shalev, E., Kurzon, I., Doan, M.-L., y Lyakhovsky, V. (2016). Sustained water-level changes caused by damage and compaction induced by teleseismic earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(7):4943–4954.
- Silva, P. G., Gómez Diego, P. V., Elez, J., Giner Robles, J. L., Rodríguez Pascua, M. A., Roquero, E., Martínez Granaña, A. M., Bardají Azcárate, T., y Bautista, B. (2017). Earthquake environmental effects of the ad 1755 Lisbon-earthquake-tsunami in Spain.
- Singh, K. P. (1969). Theoretical baseflow curves. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(6):2029–2048.
- Tokunaga, T. (1999). Modeling of earthquake-induced hydrological changes and possible permeability enhancement due to the 17 January 1995 Kobe earthquake, Japan. *Journal of Hydrology*, 223(3):221 – 229.
- Udías, A., Arroyo López, A., y Mezcuá, J. (1976). Seismotectonic of the Azores-Alboran Region. *Tectonophysics*, 31(3-4):259–289.
- Vaz, T. y Zêzere, J. L. (2016). Landslides and other geomorphologic and hydrologic effects induced by earthquakes in Portugal. *Natural Hazards*, 81(1):71–98.
- Vilanova, S. P., Nunes, A. C. F., y Fonseca, J. F. B. D. (2003). Lisbon 1755: A case of triggered onshore rupture? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5):2056–2068.

- Wakita, H. (1975). Water wells as possible indicators of tectonic strain. *Science*, 189(4202):553–555.
- Wang, C.-Y. y Manga, M. (2007). *Earthquake Hydrology*, volumen 4. UC Berkeley.
- Wang, C.-Y. y Manga, M. (2010a). *Earthquakes and Water*, volumen 114 de *Lecture Notes in Earth Sciences*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Wang, C.-Y. y Manga, M. (2010b). Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*, 10(1-2):206–216.
- Wang, C.-Y., Manga, M., Dreger, D., y Wong, A. (2004a). Streamflow increase due to rupturing of hydrothermal reservoirs: Evidence from the 2003 San Simeon, California, earthquake. *Geophysical Research Letters*, 31(10).
- Wang, C.-y., Wang, C.-H., y Manga, M. (2004b). Coseismic release of water from mountains: Evidence from the 1999 ($M_w = 7.5$) Chi-Chi, Taiwan, earthquake. *Geology*, 32(9):769–772.
- Xue, L., Li, H.-B., Brodsky, E. E., Xu, Z.-Q., Kano, Y., Wang, H., Mori, J. J., Si, J.-L., Pei, J.-L., Zhang, W., Yang, G., Sun, Z.-M., y Huang, Y. (2013). Continuous permeability measurements record healing inside the Wenchuan earthquake fault zone. *Science*, 340(6140):1555–1559.
- Yan, R., Woith, H., y Wang, R. (2014). Groundwater level changes induced by the 2011 Tohoku earthquake in China mainland. *Geophysical Journal International*, 199(1):533–548.

Apéndice A

Inventario e interpretación de las anomalías hidrogeológicas del terremoto de Lisboa de 1755

A continuación, se incluye el inventario de las anomalías hidrogeológicas causadas por el terremoto de Lisboa de 1755, tanto para España como para Portugal. El origen de estos datos históricos se explica en la sección 2.2, donde se reseña la bibliografía utilizada.

Estos puntos son representados gráficamente en el mapa de unidades geotectónicas de la Península Ibérica y en el mapa litológico esquemático de la Península Ibérica (ver las dos páginas siguientes). También aparecen (sin referencia) en las Figuras 4.3, 6.1, 6.2, 6.3, 6.6 y 6.8.

Para cada anomalía hidrogeológica se describen los siguientes campos:

- Número de referencia.
- Nombre de la localidad en la que se dio.
- Observaciones históricas (sección 2.2).
- Clasificación sobre el tipo de alteración hidrogeológica.
- Interpretación geológica de la misma, realizada mediante los mapas reseñados en la sección 2.3.

En el anexo B, se presenta una adenda en la que se realiza una identificación aproximada de la geología de los puntos de agua alterados por el terremoto de Lisboa de 1755.

Appendix A. Inventory and interpretation of hydrogeological anomalies related to 1785 Lisbon earthquake

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
58	Adra de Pirón, Segovia	“Y en la fuente del pueblo, que es venero bastante profundo, se experimentó que estuvo corriendo turbia como cuatro horas”	Turbidity in springs	In Cretaceous limestone near the contact with gneiss. It is very close to a major NE-SO fault, with which it is associated.
59	Fuentes de Ágreda, Soria	“Las fuentes brotaban sus aguas de color ceniciento, lo que subsistió por cuarenta y ocho horas. Y habiendo reconocido sus conductos se hallaron que habían reventado por algunas partes”	Turbidity in springs	Spring that drains limestone interbedded with altered grey marls, hence the turbidity of the water. .
60	Beratón, Soria	“El cura del lugar de Beratón, en su cumplimiento a dicha carta Orden, expresa que en dicho pueblo no se notó cosa especial del terremoto, y sí que en la fuente donde se coge el agua para los vecinos, bajó turbia por espacio de veinte y cuatro horas”	Turbidity in springs	It drains the Muschelkalk Triassic dolomites, very fractured, near the contact with the Keuper. .
61	Matalebreras, Soria	“... y que todas las paredes de la fuente [sic] vieron temblar, lo que duró por espacio de cuatro o cinco minutos...”	Springs alterations	Small spring that drains the silty-clayey Pliocene materials. .
62	San Felices, Soria	“Y que en la fuente de dicho lugar salía la agua como colorada...”	Turbidity in springs	Spring that drains the Weald limestone tuff. Fractures are filled with iron oxides, hence the colour of water. .
63	Vozmediano, Soria	“...y que en los días siguientes vieron que el agua de la fuente bastante copiosa, sabía turbia del color de jabón a arcilla blanca”	Incremented spring flow Turbidity in springs	Associated to a major reverse fault. Aquifer of Jurassic limestone. In the earthquake of 1959 the water stopped flowing from the source about 12 hours. It looks sensitive to earthquakes. .
64	Aguilafuente, Segovia.	“Y que las fuentes, reconocieron, tuvo alguna alteración sus aguas”	Turbidity in springs	In Neogene, lithology not specified.
65	Alaejos, Valladolid.	“Gracias a Dios, en este pueblo, no resultó ruina alguna, muerte ni herida en personas ni animales, ni cosa notable, más que una laguna que ocupa parte del lugar, tuvieron movimiento las aguas, extendiéndose algo más al modo de un hervor. Y aún se dice que los pozos tuvieron igual disposición”.	Incremented spring flow Water level oscilation	In Neogene. On a NE-SO regional-scale fault.
14	Alange, Badajoz	“Y que en los [veneros] minerales se observó haber abundado con exceso, revolviéndose y tomando el color de la tierra por donde sale”	Incremented spring flow turbidity in springs	They are thermal springs (spas). Associated to a regional-scale fault and granodiorite. Aligned following the fault with points 4 and 13.
1	Alburquerque, Badajoz	“Muchas fuentes de los campos de este término perdieron su curso unas, y otras recuperaron el que se les había extrañado con la suma sequedad de los años antecedentes, cuya particular novedad se notó y atribuyó a el movimiento del temblor, como la de que el río Jébora [= Gévora] creció y se enturbiaron sus aguas”.	New spring Incremented streamflow	1. The river basin is mainly in granite, but also in metamorphic rocks. Anyhow, it has been clearly associated with a regional-scale fault.
27	Alcalá de los Gazules (Cádiz)	“Y, en cuanto a fuentes y ríos, parece se observó que en las primeras se suspendieron las corrientes en algún tiempo de la duración de dicho terremoto y que, volviendo a correr el agua, estaba turbia, y que los segundos con el movimiento de la tierra, y consiguiente de sus álveos, expelieron el agua hacia la parte que mira a el Sur, denotándose que las agitaciones venían del Norte v...”	Incremented flow of springs and streamflow	In the alluvial of the Barbate River. In granite.
66	Alcalá la Real, Jaén	“La fuente, único surtimiento del agua de esta ciudad, se quebrantó mucho en quasi toda la cañería, quebrándose muchos caños y desuniéndose otros, de forma que, aunque se reparó en algo, es muy escasa el agua que llega a esta ciudad, mientras que no se reconozcan las quiebras del todo de la cañería”	Spring alterations	It seems associated to a major fault.
15	Alcántara, Cáceres	“El río Tajo, que pasa por dicha puente, se alteró bastante, subiendo y bajando con aceleración, asegurando el barquero de la barca de Concejo, puesta al paso de dicho río, una legua más arriba de el puente, que de la violencia del agua hacía saltar la barca media vara por cima, quedándola en el aire. Se ha notado, por lo general, que los conductos de las fuentes se han abierto, de modo que hoy se experimenta correr de ellas el agua con mayor abundancia, y aquí hay dos en que se advierte esto mismo, y de una de ellas (de que yo bebo) excesivo sabor a herrumbre”	Incremented flow of persistents springs	Associated to a regional-scale fault and granite. Aligned following the fault with points 10 and 12.
67	Alcañices, Zamora	“Por lo respectivo a mi Jurisdicción, ya tengo informado por Zamora, y sólo se me ofrece añadir que la fuente del lugar de Rabano [= Rábano de Aliste], que rompió con agua de color de barro, después la despedía de color de ceniza”	Turbidity in springs	It seems to be associated to gneiss.
94	Alcañiz, Teruel	“...y, sólomente en las inmediaciones del Reino de Valencia, con quien dividen los términos de algunos de dichos pueblos, se notó claramente luego, después del referido primero terremoto, que las aguas de algunas fuentes que proceden de aquellos Montes elevados, crecieron y discurrían mudando el color como a rubicundo o tirante a rojo, de que infirieron que procedía del movimiento interior de las entrañas de dichos Montes que, por opresión, ocasionaba la mutación del calor por la tierra que salía de aquellas las mismas aguas”	Incremented springs flows and temperature	In alluvial materials and Neogene red clay. That is the explanation of the water colour.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
28	Alcaracejos, Córdoba	“En cuanto a personas, no hubo desgracia alguna ni tampoco en los animales, lo que se experimentó fue a los dos o tres días haberse visto muchos pozos que tenían muy poca agua se llenaron y, con especialidad un arroyo, que llaman de Cuzna, distante de esta villa una legua, estando sin corriente, tomó agua que corría por él y sus cauces bastantemente, con una agua muy acrisolada”	Incremented level in Wells news and persistent streamflows	In granite.
95	Alcaudete, Jaén	“...subir el agua en los pozos, y al fin, hervir como la caldera al fuego...”	Incremented level in Wells	It seems to be in granite.
2	Alcuescar, Cáceres	“También se notó que la fuente del Concejo, que llaman el Pozo Granado, abundó en cantidad de agua que no tenía, pero ésta se observó salía turbia”	incremented spring flow turbidity in springs	The Granados Well drains an aquifer in quartzite, although nearby there are also Cambrian conglomerates and slate, and In Pliocene. Associated to a major fault.
96	Aldeanueva del Codonal, Segovia.	“Como una laguna de agua quieta, la vieron con el movimiento de dicha tierra echar el [a]gua fuera de ella”	Incremented phreatic level	
97	Alhaurín el Grande, Málaga.	“...se secaron las fuentes durante el terremoto por dos o tres veces y luego salió el agua turbia”	Spring alterations	Associated to an active fault.
98	Monforte del Cid, Alicante	“...y que fuera de ella observaron diferentes gentes que las aguas de balsa llamada Fuente del Caño, subieron hasta la superficie del bordo tres palmos en alto”	Incremented spring flow	It is at the edge of a geological unit, and also associated to a major fault. Aligned according to this with point 86.
29	Almadén, Ciudad Real	“Me informaron que dos fuentes que están a la parte de Poniente del cerro, y colina, del mineral, mirando al Norte, arrojaron el agua llenando el conducto, siendo así que son pobres, y con especialidad la una de ellas y que el agua de ésta salió roja”	Incremented spring flow turbidity in springs	It drains quartzite layers. The red colour is from the iron oxide filling the fractures. In fact there are ferruginous springs (to a greater or lesser degree).
99	Almansa, Albacete	Se suspendió lo fuerte de dicho terremoto como de tres a cuatro segundos, repitiendo con exceso...” “En los pozos se advirtió movimiento y elevación de sus aguas con bastante ruido”	Incremented level in Wells	Near the contact of geological units and very close to an active fault.
30	Sorbas, Almería	“...en el mismo día 1.º de noviembre, se experimentaron cinco, o seis, todos muy lentos y sólo el primero se reconoció en la villa de Sorbas que su fuente echó de sí tanta agua que desbarató y se llevó las presas de los molinos de pan de aquella ribera, cuyo aumento permaneció cinco días, y pasados, se redujo a su antiguo estado”.	Incremented persistents springs flow	It is the so-called Los Molinos spring, and has an average flow of 40 l/s. It drains a gypsiferous aquifer.
100	Alhama de Almería, Almería	“Y en el lugar de Alhama [= Alhama de Almería] creció el agua de la fuente en mucha parte, con cuyo aumento permanece. (fecha: 6 de diciembre de 1755)”	Incremented persistents springs flow	In a major N-S fault, and in the contact of geological units.
101	Almogía, Málaga	“Por lo que hace a las dos fuentes que hay en esta dicha villa se le ha conocido bastante decadencia de sus aguas”	Aminoration springs flows	In limestone.
16	Almoharín, Cáceres	“Dicen personas fidedignas que en algunas fuentes se conoce haber crecido el caudal de sus aguas más de lo acostumbrado”	Incremented spring flow	Associated to a regional-scale fault and granite. Aligned following the fault with points 4, 13 and 14.
68	Alozaina, Málaga	“... sí sólo el que en el sitio que llaman nacimiento de Jorox, distante de esta villa media legua, a corta distancia, un copioso nacimiento que se halla en el expresado sitio se suprimió, y vuelto por espacio de más de cuatro horas; y aunque volvió a manifestarse fue en diminuta cantidad que la regular costumbre. (2 de diciembre de 1755)”	Aminoration springs flows	In metamorphic, undifferentiated rocks.
69	Añora, Córdoba.	“Observaron asimismo algunas personas que a la sazón se hallaban junto a los pozos y fuentes, que el agua subió (siendo así que estaban tan bajos que necesitaban cinco, seis y siete varas de sogá) que se salió de ellos, rebosando y haciendo espuma, y saliéndose como si estuviese al fuego”	Incremented level in Wells	In granite.
31	Santaella, Cordoba	Revosaron los pozos	Incremented level in Wells	
31	Arcos de la Frontera, Cádiz	“El agua de los a jibes y pozos se movió con gran ruido y violencia; de muchos salió por la boca, y en la fuente de esta ciudad (que es una grande caja sin cañería) hizo el mismo movimiento, y ruido. El río se enturbió; por partes se fue a un lado fuera de su madre, y por otras del opuesto, en las que dejó pescado de el que cría; en algunas quedó sin agua; en unas lo vieron hervir como si tuviera fuego debajo; y en otras batallar en olas como las del mar.	Incremented level in Wells Incremented streamflows Liquefaction	Liquefaction occurred in the alluvial of the river. The fountain in the village drains an aquifer in calcarenite.
3	Arroyo de la Luz, Cáceres	“Algunas fuentes se le aumentó el mineral tomando corriente. Un pozo que estaba lleno se le fue el agua y quedó quasi vacío. Otros se les enturbió el agua, y en la charca de un molino harinero sobrevino tanta agua sin entrarle de parte alguna, que habiendo estado moliendo a hilo tres días se iba el agua por la pesquera. “	Incremented spring flow Water turbidity Level well oscilation	It is mostly located in granite.
4	Arroyomolino de Montácher, Cáceres	“Después se ha experimentado que desde la hora en que hubo el enunciado temblor se han perdido y minorado dos veneros de aguas, y aumentándose su crecida abundancia uno que se dice la fuente Herrumbrosa. Y en alguna cantidad menor que la que dicha queda otra fuente que se dice del Contadero, habiendo resultado otros veneros de aqua en lugares donde no se han conocido jamás.”	News springs Springs alterations	All springs are associated with granite and a major fault. One of the springs is ferruginous.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
70	Astorga, León	“, y sí sólo en los pozos de diferentes casas se oyó mucho ruido y brotaron para arriba, y en una fuente copiosa que hay en el lugar de Zelada, un cuarto de legua de aquí, se revolvió de tal forma de color de azufre que sus naturales no las bebían, pero a los tres días se aclaró, y hoy echa dos veces más agua que antes del terremoto, y aunque se dicen de otras muchas fuentes y ríos diferentes movimientos no me constan, como sí de todos los que llevo representados.”	Incremented level in Wells Incremented persistent spring flow	It is likely the source of the “Siete Caños” spring. Associated to a major fault. In undifferentiated Neogene lithologies.
32	Ayamonte, Huelva	“...que con terremotos se haya abierto la tierra, y gretado [sic], vertiendo aguas y arenas, y partiéndose peñascos, y abriendo bocas como de tres varas de diámetro, y todo regato y arroyo, sin haber llovido, toma aguas en abundancia, de no dejarse vadear y moler los molinos de agua dulce, como ha sucedido en estas cinco leguas con este terremoto “	Liquefaction Mud volcano?? Incremented spring and streamsflow	The liquefaction and the flow increase in the streams are associated to the Quaternary marsh (silt, sand, clay, and gravel).
17	Badajoz, Badajoz	“También se asegura que viendo muchos en esta población, y huertas de su término, los pozos con escasez de agua, los más de ellos se han enriquecido, porque venciendo la fuerza del terremoto los conductos, fue su violencia bastante para que las aguas abunden, y en algunas de las fuentes de los pueblos de la Provincia se han experimentado iguales y contrarios efectos, en unas que las aguas han abundado, venciendo los impedimentos que había en sus minerales y manantíos, minorando el caudal en otras, por haber puesto embarazos en su curso, habiéndose observado en la profundidad de los pozos, un ruido tremendo en toda la duración del terremoto”	Incremented level in Wells Incremented spring flow Springs alterations	Springs are associated to granites, and wells probably to alluvial and altered zones. Possible liquefaction in alluvial.
33	Bailén, Jaén	“...habiéndose advertido que, de muchos pozos, no obstante ser los más de esta villa de hasta diez y seis varas de sogas saltaron y bosaron [= rebosaron] las aguas, y que las de la fuente, única de que se abastece este común, y vienen de una grande y profunda mina, se detuvieron algún espacio, aunque corto, de tiempo, corriendo después algo turbias lo más del día”.	Incremented level in Wells Water turbidity	In the Batolito de los Pedroches' granite.
71	Ballesteros de Calatrava, Ciudad Real	“Y en el mismo tiempo, según nos hemos informado y advirtieron diferentes personas de distinción y otras que se hallaban en despoblado, se movieron las aguas de los pozos con tal fuerza que subieron a proporción de su estado. Y en las fuentes salieron de ellas con furioso estrépito, que dejaron atemorizadas las personas que lo vieron”	Incremented level in Wells Incremented spring flow	Associated with the intersection of major faults, and aligned with the water point 57 following one of them.
102	La Bañeza, León	“En las fuentes, pozos y ríos, tampoco se advirtió novedad especial, a excepción de en uno de los de este pueblo, que es el pozo de la Casa del Estanco, en que se observó que por unas horas después del temblor primero estuvo tan alterado que arrojaba continuas olas de agua, pero no salió alguna fuera de él, sin embargo de ser profundo como tres varas”	Incremented level in wells	In detritic Neogene, in a major fault, aligned with point 70.
103	Barbastro, Huesca	“Y sólo en los lugares de Crexenzan [= Cregenzán] y Elgrado [= El Grado] notaron que el agua de una balsa que hay en cada pueblo salió de ellas, y se distribuyó por el campo y circunferencia de dichas balsas, sin duda al impulso del movimiento”	Incremented groundwater level	In the contact between the Neogene of the Ebro Basin and the Pre-Pyrenees.
104	Becerril de Campos, Palencia	“Y en algunos, o los más, de los pozos (que río no hay) dicen que subió el agua más de dos varas. * En las fuentes se reconoció alteración alguna, acaso porque a las que se pudo ver, vienen las aguas de que se surte, por conductos y manantiales bastante distantes”	Incremented level in Wells	In Neogene clay. A Castilian Rod (Vara Castellana) is 0.84 m.
105	Begijar, Jaén	“Sí se experimentó en las fuentes, que en el tiempo de dicho terremoto su correr fue con mucha lentitud, y los pozos se reconocieron subir el agua de su natural curso más de cuatro estados”	Incremented level in Wells springs alterations	In detritic Neogene and alluvial materials. Near the contact between geological units. Aligned with point 44.
106	Belmonte del Tajo, Madrid	“En la fuente de este pueblo se vio faltar la agua del pilón, como me cuentan”	Springs alterations	In the contact between Pontian limestones and Neogene marls.
5	Benquerencia, Cáceres	“En cuanto a los minerales de agua, hoy se registra abundado tanto que manan más de dos tercias partes más que anteriormente (29-XI-1775)”	Incremented persistent springs flows	Springs associated to granite and two major faults.
107	Berceruelo, Valladolid	“Y también el que el agua que cae del caño en el estanco (o estanque) ésta la vieron salir con violencia de dicho estanco y que en las casas se reconoció un extraño movimiento, sin poder informar de otra cosa”.	spring alterations	In the contact between Pontian limestones and Neogene marls
108 109 111	Besalú, Gerona	“Lo que también se experimentó, según nos han informado, en una fuente del lugar de Mayá [= Maià de Montcal], en otra del lugar de Beuda, y en otra del lugar de Albanyá [= Albanyà], de este dicho Partido y, asimismo, que en otra fuente del expresado lugar de Mayá [= Maià de Montcal], que antes de dicho día llevaba agua con abundancia, empezó en dicho día a extinguirse, de suerte que, al presente, se halla casi del todo enjuta, lo que desde que se ha sabido el temblor acaecido se atribuye a efectos de aquél, respecto de que en dichos pueblos y circunvecinos ha tiempo que no ha llovido ni se ha experimentado otra cosa que pudiese ocasionar dichos movimientos. 3-XII-1785”	Spring flow alterations	108. In the contact between geological units, and associated to a thrust. 109. In metamorphic rocks. 111. In metamorphic rocks, and associated to a major fault.
112	Boñar, León	“Y también en dicho día se reconoció haber salido el agua de algunas fuentes turbia y de color del territorio donde salen dichas fuentes, aunque esto no sucedió en todas, lo que causó novedad por no haber llovido muchos días antes”	Turbidity in springs	In the contact between the Neogene and the Paleozoic units of the Cantabrian Mountains.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
113	Borja, Zaragoza	“También se notó que a la propia sazón del terremoto, el agua de algunos manantiales salió turbada y como de color rubicundo”	Turbidity in springs	In the Jurassic limestone that appear between clayey Neogene materials. They are artesian wells associated to a fault that only affects the Jurassic materials.
6	Botja, Cáceres	“Como también consideramos, y todos lo asientan, que los minerales de las fuentes manan dos tercias partes más que anteriormente. Esto es en fuentes naturales de todo el año, que otras que sólo son de invierno, y tienen agua cuando llueve, empezaron a manar y correr como se experimentó en un sitio que en la dehesa de esta villa le dicen las Bohonales, aunque la fuente está a poco dentro en el término de la villa de Torremocha, y le hace correr hasta el de éste. Tiene en esta villa un arroyo que se dice Tamaja [= Tamuja], que sólo corre en el invierno por tener su origen de la Sierra de la Zarza, dos leguas de esta. Y en medio de estar seco a gota alguna de agua, desde cierto paraje echó a manar y correr de tal forma que fue llenando los charcos de abajo, que los hay tan profundos, que tienen más de dos varas y este manar cogerá medio cuarto de legua que ha llenado”	News streamflows Incremented streamflows News springs or incremented persistent springs	In granite, close to cornubianite and mottled slate. Associated to a major fault, and aligned with water points 5 and 6.
114	Brunete, Madrid	“La laguna de agua que está en medio de la villa se notó que estando serena la mañana se formaron violentas olas que arrojaban el agua más de dos varas de su centro, volviéndose a introducir y repitiendo al salir”	Water level alterations	In the detritic Neogene Madrid aquifer.
72	Bujalance, Córdoba	“Por lo que respecta a fuentes y ríos, sólo puedo informar de los pozos, que hay en esta ciudad, que algunos de ellos, sin embargo de estar el agua del brocal como treinta varas, subió ésta con el dicho terremoto hasta el citado brocal, y en otro se vio hacer el agua movimientos extraordinarios, como cuando nace en alguna fuente mucha porción de ella con violencia, y lo mismo se advirtió en algunas cortas fuentes. Y de río no puedo expresar cosa alguna mediante a que no lo hay en esta ciudad”	Incremented level in Wells Incremented spring flow	Located in detritic Neogene materials but near a major normal fault.
34	El Burgo, Málaga	“También se notó que el nacimiento del río de esta villa, como a las dos de la tarde salió turbio, y el del pozo de la Noreta, lo mismo, con mucho más caudal de agua que antes tenían, fundamento con que los prudentes infieren haber padecido estos minerales, en el breve rato que duró, grande movimiento y alteración”.	Incremented spring flow Incremented level well Turbidity	The spring is in the Jurassic limestone aquifer and the underlying Cretaceous flysch contact.
73	El Burgo de Osma, Soria	“La fuente nacimiento del río Usero [= Ucero], que riega este territorio, suspendió por algún tiempo su curso, lo que advertido por el molinero más cercano, y después por todos los vecinos de aquel pueblo [= Ucero], acudieron a su origen, y hallaron ser cierta su falta, y que se mantuvo así como por espacio de tres horas, en que volvió a su antiguo ser, aunque despidiendo turbia el agua”	Interruption flow spring Turbidity	It is a large karstic spring that drains an aquifer of limestone from the Cretaceous.
19	Cabeza de Vaca, Badajoz	“A una fuente de dos que hay en esta villa, se le suspendió la corriente, interin del terremoto, que duraría diez o doce minutos, y pasado este tiempo fue tanto el ímpetu de agua que no pudiendo salir por sus conductos, reventó por otras partes. Lo mismo sucedió a otra fuente que está en el término de esta villa, que se dice de la Sarganta, y después de la suspensión arrojó con mucha abundancia la agua y tan encarnada que se atemorizaron los que la veían”	Incremented flow spring Turbidity	In Precambrian slate and quartzite, although close to granites.
115	Cabezas del Pozo, Ávila	“Y asimismo se vio que una laguna que hay contigua a dicho lugar salió fuera de madre más de dos varas, lo que causó mucha admiración y espanto, que duró dicho temblor como medio cuarto de hora, poco más o menos”.	Groundwater level alteration	In the detritic Neogene, and associated to a major fault.
259	Cabra, Córdoba	Aumentó el caudal de las fuentes	Incremented level in well	In undifferentiated Neogene
7	Cáceres, Cáceres	“Luego, aquella mañana, a la hora de diez y cuarto, se experimentó en todo este pueblo, y país, el terremoto ya expresado, y se advirtieron extraordinarios efectos en los minerales de agua, pues en la fuente llamada del Rey, que riega todos los plantíos y hortalizas de la ribera de esta villa, en la distancia de una legua, y da uso a varios molinos y otras oficinas, tomó nuevo incremento en bastante abundancia que subsiste todavía. Y en otras fuentes se reconoció igual aumento, reconociéndose en alguna haberse enturbiado el agua (22 de noviembre de 1755)”	Incremented persistent springs flows	In Cambrian limestone but very close to the contact with granites.
74	Cádiz		Liquefaction	In clay.
75	Calatayud, Zaragoza	“Jaraba. Que no se ha sentido temblor, pero que se ha notado haberse enturbiado las fuentes, y el río [= Mesa] por tiempo de día y medio”	Turbidity in springs	There is an important thermal spring (34 ^o) associated to a first-order fault that puts Cretaceous limestone aquifer in contact with Neogene clay from the Almazán Basin.
260	Cantabuel, Córdoba	La fuente arrojó en el primer terremoto mucha agua negra	Turbidity in spring	
261	Cazorla, Jaén	Corrieron turbias las aguas de las fuentes	Turbidity in springs	In undifferentiated Mesozoic-Neogene border.
116	Ruesca, Zaragoza	“... por causa de el terremoto se asustaron los habitantes, y por espacio de medio día salió el agua de la fuente turbia; pero que no se ha notado otra cosa, sino el haberse hecho una abertura, aunque pequeña, en el coro de la Iglesia”	Turbidity in springs	In the Neogene of the Calatayud-Teruel Basin, near an active NO-SE fault.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
117	Acered, Zaragoza	"...habiendo advertido que las fuentes se enturbiaron"	Turbidity in springs	Next to an active NO-SE fault.
118	Clarés de R bota, Zaragoza	"Y asimismo, se notó en el mismo día haberse enturbiado el agua de la fuente, que no hay quien la haya visto en esta forma, y le duró esta mutación cuatro días"	Turbidity in springs	In Neogene materials of the Calatayud-Teruel Basin, at the end of an active NO-SE fault.
119	Abanto, Zaragoza	"Y, asimismo, que el agua de la fuente por tiempo de 24 horas salió rubicunda y turbia"	Turbidity in springs	In Paleozoic schist and quartzite of the Iberian Range. Near a major fault.
120	Torrelapaja, Zaragoza	"...y que como 6 horas se enturbiaron las fuentes, y el río; habiendo durado el terremoto como medio cuarto de hora"	Turbidity in springs	Many of them are draining Jurassic and Cretaceous limestones. Near active faults.
76	Ahama de Aragón, Zaragoza	"Que un vecino, en una sima de agua que hay en heredad suya, próxima al lugar, advirtió por tiempo de ocho días, grande ruido, y al surtir el agua, como bramidos, y que a poca distancia de dicha sima hay una peña grande que abrió el terremoto, y de ella sale una fuente, que destila una muñeca de agua, sin haberse notado cosa alguna en el lugar"	News springs	It is the most important thermal spring (34°C) in Spain, associated with the first-order fault of Alhama, which puts the aquifer in the Cretaceous limestone in contact with Neogene clay from the Almazán basin.
121	Bijuesa, Zaragoza	"...y que una fuente de 24 caños, por tiempo de 12 horas, dio el agua turbia"	Turbidity in spring	In Cretaceous and Jurassic limestones, near active faults.
122	Carenas, Zaragoza	"...Que como a las 10 de la mañana de dicho día, por breve tiempo, se notó dicho terremoto, y que se enturbió el agua del río"	Turbidity in river and springs	In metamorphic rocks, and associated to NE-SO faults.
123	Monterde, Zaragoza	"...y enturbiándose por algunos días el río"	Turbidity in river and springs	In undifferentiated Mesozoic materials of the Iberian Range.
124	Pardos, Zaragoza	"...y la fuente, por todo el día, salió turbia, que no se pudo beber el agua"	Turbidity in spring	In the contact of Palaeozoic metamorphic rocks with the Mesozoic sedimentary covert.
77	Berdejo, Zaragoza	"...y el haberse enturbiado el río [= Manubles], con cuya novedad, habiendo ido a reconocer los manantiales, o fuentes, de donde toma su origen, se hallaron unos turbios, otros rojos, y otros blanquinosos"	Turbidity in spring	Springs of more than 100 l/s that drain karst aquifer from Cretaceous and Jurassic limestones.
125	El Frasno, Zaragoza	"Que a las 10 1/4 de dicho día se advirtió moverse la Iglesia, y edificios, y surtir las aguas"	Hydrological alterations	In Palaeozoic schist. Very close to an active fault.
126	Nuévalos, Zaragoza	"También se notó en el día siguiente, haberse enturbiado el agua del río [= Piedra], sin haber llovido ni nevado, habiendo durado esta novedad 3 ó 4 días"	Turbidity in river and springs	In regional-scale faults that affect the Jurassic carbonates. It includes a 63oC thermal spring (spa).
127	Ibdes, Zaragoza	"...habiendo hecho sentimiento una pared, y enturbiándose el agua de la fuente"	Turbidity in spring	In the contact of the clayey Neogene of the Cuenca de Almazán with the Aragonese branch of Iberian Range.
78	Caldes de Malavella, Gerona	"Que el día siguiente dos, del citado mes de noviembre, se experimentó que las expresadas fuentes de la agua caliente se ban disminuyendo; en tanto que a las 11 de la mañana del mismo día, de las 7 fuentes [que] se hallan endicha villa, ya había cuatro que estaban totalmente enjutas, y las tres restantes han disminuido dos tercios de la agua, que manaban de antes, y no tan caliente, como de antes de experimentarse el terremoto, y muchos caños de agua que había a las cercanías de dicha villa, se experimenta se van enjugando de un día para otro, que es de mucha consideración, por la que salía de antes de dichos caños. 3.o Que cerca [de] la mencionada villa, a distancia de 200 pasos se halla un montón de terreno de peña cortada de ruedo de una vasana, en donde se hallan 3 fuentes, y entre ellas una de agua picante, y se experimentó el citado día 2 de noviembre que dicha fuente se alborotó con dicho terremoto, que se extendió por el dicho montón de terreno, sacando de dicha fuente una grande porción de lodo, como si fuere ceniza. Y esta fuente se ha disminuido de las ocho partes las siete, y esta parte que ha quedado de agua, en el estado presente se mantiene con los mismos movimientos que tenía de antes del terramoto [sic]. 3.o Y después acá ha experimentado que de dicha fuente de agua picante salen unos carbones color castaño, como es de ver de la muestra que se entrega; lo que jamás se había experimentado ni oído a decir. Cerca la expresada fuente hay dos de otras, y estas son de agua caliente, las que se han enjugado, y sólo de donde salía la una de tanto en tanto se experimenta que va como si quería hervir, y saca una poca de agua, pero sin color alguno, y después se vuelve a enjugar, y saca unos carbones color de ceniza, como si fuese escoria de hierro (como se ve por la muestra que se entrega) lo que jamás se había experimentado, ni se había oído decir tal cosa. Y de los caños que manaban las aguas de dicho montón de terreno (que eran muchos), solamente han quedado dos, o tres, pero no manan tanta abundancia de agua como antes" (3-XII-1755).	Turbidity in springs Grounwater chemical alterations Flow spring alterations Temperature water alterations	Very important springs associated with a fault intersection. It seems the reactivation of an active fault after the Lisbon earthquake.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
79	Calzada de Calatrava, Ciudad Real	“Se advirtió por las personas que aquí firmarán, antes del expresado terremoto, que el agua de las fuentes y demás pozos usuales estaba turbia, de mal olor y sabor, lo que atribuían, por entonces, a las muchas lluvias que habían precedido. Y porque, en ocasiones, de iguales lluvias no se han experimentado los expresados accidentes, se persuaden podrá ser la causa los materiales que motivaron el terremoto, que, puestos en desordenado movimiento, perturbaron las aguas y les comunicaron el mal olor y sabor que se les notó. Y que éstas se sublevaron de su natural, tanto que los pozos crecieron cuasi hasta igualar la haz de la tierra, teniendo de profundidad ocho o diez varas, y creen sería porque los hálitos de dichos encendidos materiales los estremecían y alteraban”	Turbidity in springs and Wells Oscilation level of wells	In basalt.
80	Molló, Gerona	En el Prats del Molló una fuente dio un estallido con incremento súbito de caudal y salía muy turbia y colorado. Y luego se secó en cuestión de minutos. Luego surgió otro ímpetu de agua y volvió a secarse. Y volvió a crecer. Y durante ocho días salió turbia y colorada. Temblaba el suelo de la fuente. Se enturbió el río	Turbidity in springs Flow spring alterations	Associated to an active fault.
81	Vallfogona de Ripollès, Gerona	Dos fuentes se enturbiaron y enturbió el río	Turbidity in springs	It stands at the front of an important thrust.
128	Sant Martí de Surroca, Gerona	Se enturbió el torrente del Collado del Pal, donde nace	Turbidity in river and springs	Located in an E-W thrust of the Pyrenees. In metamorphic rocks.
35	Cañaverall de León, Huelva	“...siendo de notar el que la fuente concejil, que es mineral bastante crecido se sumergieron y recogieron sus aguas, quedándose secas en el todo, por espacio de medio cuarto de hora Y pasado éste, volvieron dichas aguas con tanto esfuerzo y abundancia, que corrían con quince o veinte grados más de lo que antes que acaeciera dicho temblor, saliendo las expresadas aguas revueltas, con cieno, incapaces de poderse usar por su malo color.”	Flow spring alterations Incremented groundwater temperature Turbidity in springs	In granite and metamorphic rocks. Associated to a thrust. Points 19 and 23 are also aligned with this thrust.
129	La Campana, Sevilla	“..., y dos fuentes de alguna profundidad vertieron el agua, elevándose esta más de tres varas”	Incremented flow springs	In a fault under the Quaternary-Pliocene clayey sediments. Aligned with point 45 along the fault.
130	Cantillana, Sevilla	“En el río Gualdalquivir, que pasa contíguo a esta población, y en los pozos eran tan bulliciosos los movimientos que elevaban sobre modo las aguas, rebosando muchos de estos”	Oscilation level in wells	It is at the contact of the terrace of the Guadalquivir River with the granite pluton of Sierra Morena.
82	Lora del Río, Sevilla	“Diferentes arroyos que hay en término de dicha villa, que bajan de Sierra Morena, que unos estaban secos, y otros con muy poca agua abundaron tanto en estas, que los molineros harineros pudieron moler, y continuaron sin represas”	News streamsflows and incremented streamflow	In a granite pluton; there is also gneis.
83	Brenes, Sevilla	**...que el agua de los pozos se movió creciendo extraordinariamente” En Tocina: “...que el agua de los pozos se movió creciendo extraordinariamente”	Incremented level in wells	In the alluvial materials of del Guadalquivir River.
131	Manresana, Barcelona	“En este pueblo hay una balsa, bastante grande, y se ha observado el día 1.º de noviembre, a las 10 de la mañana, poco más o menos, que ésta se partía por el medio y poniéndose su agua muy turbia, y con mucha espuma, sobrepujo la pared [sic], que la cerca por la parte del Mediodía, no obstante de tener unos seis palmos de alto; y corrió por el camino más de 200 pasos, y no se ha sentido el terremoto”	Hydrológical alteration	Neogene clays.
132	Gàver, Lérida	“En este hay tres fuentes, una que es madre del torrente llamado la Riera de Sió, y se ha observado dicho día, y a la misma hora, que su agua salía turbia, cuya novedad duró 4 horas, y no se ha sentido el terremoto”.	Turbidity in springs	Neogene clays.
133	La Baronía de Rialp, Lérida	“...Por esta pasa una río del mismo nombre [= el Ria b], y aunque no es muy caudaloso, es regular según los de este país, y se ha observado, a cosa de las 12 del referido día, que su agua cesaba de correr, tanto que han dejado de moler dos molinos de harina, que hay en él. A la una, poco más o menos, se ha visto que el agua corría en mayor abundancia de lo que solía, y de un color que en aquel contorno no se halla tierra que se lo pudiese comunicar, habiendo sucedido lo mismo con el agua de dos fuentes que hay en dicho pueblo, y no se ha sentido el terremoto”	River and springs flow alterations Turbidity	Over an E-W thrust in the limestone of the Pre-Pyrenees.
84	Chiclana de la Frontera, Cádiz	“La misma mañana, en el acto del tremor de la tierra, por tres veces rebosó la fuente común del abasto de ella, que siempre tiene más de tres varas de vacío. Muchos pozos de esta villa hicieron lo mismo, y otros tomaron de ocho a diez varas más de agua de la que regularmente tenían, y en que poco a poco se fueron evacuando”	Incremented flow in springs Incremented level in wells	In Pliocene limestone, sand, and marls. Also in alluvial materials of the Salado River. This spring feeds a health resort (spa).
85	Chinchilla, Albacete	“Los pozos traían tal alboroto en sus aguas que ponían terror, muchos se quebraron y muchos, aunque muy profundos, hicieron brotar sus aguas hasta vaciarse”	incremented level in wells	Located in a fault of regional importance and near a contact of two geological units.
86	Cieza, Murcia	“Sólo una fuente enturbió sus aguas, y otra las acrecentó en alguna parte aunque corta, y a su distancia de cien pasos rebosó, en posesión de Don Matías María y Melgares, presbítero de esta villa, al parecer bastante porción de agua; y siendo su terreno seco, humedeció más de cien varas cuadradas con manifestación de alguna poca agua en la superficie y por su parte inferior corre como cosa de un dedo, que se percibe del mismo gusto que la que da la contigua fuente. Esta extrañeza que jamás se ha visto, aún en los años más lluviosos en el expresado terreno, ha puesto a su dueño en la curiosidad de descubrir su nacimiento y origen, para reducirlo a su primer estado o beneficiarlo como mejor tenga por conveniente”	Incremented flow in springs New spring	Located in a fault of regional importance and near a contact of two geological units.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
87	Cifuentes, Guadalajara	"En las fuentes se advirtió que, por espacio de 12 minutos, estuvieron las aguas suspensas, y después corrían de color de la tierra, y así se mantuvieron más de cinco horas"	Springs flow alterations Turbidity	Springs that drain the calcareous aquifer of the Pontense, but also very close to a fault of regional importance.
20	Ciudad Rodrigo, Salamanca	"En la actualidad de este [terremoto] se experimentó haber tomado corriente de aguas diversas fuentes que hace algunos años la habían perdido y se hallaban secas, lo que hoy mantienen. (3 de diciembre de 1755)"	News persistent springs	Associated to a major fault. In Neogene sandstones and conglomerates, near contact with Cambrian slate and schist.
134	Coca, Segovia	"Lo propio sucedió, y a la citada hora, en las nueve leguas de su jurisdicción y en la Nava [= Nava de la Asunción] he sabido por don Diego de Toledo, como titular de la Iglesia de aquel lugar, que en una laguna que está dentro de él se elevaron las aguas sobre dos varas en alto..."	Water level alteration	In a major fault. Aligned with points 96-115 and 134. In detritic materials of the Neogene.
36	Coín, Málaga	"El nacimiento de agua que fecunda a esta villa para regar un crecido número de huertas que, en toda su circunferencia tiene, y con el que muelen 15 molinos harineros, dejó de ella con su corriente, sin embargo de ser tan copioso, a las tres repeticiones de dicho temblor, hizo igual suspensión. Y con otros tantos impulsos, con mucha violencia y ruido en dicho nacimiento, volvió a continuar de forma que el que en él se halló (está como a distancia de un cuarto de legua de esta villa) le ocasionó mucho mayor susto que el mismo movimiento de tierra, y la mayor parte del día permaneció su corriente tan enalmaorada que parecía una sanare"	River and springs flow alterations Turbidity	Associated to a thrusting, highly fractured, area. In Palaeozoic peridotites and microconglomerates.
135	Corbera, Valencia	"...como en las aguas del río (Júcar), cuyas olas, a una y otra orilla se hicieron muy grandes, quedando el agua muy turbia, y bastante alterada"	River and springs flow alterations Turbidity	..
???	Cuellar, Segovia	"...también se notó por muchas personas movimiento extraordinario de aguas en avanzadas oleadas de fuentes y ríos de esta circunferencia"	River and springs flow alterations	
136	Cuenca	"Aquí no hubo antecedente alguno, ni señales de ese inopinado fracaso, aunque no faltan personas que aseguran que el río Júcar estuvo turbado tres días antes, como lo ha estado después, y juntamente los demás ríos, fuentes y arroyos de esta Serranía, que es lo único que se ha observado en esta ciudad"	River and springs flow alterations	At the contact between the Cretaceous carbonates and the Neogene clay.
137	Daroca, Zaragoza	"En el lugar de Bea, situado a la falda de la gran Sierra de Oriche (cuatro leguas de la presente ciudad) hacia el Oriente, y fundado sobre un peñasco fortísimo, no se conoció el terremoto, pero se experimentó, con asombro de sus habitantes, que una fuentecilla (cuyos cristales jamás se han visto todos por saltar del centro de una peña viva), a la misma hora que en los demás pueblos, mudaron de color sus aguas, y corrieron por espacio de cinco horas de color de sangre, sin que apenas de este día se había notado en estos distritos alguna novedad, ni desgracia de personas ni animales..."	News springs Turbidity	In an active fault, in the Calatayud-Teruel Neogene Basin.
138	Dólar, Granada	"Sólo se conoce que no viene agua en el río, tanta como solía, y se atribuye a que será más por los hielos que hacen que en otra cosa"	Incremented flow in river and springs	On the edge of the Neogene.
139	Donjimeno, Ávila	"Y que sólo se vio en la laguna que está junto a la Iglesia, había crecido como una vara alrededor de ella, y por dos partes que suele correr cuando está bien llena, salió la señal del agua, como tres varas o más"	Water level alteration	In a major fault. In undifferentiated Neogene.
140	Donvidas, Ávila	"Y después de haber referido cada uno lo que había sucedido, se vio la laguna, a donde el ganado se mantiene, haber salido de madre diez pies, esto esto [sic] [es lo que] que puedo decir"	Water level alteration	In a major fault. In undifferentiated Neogene.
262	Dueñas, Palencia	Las aguas se enturbiaron en general y las de un pozo se mantuvieron turbias durante un tiempo	Turbidity in spings	
263	Écija, Sevilla	"Las fuentes y cañerías públicas necesitaron crecidos caudales para su compostura..."	Incremented flow in springs	In undifferentiated Mesozoic-Neogene contact.
21	Feria, Badajoz	"Después lo que han notado es hallarse las aguas de fuentes, pozos y aún arroyos lactirinosos [sic], a causa de los azúfres que se sublimaron; algunas fuentes que estaban escasas, se mantienen hasta el día de hoy abundantes; otras aparecieron que no se conocían; y algunas crecidas se perdieron; lo que es regular en tales movimientos que compactando las porosidades de la tierra por una parte y dilatándolas por otra, desentonan la dirección y economía antigua de las aguas. (Diego Bezarrázid Figueroa. Feria. 26 de noviembre de 1755)"	News persistent springs Incremented persistent springs	Associated to a thrust. In Cambrian sandstone and slate.
264	Fernán Nuñez, Córdoba	Rebosó el agua de los pozos	Incremented level in wells	In undifferentiated Mesozoic-Neogene contact.
88	Fuencaliente, Ciudad Real	"Y en una de las fuentes, extramuros de esta villa, que llaman del Compadre, se advirtió que en el resto de aquel día no se pudo coger para beber su agua, a causa de lo sumamente encendida su color, pareciendo ésta haber pasado su venero por tierra encarnada, y después ha vuelto a ponerse con la claridad, sabor y gusto que antes tenía"	Turbidity in springs	In granite but also associated with a fault. It is probably the thermal spring of a spa, of ferruginous waters.
141	Fuenlabrada, Madrid	"Habiendo sólo sí reparado muchos en los pozos de sus casas, que todo el tiempo de su duración, las aguas de ellos se llevaron y subieron hasta casi los brocales, como agua a quien la han puesto fuego para hervir"	Incremented level in wells	In the Detritic aquitard of Madrid.
265	Fuente Ovejuna, Córdoba	El agua de las fuentes corrió turbia	Turbidity in springs	In undifferentiated metamorphic rocks.
142	Fuentidueña, Segovia	"Y sólo se reconoció en el lugar de fuentesoto [= Fuentesoto] que una fuente muy perenne, y de mucho caudal, cesó de manar por un minuto. y pasado. continuó como antes. saliendo el agua negra"	Spring flow alteration Turbidity in springs	In the contact of the Cretaceous carbonate and the Neogene claststone.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
37	Gibraleón, Huelva	“Con cuyo motivo se notó en las fuentes, en unas, el rebosar sus aguas, cuando otras secarse; habiendo hecho manantiales de sus aguas, a distancia de 20 y 40 pasos; siendo en igual conformidad el río [= Odiel], quien en los mismos términos, sintió la alteración de la tierra, pues por tres veces se dilató, y encogió, habiéndose puesto sus aguas de color de ladrillo, sabiendo en sus proximidades, unas de a cien pasos, y otros, como de 200, brotar sus aguas, con más de ocho codos de elevación, cuando por otras, respirar tales y tan fuertes vejigas de aire, que parecía sumergirse enteramente, cuando se sufría sobre el firmamento de la tierra”. Licuefacción, volcanes de agua.	Liquefaction Mud volcano	They refer to the so-called "Huelva springs" that arise from a well in carboniferous clayey-shale, covered by quaternary materials. In 1865 they had 1.25 l/s but dried up during severe dry periods. Liquefaction in the alluvial materials of the Odiel River, formed mainly by clay and sand.
143	Girona	“Sí que en algunas partes repitió el mismo temblor de tierra por algunos días después, habiéndose agotado diferentes fuentes, y, en particular, algunas de las de la villa de Caldas de Malavella [= Caldes de Malavella]”	Drying of Springs	In granite and associated with active faults.
144	Granada	En Guevejar: “La fuente, que era muy abundante, se hundió, y ha reventado por otra parte algo distante el agua”	Spring flow alteration	In the contact between calcareous tuff and clays. It suffered a land slide. Near an active fault.
145	Guadalajara	“Y por las noticias de lugares convecinos, igualmente consta: que a la misma hora, con corta diferencia, se advirtió en la villa de la Torre de Beleña [= Torrebeleña] igual temblor, y poco después, que las aguas de la fuente de que comúnmente se surte aquel pueblo, se enturbiaron y permanecieron por más de dos horas sin poderse beber; y otra, que en su término se halla en una altura, igualmente se enturbió y permanecía así hasta la hora de las seis de la tarde del mismo día”	Turbidity in springs	
147	Hinojosa del Duque	“En las fuentes y pozos se experimentó y observó alborotarse y subir las aguas de su estado natural”	Spring flow alteration Incremented level in wells	In the granite of the Pedroches batholith.
148	Hontoba, Guadalajara	“Y sólo lo que más se ha notado es que una fuente, que tiene su nacimiento dentro de este pueblo, manó turbia por espacio de dos horas continuas después de dicho terremoto, sin que persona alguna haya notado señales anteriores a este suceso”	Turbidity in spring	In the contact between the Pontienne limestone and marl.
149	Hoyales de Roa, Burgos	“Y también observó que durante el movimiento siguiéndole las aguas se perturbó el natural suyo, y pareciera que se encrespaban y retrocedían”	Hydrological alterations	In a fault that crosses the Detritic Neogene, and aligned with other water points.
39	Huelva, Bolullos	“Volviendo a las particularidades del terremoto, es cierto que algunos días antes que sucediera, se observó mucha escasez en los pozos, que daban antes abundantes aguas, y que éstas como las de la fuente, salían algo turbias, y sin la dulzura que les era natural”, “En la Dehesa de Montañaña, término de Bolullos [= BolullosPar del Condado] se halla una como de veinte varas de circunferencia, que arrojó, a tiempo de abrirse, muchas aguas fétidas y arenas quemadas, que han desconocido los naturales que no sean propias de aquel término.	Liquefaction Mud volcano	Quaternary liquefaction in clayey-sandy marsh.
38	Huelva, Saltes	* En la isla de Salte [= Saltes] o de Hércules, a la entrada de la barra de esta villa, y en la confluencia de los ríos Odiel y Tinto, se abrieron dos, tan profundas, que habiendo después inundado el mar aquel paraje, se desaguó por ellas y cerraron presas.	Liquefaction Mud volcano	Liquefaction, it seems that is near the Noria Farías, in soft sandy-clayey rock. This source also was an ancient water source for Huelva; the water was carried in carts.
40	Huelva, Rábida	* En el ángulo del convento de la Rábida [= La Rábida], que hace frente al mar, reventó una columna, o vejiga de aire, abriendo en la tierra una gran boca por la cual vio el Guardián y mucha parte de la Comunidad, que salió un grueso golpe de agua, elevándose más de ocho varas y dejando después muchas arenas y otros materiales”. Licuefacción. Volcanes de fango?	Liquefaction Mud volcano	Liquefaction in Miocene, where there are levels of sand interbedded with poorly permeable marl and clay.
89	Huete, Cuenca	“El pequeño río de esta ciudad, denominado Cauda, cuyo nacimiento dista de ella un medio cuarto de legua y, por salir hacia arriba se llama el Borbollón, aumentó su caudal en corta porción, al mismo punto que empezó el terremoto, arrojando las aguas turbias, y del color de ceniza, el que mantuvo por espacio de cuatro días, bajando de ellas proporcionadamente el citado aumento y color, y los ganados acostumbrados a servirse de dichas aguas, aunque fueron conducidos por sus pastores en el citado día a ellas, aseguran éstos no quisieron beberla” Huete, y noviembre 15 de 1755.	Incremented persistent streamflow and springs	It is situated at the edge of the Cretaceous limestones of the Sierra de Altomira geological unit.
90	Ibros, Jaén	“El agua de una fuente que llaman del Paraíso salió algo turbia. Las de los pozos se mantuvieron elevadas ocho días”	Turbidity in spring Incremented persistents level in wells	It seems to be a health resort (thermal spring).
150	Igualeja, Málaga	“Sólo se observó que el agua que salía del nacimiento que tiene este lugar se enturbió y duró algunos días el agua turbia y, además, muchas personas, al tiempo que duró el terremoto, discurrían ser accidente que les dañó hasta que después lo advirtieron que era temblor de tierra”	Turbidity in spring	It seems to be situated near an active fault.
151	Illescas, Toledo	“En las fuentes y pozos no se notó variedad, quizá por no atendidos, pero los pilones de aquellas arrojaban con ímpetu su agua azotada con sus márgenes”	Spring flow alteration	In Neogene marls.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
266	Iznajar, Córdoba	La fuente salió turbia	Turbidity in spring	In undifferentiated metamorphic rocks of the Betic Range.
91	Iznatoraf, Jaén	“Las fuentes dicen crecieron de forma que salió de ella mucha más agua que la que naturalmente brotarían, y del río Guadalimar, que está a una legua de distancia de esta villa, subieron las aguas más de dos varas y cuarto”	Incremented flow in river and springs	At the edge of the geological unit and associated with an important fault, aligned through it with the water point 85, and perhaps with the 72 and 90.
152	Jadraque, Guadalajara	“Y la de haber observado, en algunas partes, de privación cristalina de las fuentes, en sus aguas, por algún tiempo”	Temporal turbidity in Springs	In the contact between the Pontiene limestone and marl..
41	Jerez de la Frontera, Cádiz	“También se notó que este río, llamado Guadalete, por dos veces se dividieron las aguas, suspendiéndose su corriente con intervalo de algún tiempo, el que después volvió a su curso. Asimismo su nacimiento de agua muy abundante, con lo que muelen siete molinos de pan y riegan muchas huertas, aunque después de haber pasado el terremoto volvieron dichas aguas con mucha abundancia a que antes, y hoy subsiste con más, sin embargo de estar exenta de recoger agua llovediza.” 30-XI-1755. En Bornos: “ En un nacimiento de agua muy copiosa que hay en esta villa hubo notable alteración, pues advirtiéndose a el pronto el temblor alguna escasez en él brotó luego, con tanto acceso y abundancia, que ha admirado a todos, habiendo sido turbia la que salió en el principio del incremento”, “ Un nacimiento copioso de agua, que tiene este pueblo se reconoció con el terremoto con mucha más agua, la que, en parte, aún dura todavía”. Aumentó caudal de fuentes y ríos en general	Incremented flow in persistent river and springs Turbidity	In Miocene calcareous sandstone.
8	Jerez de los Caballeros, Badajoz	“Las aguas de las fuentes se enturbiaron, y en el término de esta ciudad algunas que no la tenían la manaron, y quedan corrientes para el beneficio de los ganados” (27 de noviembre de 1755).	Incremented flow in persistent springs Turbidity	In sandstone and slate near granites.
42	Jimena de la Frontera, Cádiz	“Las aguas de un río que pasa inmediato a esta villa se retiraron de modo que se descubrió el suelo, y inmediatamente volvieron a su sitio. Y los molineros de un molino que está en el mismo sitio vieron vosar [= rebosar] el agua de el cauz, próxima de las paredes, siendo así que era poca el agua que tenía el cauz. Asimismo, los hortelanos de unas huertas que están junto a dicho río dicen que alborotaron las aguas de las norias que parecía querían salirse”	Incremented flow in river and springs	It is the river Hozgarganta, whose basin is mostly in the Miocene sandstone, and secondarily in the Jurassic limestone.
43	Jimena de Libar, Málaga	“Los nacimientos de las aguas detuvieron su curso, y aunque después volvieron a correr, fue con aguas muy turbias, tanto que enturbiaron también el río Guadiaro que pasa por el término de esta villa, por venir a dar en él”. - Jorquera XXX, Albacete. “El río Júcar , que pasa próximo a esta villa, se menguó como dos partes de tres, y después se notó creció y se enturbió, pero en breve quedó en su ser”	Temporal drying in river and springs Turbidity	Associated to Jurassic limestone, mainly, and Miocene sand, and Cretaceous limestones, secondarily.
153	Jorquera, Albacete	“El río Júcar , que pasa próximo a esta villa, se menguó como dos partes de tres, y después se notó creció y se enturbió, pero en breve quedó en su ser”	Flow river alteration	In Cretaceous limestone.
154	Lebrja, Sevilla	“fuentes y pozos y en éstos haberse alzado el agua del ser que tenía con algún ruido.Subió el nivel de pozos”	Incremented flow in springs	In the contact between the marsh sediments and the sandy Miocene, in a fault that affects the substrate.
267	Ledesma, Salamanca	Los baños crecieron de modo que el caudal que se les comunicó por su ancha cañería, que se hubiera arruinado su fábrica y bóveda, si los bañeros y otras gentes no hubieran accedido a dar salida a las aguas. Duró su incremento como dos horas, y en ese tiempo estaban de color de azufre, quedaron después en el suyo natura y con agua aumentada.	Incremented flow in thermal springs Turbidity	In granite. Associated to a regional-scale fault. Thermal spring.
268	Ledesma, Calzadilla del Campo, Salamanca	La fuente medicinal se secó, sin que se sepa del retroceso de su manantial	Spring dried	In granite. Associated to the same regional fault as point 267. Thermal spring.
155	Linares, Jaén	“Y reconocido igualmente en el río Guadalimar y Guadalquivir, que pasan a legua y legua y media de distancia de esta villa, movimiento en sus aguas, y salir éstas de madre. Y lo mismo en las de muchos pozos, y fuentes que hay en ella y su término, en el que, en el mismo día, y a poco rato, se sintió otro temblor de tierra...”	Incremented flow of streams and springs Level well oscillation	In granite, near the contact with the sedimentary materials of the Neogene.
156	Logroño	“Y sólo parece se notaron algunas fuentes turbadas, y otras abiertas de nuevo en sitios donde antes no las había, como efectos propios y naturales de esta producción y movimiento.”	Springs alterations News springs	On river terraces and detrital Neogene.
157	Loja, Granada	“...ni ha ocurrido más novedad que la de haber por algunos días salido el agua de algunos nacimientos turbada, lo que es muy natural”	Springs alterations	Near the contact between the Paleozoic and the Neogene.
158	Lopera, Jaén	“...y haberse advertido por muchas personas que el agua que se sacaba de los pozos salía muy turbulenta”	Turbidity in wells	Contact between the alluvial terraces of the Guadalquivir River and the Pliocene. Aligned with 45, 72, 129, etc. Possible fault in the substrate?

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
159	Lugo	“Y solamente en un baño sulfúrico medicinal que sale orillas del río Miño fuera del arrabal de la ciudad, se reconoció que si de antes tenía el nacimiento en lo profundo, y salía el agua arriba como hervor de olla, rompió más arriba como cosa de 5 a 6 cuartos, cayendo de rivas [sic] abajo, y algunos naturalistas aseguran traer algún grado de calor más que antes.....Los ríos y fuentes turbaron sus cristalinas aguas, reconociéndose lodosas, las que a pocas horas volvieron a clarificarse”	Incremented flow and temperature in thermal spring Turbidity	In granite. It is the thermal spring of Lugo (45°C).
160	Llombai, Valencia	“La fuente de esta villa paró su curso hasta que se aniveló [sic] la tierra”	Interruption flow of spring	It seems to be close to an active fault.
92	Málaga	“Que de las señales previas del dicho terremoto sólo se advirtieron en algunos pozos, la misma mañana del suceso, estar el agua turbia, y también se dice que se aumentó escasamente;”	Incremented level in wells Turbidity	Associated to the edge of a geological unit and a fault.
44	Mancha Real, Jaén	“La fuente que tiene en la Plaza y vierte en un gran pilón, en que beben los animales, éste con el movimiento arrojó de sí algunos golpes de agua que le dejaron vacío más de una tercia, y en otra fuente que está cerca, y al pie de la Sierra, se vio arrojar muchísima más agua de la ordinaria, que duró algunos días con declinación, hasta volver a quedarse en su natural efluviu.” (18 de noviembre de 1755)	Incremented flow in spring	It is located in the contact of two geological units of the Betics.
160 (bis) 162 163 164	Manresa, Barcelona	“También la agua de una fuente que llaman las Fuentecillas, que nace de unas peñas del mismo arrabal se volvió colorada, y permaneció así todo aquel día. Así mismo la agua de diferentes fuentes que forman un arroyo del término del lugar de Mura, de este Corregimiento, a la misma hora se volvió colorada, junto con el arroyo, y permaneció así hasta la mañana del día siguiente”. “Que en la villa de Monistrol [= Monistrol de Montserrat] (161), que es al pie del monte de Monserrate (en donde hay una rara fuente con flujo y reflujo) se observó al mismo tiempo que las lámparas de la Iglesia se movieron, y que el agua de las fuentes salió turbia, y estuvo así hasta las dos horas de la tarde [sic]; y lo mismo de la agua se observó en el lugar de Talamanca (162), y que en la villa de Sellent [= Sallent] (163) se observó una conmoción muy extraordinaria en los estanques de aguas plurales recogidas, levantando crecidas olas; y un arroyo, que allí hay, se enturbió y creció dos tercias partes más de lo acostumbrado. Que en la villa de Moyá [= Moià] (164), al mismo tiempo se vio que las lámparas de la Iglesia parroquial hicieron movimiento, y que en los estanques hizo conmoción el agua, levantando crecidas olas, y el agua de las fuentes se enturbió y se volvió blanca y rubia, pero por la Misericordia Divina en ninguna parte ha causado daño alguno ni se oyó temblor alguno de terremoto”	Springs flow alteration Turbidity	161. In Neogene conglomerates. 162. In Neogene claystone 163. In Pliocene and detrital Quaternary. 164. In undifferentiated Neogene.
269	Manzanares, Ciudad Real	Se elevaron las aguas de los pozos cuatro y cinco varas, saliendo a la superficie algunos cubos que habían caído dentro. Se conservan algunos con aumento igualmente que diversas norias. También se engrosó el río Alzuer hasta salir de madre. Estuvo parada una piedra de un molino, durante el terremoto, habiéndose inclinado algo hacia el sur y pasado volvió a andar.	Increment of streamflow Incremented level in wells	In a Miocene limestone aquifer.
16				
165	Medellín, Badajoz	“En el río Guadiana se experimentó el día siguiente venir el agua turbia de color de teja, y estando este río muy inmediato a esta villa, diferentes vecinos que en aquella mañana pasaron por su puente aseguraron que el agua pululaba como cuando una olla puesta a la lumbre herbo [= hierve] y en el mismo puente derribó una piedra de la guarnición del escudo”	Water river alteration Turbidity	In alluvial materials.
166	Medinaceli, Soria	“En las casas particulares, pozos y a jibes, también se notó extraño movimiento”	Well oscilation level	In the alluvial of Jalón River, and in Jurassic dolomites.
167	Medina del Campo, Valladolid	“En los demás pueblos de este Partido, a la misma hora y tiempo, se experimentó lo mismo, según las noticias más verídicas que para ello se han tomado, a excepción de que en la villa de Rodilana, que dista de esta una legua, en donde inmediata a su única Iglesia se recoge una porción de agua en una laguna, donde beben sus ganados, de la cual, al mismo punto que sintieron el referido temblor, la más de ella se salió tomando distinto camino”	Oscilation level in water pool	In a regional-scale fault, aligned with points 65 and 167. In detritic Neogene.
168	Medina de Pomar, Burgos	“también observó que el Pozo nombrado en do que se compone el agua muera con que se fabrica dicha sal, se vio tan revuelto que le pareció salía el agua de él, y su color de la de sangre”	Turbidity in well	In undifferentiated Neogene, near a major fault.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
45 46 47 169 48 41 32	Medina-Sidonia, Cádiz	<ul style="list-style-type: none"> • Bolullos." En su duración se tocaron desordenadamente las campanas, se detuvo el corriente de las fuentes, y rebosaron los pozos. En varios sitios del término, se abrieron diferentes bocas en la tierra, por donde salió agua y arena". Licuefacción (45) • Almonte (46). "También aquí hizo la tierra varias erupciones de agua y arena" Licuefacción. • Moguer (47) "En el camino de esta villa a la ciudad de Moguer se abrieron también varias bocas, que arrojaron mucha agua, y una arena negra que olió a azufre, y puesta en la llama de una bujía chispeaba". Licuefacción. • Chiclana (169). "La fuente del común rebosó por tres veces, y los pozos se aumentaron de 8 a 10 varas" •Véjer de la Frontera. • "En Veger (48) [= Vejer de la Frontera] no hizo daño de consideración, ni en la Chanca de Zahara [=Zahara de los Atunes] y Molinos de Stª Lucía [= SantaLucía], aunque sí se observó en el nacimiento de éstos una notable abundancia de agua, que duró por espacio de 24 horas, saliendo turbia y rebotada" 0150. • Jerez de la Frontera (41). "Pararon las fuentes por espacio de 4 horas, volviendo después a correr pero muy turbia y. algunas, habiéndoseles tapado la antigua salida, se les rompieron de nuevo por distinto sitio". • Ayamonte (32) ." En las Marismas se rompieron muchas bocas, por donde surgió agua y arena" Licuefacción. 	<p>45 Liquefaction, incremented level in wells</p> <p>46, 47, 32 Liquefaction</p> <p>169 incremented level in wells, incremented flow in spring</p> <p>48 incremented flow in spring, turbidity</p> <p>41 alteration flow in spring, turbidity</p>	<p>45. In Miocene sand and sandstone, and Quaternary marsh sediments.</p> <p>46. In Miocene sand and sandstone, and Quaternary marsh sediments.</p> <p>47 In Miocene sand and sandstone, and Quaternary marsh sediments.</p> <p>169. In unconsolidated sediments of marsh, near the contact with the Neogene.</p> <p>48. In a calcareous sandstone aquifer with marls at the base.</p> <p>41 32</p>
12	Merida, Badajoz	"Las fuentes aumentaron de caudal"	Incremented flow in spring	In granite, next to the contact with Silurian slate
170	Migueturra, Ciudad Real	"El agua en los pozos observaron algunas personas subió boca arriba con grande movimiento y aún se dice que algunos vertieron agua por el brocal"	Incremented level in wells, turbidity	In Miocene limestone.
171	Moguer XXX, Huelva	"En los pozos también se observó, no obstante su elevación, que repentinamente se llenaron de agua, y que traía esta su natural claridad y dulzura"	Incremented level in wells, turbidity	It is flat land, and the sources are very rare. But the subvalve water is abundant. In Moguer there are small depressions of water in sandy alluvial detrital rocks that form an aquifer. In low water, from the so-called Navazo de Buevas spring, it flows 37 l/s. The same happens in some villages in the region, such as Palos, for example
93	Molina de Aragón, Guadalajara	"La agua subió a los pozos cerca de dos varas, y me consta que en uno se rebajó más de dos y media. La del río Gallo, que es el que pasa por esta villa y su Señorío, se vio aquel día, y el siguiente, notablemente minorada, y muy turbia. Muchos manantiales han roto por sitios en que nunca se han visto, y la agua que éstos, y las demás fuentes, producían, así en su origen como la que venía por ocultos conductos a las que surten los pueblos, se reconoció generalmente perturbada, y de color sanguíneo. Y a una le faltó el agua por algún tiempo, y después volvió a brotar con más abundancia"	Incremented level in wells Alteration flow in spring, turbidity	In Triassic sandstone, but very close to an active fault.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
9	Montánchez, Cáceres	<p>“Después del terremoto se ha notado que algunas fuentes del término arrojan mucho menor porción de agua que antes; y especialmente se ha conocido esta novedad en la que llaman Herrumbrosa, en las viñas del Cerro Lucio, la que es de agua mineral de hierro, por lo que se le da aquel nombre. * Lo mismo le sucede a otra herrumbrosa en el sitio que llaman de la Quebrada, y a otra que llaman del Contadero, también mineral, las que han aumentado considerablemente. * La que llaman del Ojuelo, que antes del terremoto era muy abundante, se ha secado enteramente. * La del Corcho, inmediata a esta villa, luego que sucedió el terremoto, adquirió un color perfectamente lácteo y así permaneció algunos días; y aunque he inquirido si acaso tenía algún olor como de azufre, u otro ingrato al olfato, o gusto insípido o con alguna alteración, nadie me ha podido informar de ello, a causa de que ninguno quiso usar de sus aguas para beber, ni aún para las caballerías, viéndola alteradas tan considerablemente en su color; sin embargo de que son de las mejores de esta villa. Al presente se han restituido a su antiguo y primitivo estado. Esta fuente está situada en el principal camino que sube a esta población, y a las faldas de la montaña en que se halla fundado su antiguo Castillo; y siendo éste, y la Sierra que le sirve de base natural, el que más sintió en el terremoto, y en donde hubo algunas brechas, da lugar a conjeturar que por los canales o meatos de aquella fuente, respiraron, o se exhalaban hálitos o efluvios sulfúreos, o bituminosos, despedidos de la causa natural del terremoto, bien se considere ésta aire violentamente impelido en las cavernas subterráneas, o bien (con más probabilidad) fuego subterráneo o submarino; y estos hálitos o efluvios pudieron dar aquel color a las aguas, lo que comúnmente acontece en los terremotos, aún antes de que sucedan. Y, no obstante que pudiera atribuirse esta alteración a haber mudado aquella fuente los conductos o canales que le suministran las aguas a otros de gredas o tierra blanca, se desvanece esta conjetura con haberse visto que estas aguas volvieron a su antiguo y cristalino color, luego que se disiparan aquellos hálitos”</p> <p>“El torrente que llaman de Valle el Rey [= Valderey, hoy. FRT], antes del temblor no corría; y después tomó bastante copia de agua, de suerte que sobre haberse llenado sus charcos, corre sin interrupción” (hasta el 22 de noviembre por lo menos)</p> <p>“La fuente Nueva (que también está situada al pie de las montañas del Castillo de esta villa, a la parte del Mediodía) tiene un gran aumento en sus aguas, y se me asegura por algunas personas que el día del terremoto, y mientras duró, dieron estas aguas muchos saltos o ebulliciones. No se sabe si alguno de estos fenómenos acaecieron en las aguas de pozos y fuentes, antes de el tremor, porque nadie lo advirtió”.</p>	<p>Incremented flow in persistent springs</p> <p>News springs</p> <p>Turbidity</p>	<p>In granite and associated to a major fault. Aligned with water points 2, 5 and 6.</p>
270	Montemayor, Córdoba	Aumentó el caudal de los manantiales	Incremented spring flow	Associated to a regional-scale fault. In undifferentiated Neogene.
271	Montilla, Córdoba	Oscilaciones en los pozos	Oscilation level in wells	In undifferentiated Neogene.
172	Montoro, Córdoba	<p>“En las fuentes, igualmente se experimentaron aberturas y conmociones. En la que llaman de la Oliva, inmediata a el puente mayor hacia la parte de la Sierra, se sorbió la tierra su agua, arrojándola luego de color rojo, que es el propio del país. Lo mismo sucedió en la fuente de Nuestra Señora de la Fuensanta, distante de esta villa una legua por la parte de la Sierra en la que también se detuvo el agua por algunos minutos en sus conductos, arrojándola después en duplicada cantidad”</p> <p>“Y en medio del lugar hay una charca de agua donde se coge el agua para la fragua, se remotó [sic] como tres cuartas hasta salirse ella propia”</p>	Alteration flow in spring	In the alluvial of the Guadalquivir River.
173	Montuenga, Segovia	“Y en medio del lugar hay una charca de agua donde se coge el agua para la fragua, se remotó [sic] como tres cuartas hasta salirse ella propia”	Oscilation level in water pool	In undifferentiated Neogene.
174	Moratalla, Murcia	<p>“...en el sitio que llaman Ulea, había una fuente de bastante agua, que mana desde el suelo hacia arriba con alguna elevación, y por la circunferencia de ella, que es terreno llano todo, después del temblor hay muchos más manantiales, y muy húmedo todo el dicho terreno, y parte del camino que cruza por dicha fuente, de modo que el más aumento que tiene la dicha fuente serán como el grueso de tres dedos”</p>	Incremented flow in artesian spring	In the contact between geological units.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
175	Mula, Murcia	<p>“Juan López Romero, a cuyo cargo corre el molino de pan moler, y batán que gobiernan las copiosas aguas que un pozo natural vierten a media legua de distancia de esta dicha villa; bien examinado, refiere que a primeros del mes de agosto pasado de este presente año, vio que las referidas aguas, sin causa exterior, prebirtieron [sic] el color poniéndose turbias y blancas, las que duraron en esta conformidad como unas 8 horas, disminuyéndose más de una pierna, siguiendo las naturales hasta el referido día primero y hora, que quedó atemorizado de ver que las aguas de dicho pozo bajaron la mitad de sus corrientes, parándose dicho batán, en cuyo estado estuvieron como un cuarto de hora y a el final del río que convirtieron muy negras y abundantes que los gorgoritos tomaban más de diez varas de elevación, lo que duró como otro cuarto de hora permaneciendo dichas aguas, negras, como una hora natural, y al final de ésta las registró doradas, que permanecieron como unas 8 horas; pasadas éstas quedarían dichas aguas claras y naturales de dicho pozo aumentadas en más de una pierna de agua, de forma que reemplazó y un poco más las que había perdido en el referido mes de agosto, y continuando la tarea de su ejercicio trabajando con dicho molino y batán, en la tarde del día 8 de este dicho mes [= noviembre, 1755], advirtió que las aguas del referido pozo se pusieron blancas de color de leche, quedando muy claras ; y, en esta conformidad, permanecieron toda la tarde hasta más de una hora de la noche siguiente, que volvieron a ser de color natural, pero con todas estas novedades que advirtió en dicho pozo por entonces, dice que no presumió que pudiera ser terremoto, hasta mucho después, que hablando con diferentes vecinos de esta dicha villa le dieron a entender el que había sucedido. No podemos por menos dejar de poner en la consideración de V. S. I. cómo el referido pozo se halla sito en el oripié [sic] de una Sierra que crió la naturaleza o Dios fijó por su infinita misericordia, porque su profundidad no se ha podido penetrar. Es abundante de manera que con las aguas que vierte muele el referido molino y trabaja dicho batán por servidumbres distintas que cada una lleva su arroyo de agua, es muy dulce y de lindo paladar, más que tibia en invierno y verano, de forma que los naturales de los pueblos comarcanos se bañan en ellas, y han experimentado maravillosos efectos y el más milagroso es que no ha hecho daño a nadie”</p> <p>“...y sólo me han informado que en los baños cerca de la Puebla [= La Puebla de Mula], y media legua de esta villa, jurisdicción de ella, hay un pozo de piedra bastante profundo que echa una buena porción de agua con que muele un molino, y se surte un batán, y asegura el molinero que en el tiempo del temblor faltó parte de agua, con que se suspendió el batán y no el molino, y que sólo advirtió que se puso el agua negra tirando algo a encarnada, que duró algún tiempo. Y después, algo dorada, con cuyo color amarillo dejó teñidos los conductos y con este suceso hace juicio se ha aumentado más el agua y que se ha quedado clara como estaba antes, que es todo lo que en esta villa podemos decir. a cuyo sentir es verídico y cierto”</p>	<p>Incremented flow in persistent springs Level oscilation in wells Turbidity</p>	Thermal springs associated with active faults.
176	Murcia	“...y aunque las aguas del mismo río no hicieron movimiento, se elevaron las de algunas [a]cequias y pozos”	Incremented level in wells	In the Quaternary alluvial.
49	Niebla, Huelva	<p>• Bonares (49). “En las arenas que distan de este lugar media legua se han visto diferentes bocas que arrojaron porción de agua dentro de las huertas que están en dicho sitio, dejándolas con porción de arena de color tostado fétidas y azufrosas” Licuefacción.</p> <p>• Calañas (50). “La fuente y manantiales de la comprensión de este pueblo brotaron tanta agua, con el movimiento de la tierra, que abundaron grandemente de forma que pudiera moler cualquiera molino. Otras totalmente se secaron. En donde jamás se habían conocido manantiales se abrieron algunos aquel día, arrojando tanta agua que se aumentaron con bastante porción los arroyos de su cercanía. El río Odiel se vieron mover sus aguas con tanto furor y estrépito que, atemorizadas las personas que le vieron, huyeron con mucha prisa de aquel sitio y, a poco tiempo, se pasó dicho río en aquella mañana a pie enjuto y el siguiente día sin haber llovido no lo pudieron pasar por causa de la mucha agua que llevaba”</p>	<p>49 Liquefaction 50 Incremented streamflow and persistent springs</p>	<p>49. Associated to sandy alluvial materials and Miocene sandstone. 50. Associated to spilite and andesite interbedded within carboniferous shales, and to major E-W faults.</p>
51	Paymogo, Huelva	“Estando moliendo los molinos de la ribera de chansa [= Rivera de Chanza] se pararon, porque se suspendió la corriente del agua, quedando estos cortados, y divididas algunas fuentes y pozos se les retiró el agua, y no la han cobrado después. Y otras algunas abundaron en más cantidad y todavía la conservan”. (10 de diciembre de 1755).	<p>Incremented streamflow and persistent springs Level oscilation in wells</p>	In Carboniferous slate with diorite plutons and rhyolite. The streams had not yet stabilized their flow.
52	Puebla de Guzman, Huelva	“Las fuentes se llenaron y algunas que se llaman secas empezaron a manar y correr sus arroyos desde dicho día lo propio quasi hubiera llovido con abundancia”	Incremented streamflow and persistent springs	The streams had not yet stabilized their flow. In this village there are weathered diabase outcrops in contact with very impermeable carboniferous slate. They are also associated to E-W faults. Wells in slates do not have practically water. Most of the old wells with water were in the altered diabase.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
177	Orduña, Vizcaya	“Pero en las aguas del río Nervión, que es el que baña a la ciudad, observaron algunas personas que bajaban muy turbadas, y en una fuente que llaman la de la Muera, distante de la muralla como dos tiros de fusil, observó con admiración don Joseph de Viguri, presbítero beneficiado en el lugar de Leçama [= Lezama] que sus aguas, tomaron de repente el color de un finísimo azafrán, y que al unirse con las del río Nervión inmediato a la fuente, vinieron sus aguas de este del mismo color”.	Alteration flow in spring Turbidity	In Triassic claystone and gypsum of the Keuper Facies.
178	Orihuela, Alicante	Ben jofar (178). “La Justicia del lugar de Benicofar [= Ben jófar], distante de ésta tres leguas, certifica en vista de los informes que ha tomado: que sólo una persona de dicho lugar vio en el río [= Segura] faltarle el agua, y meterse dentro, y luego volver a su ser, sin atestar otra cosa ni desgracia alguna”	Alteration flow in river	At the edge of a geological unit.
179	Orense	“En lo que en esta ciudad llaman Burgas, que son unas fuentes de agua muy caliente, se experimentó, al mismo tiempo, haber mudado el color en un turbio blanco y salir con más abundancia; y en otra de dichas fuentes no distante, de agua no tan caliente, en medio de un peñasco se abrieron otros dos conductos a los lados del que había, de la misma calidad y así continúan” Ribas de Sil. “San Clodio del Rivero [= San Clodio (Ribas de Sil)]: también informa la Justicia que durante dicho temblor, el río Avia, que pasa por aquella jurisdicción, echó el agua a las orillas, cosa de tres cuartos, y en los pozos hondos, se levantó el agua dos estados de alto, y que luego que cesó el terremoto se levantó un aire muy fuerte que duraría media hora”	Incremented flow in thermal persistent springs News spring Turbidity	In granite. It is a 68°C thermal springs. This rock has fractures filled up with kaolin.
180	Orense, Ribas de Sil	Ribas de Sil. “San Clodio del Rivero [= San Clodio (Ribas de Sil)] 180 : también informa la Justicia que durante dicho temblor, el río Avia, que pasa por aquella jurisdicción, echó el agua a las orillas, cosa de tres cuartos, y en los pozos hondos, se levantó el agua dos estados de alto, y que luego que cesó el terremoto se levantó un aire muy fuerte que duraría media hora”	Incremented level in wells	In alluvial materials.
181	Peñas de San Pedro, Albacete	“...subiendo el agua de los pozos turbulenta, hasta la boca”	Incremented level in wells	At the edge of a geological unit.
182	Peñíscola, Castellón	“En Peñíscola, bebiendo un hombre en los caños de la fuente, la que salía clara, reparó que en un instante se volvió roja y prosigue turbia, bien que dicha fuente, sin saber de dónde viene, brota en medio del mar, y sale dulce y sumamente cristalina. Se infiere que el terremoto causó esta novedad, porque no ha habido lluvias en Aragón que le pudiese causar, como sucede algunas veces cuando llueve en abundancia en dicho Reino, y porque sucedió a la misma hora que se experimentó en otras partes el referido terremoto” (15 de noviembre de 1755).	incremented flow in springs Turbidity	It drains a karstic aquifer, at the edge of a geological unit. The spring comes out under pressure, the aquifer is confined.
183	La Pela de Crondón, León	“y en cuanto a mudarse el color de las aguas de las fuentes, es cierto que todas ellas, tres días antes, y otros dos después de el citado día, se mudaron, y pusieron como cenicientas y blazquinadas [sic], cuya inopinada novedad ha hecho gran eco por nunca visto en estas montañas a todas las personas que las habitan, pero en lo demás no se han visto señales algunas dignas de consideración”	Turbidity in springs	Associated to metamorphic rocks and to thrusts.
184	Pontevedra, Pontevedra	Vilaboa (184). “En la frontera de San Martín de Villavoa [= Vilaboa], jurisdiccional de esta villa, casi dos leguas de distancia, se observó en una fuente perenne, que ha suspendido el curso del agua, todo el tiempo que duró el terremoto, y acabado éste cesó también la suspensión”	Drying of a spring	In granitic rocks.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
185	Poza de la Sal, Burgos	“La otra demostración que juntamente acreditó el expresado terremoto, fue que la fuente principal de esta villa, a donde concurrían todos del uso de ella, distante poco más de doscientos pasos de la población y murallas, que echa el agua dividida en trozo el grueso de un cuerpo humano regular, y sale a el pie o falda de una cuesta, y peñasco dilatado sobre ella, que tendrán de elevación seiscientas varas del parecer del perpendicular, ésta a las citadas diez y cuarto, con corta diferencia, se vio tan turbia (sin que haya noticia en lo antiguo, ni moderno, de semejante ejemplar) que todas las gentes que fueron por agua, lo admiraron en sumo grado, y se volvieron sin ellas, hasta que a las once y media del día, que volví a enviar a mi criada, y trajo la agua, que ya se podía beber, no obstante que aún todavía no estaba enteramente perfecto el color, y aún habiéndole gustado, me pareció sin saber si era aprensión, que notaba alguna displicencia en el gusto, como a cosa salitrosa, que pudiera ser contingente, por la contigüedad a los minerales de la sal, que existen (aunque más arr ba, y a la mano izquierda de dicha fuente) a corta distancia, o como la de un tiro de bala. Habiéndose tenido noticia general de los pueblos comarcanos, que todas, o las más respectivas a cada uno de ellos, a la misma hora arrojaron el agua turbia y de distintos colores, sin duda procedido si el del terreno por donde debía pasar y que, aun algunas lo daban sanguinolento, pero en todos estos distritos no se ha observado novedad en los ríos, ni, a Dios gracias, fatalidades algunas, ni heridas en personas ni animales, ni en punto de ruinas de edificios, o fábricas. * Pero, no obstante, que en lo tocante a dichos minerales de sal, por lo exterior no se deja advertir cosa especial, no se sabe, si en lo profundo e interior (como los tales minerales consisten en una gran parte de minas y concavidades, que hay construidas, unas con el artificio, y otras de su naturaleza, para el tránsito del agua dulce, por las peñas de sal, a fin de que se haga salada y pueda haber ocasionado algún estrago o perjuicio, considerable, que hasta en lo sucesivo no se pueda advertir, o	Turbidity in springs	In a gypsum diapir of Keuper age.
22	Pozoblanco, Córdoba	“..., fue que los pozos y fuentes creció el agua brotando en muchos de ellos y reconociéndose estar tan caliente como si la hubieran puesto a hervir”	Incremented flow and temperature in springs Incremented level in wells	In granite.
272	Priego, Córdoba	La fuente, que es muy abundante, suspendió su curso por el tiempo del temblor, y corrió más caudalosa; otra se secó enteramente, y otras echaron el agua muy colorada.	Spring flow alteration Turbidity	In undifferentiated metamorphic rocks.
186 187 188	Puigcerdá, Gerona	“A excepción de haberse observado a la misma hora, que ciertos manantiales de aguas, sitios en el término del lugar de Queralps [= Queralbs] (186), en la valle de Ribas [= Vall de R bes] (186), salían turbios, y sus aguas como color de sangre de buey, queintrducidas en un río inmediato, llamado Fraser [= el Freser], tiñeron sus corrientes del mismo color, habiéndose advertido lo mismo en las de unos baños, dichos de las Cuevas de R bas [= Aigües de Ribes] (188), con bastante admiración de los naturales de aquella comarca, por no haber memoria de hombres que en tiempo alguno hubiesen visto aquellos manantiales de igual color; si los de los baños en alguna otra ocasión, aumentando aún más la novedad el estar las aguas de los demás ríos, y fuentes, cristalinas, e igualmente las otras el día siguiente”	Turbidity in springs	186. In undifferentiated metamorphic rocks. 187. - 188. In undifferentiated metamorphic rocks.
189	Quesada, Jaén	“Y en un sitio, a distancia de un cuarto de legua de esta población, que llaman el Nacimiento, por nacer en él agua única de que se surte esta villa, a el mismo tiempo de el temblor de tierra, la gente que se hallaba en el campo, experimentó un gran ruido, y que se desgajaban de la tierra peñas, arrojando gran porción de humo como si fuera una calera que se quemaba y tanto que, al principio, advirtieron que las piedras subían hacia arr ba, hasta que la abundancia de humo o vapor tapó todo el sitio y impidió la vista, habiéndose experimentado después falta en el manantial de agua”. -Quintanar de la Orden, Toledo “Las aguas de los pozos (que hay muchos en esta villa) se alborotaron y se subieron tanto, que alguno rebosó hasta verterse”	Decrease in the flow of a spring Incremented level in wells	189. ---
190	Quismondo XXX, Toledo	“El agua de las pilas de el agua bendita se revertió, quedando en ellas cosa muy corta, como también se vio que en el intermedio del terremoto [sic] acaeció lo mismo en los pozos, de modo que el agua se revertió de ellos. La fuente que hay en esta villa, siendo su corriente cosa muy corta, no cabía el agua por el caño, como también moverse todo el suelo, sin haberse ocasionado ruina ni perjuicio en las fábricas, ni haber resultado muerte alguna, heridas en personas, ni animales”	incremented level in wells and springs discharges	In the Neogene detrital aquitard of Madrid.
27	Ramba, La. Córdoba	Rebosó el agua de los pozos	Incremented level well	In undifferentiated Neogene.
191	La Redondela, Huelva	Licuefacción supuso XXX, aunque no cita	Liquefaction	In clayey marsh sediments, very close to fault.
192	Reinosa, Cantabria	“...haberse enturbiado sobremanera las dos fuentes o pozos, origen perenne del gran río Ebro, que se hallan como en medio de una plazuela, en el Lugar de Font ble [= Fontibre], de esta real jurisdicción, a distancia de media legua de esta villa, al Poniente, en cuya conformidad permanecieron sus aguas por espacio de tres días, sin haber tomado aumento alguno, ni experimentándose lo uno ni lo otro en el río ljar [= Híjar], ni en las demás fuentes y aguas que se iuntan al citado Ebro. antes y después de esta villa”	Turbidity in springs	In Jurassic dolomites. It is a resurgence.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
193	Ronda, Málaga	“Los alj bes o cisternas que hay en algunos conventos, y en muchas casas para recoger las aguas llovedizas, por no haber pozos manantiales, se observó que dichas aguas se subían a los brocales, dando borbotones como si estuvieran hirviendo.Asimismo se notó que una mina manantial de un crecido caudal de aguas, que cae al tajo, y río que siempre echa y ha echado un golpe de agua grande muy clara, sin que hasta de presente se haya descubierto su nacimiento, arrojaba dicha agua con más aumento, muy turbia, gredosa, y de color de barro, y continuó así desde dicho terremoto por tres días siguientes. Y volvió a su antiguo ser v curso”	Incremented level in wells and springs discharges, turbidity	193. -
194	Las Rozas, Madrid	“En la fuente, la gente que a la ocasión se halló allí dice se paró por un rato y volvió después a su curso pero el agua muy espesa, con alguna broza como espartos y estopas”	Alteration flow spring	Perched spring from the Neogene detrital aquitard of Madrid.
195	Rubielos Bajos, Cuenca	Variaciones de agua en los pozos	Wells oscillation levels	In the detritic Neogene, near a major regional fault.
196	Sabiote, Jaén	“Y también se advirtió en algunos pozos grande rumor y que, aunque eran profundos, subió el agua hasta poderla tocar con la mano”	Incremented level in wells	At the contact of the alluvium on the left bank of the Guadalquivir River with the Neogene claystone. Aligned with other points.
197	Salamanca	“Barco de a Vila [= El Barco de Avila] (197) que las aguas del río Tormes, que pasa por ella, crecieron notablemente, y se enturbiaron, y que la fuente del lugar de Hermosilla [= Hermosillo; Los Llanos de Tormes; Avila] , de su jurisdicción se mantuvo dos días de color pajizo....”	Incremented flow river and spring alteration, turbidity	In granite. In a regional-scale fault.
198	Salobreña, Granada	“pues una de las fuentes llamada la Grande, que está en la falda del Peñón, en que se halla construida esta dicha Villa, el agua que vierte se detuvo su curso, quedando enteramente seca durante el terremoto seca [sic], que sería como a hora de las 10 de la mañana de este día, por espacio de siete minutos, y fenecido, siendo como es cristalina, volvió a despedir las citadas aguas con tanta violencia que estas parecían sangre, que causó pavor a aquellas personas que se hallaron presentes”	Alteration flow spring, turbidity	Very fractured zone, without further data.
53	San Silvestre de Guzmán, Huelva	“...observándose una alteración muy sens ble en fuentes y pozos, pues algunos se secaron enteramente; en otros se aumentó el agua y todos se enturbiaron considerablemente al tiempo del terremoto, corriendo algunos arroyos que estaban totalmente sin agua, y brotando ésta es muchas partes que nunca lo ha habido”	New streamflow	In carboniferous slate. Associated to a major NE-SO fault
10	Santiago de Alcantarán, Cáceres	“...sí sólo se advierte que algunas fuentes y arroyos naturales se extrañaron las aguas sin haber vuelto a su ser, y las que no eran de esta naturaleza por su esterilidad, hoy corren perennes y cristalinas” 25 de diciembre de 1755	New streamflow and new persistent springs	In Silurian slate.
199 200	Segovia	“Y sólo en el Real Sitio de San Ildefonso (200) he oído decir a varias personas que alguna estaba cerca de la fuente de la Fama, reparó que el agua que estaba en su estanque, o recipiente, hizo primero algún movimiento de un duración [sic. ¿ondulación?] y después como impulso hacia arriba”	Springs flow alteration	199. In Cretaceous limestone, near a regional-scale fault. 200. In gneiss and granite.
23	Segura de León, Badajoz	“A algunas fuentes de poco caudal se les ha aumentado, y en aquel día se experimentó en una de esta cercana, no echar agua alguna, y en otra, la que vertía, muy turbia”	Springs flow alteration, turbidity	Granitic porphyry and granite, next to the contact with Cambrian shale and greywacke.
54	Setenil XXX de las Bodegas, Cádiz	“Por las noticias que he tenido de sujetos verídicos, ha constado que en un pozo de treinta y dos varas de profundidad, en el campo que llaman de Leches, distante media legua, salieron los hervores y embates del agua, hasta la mitad de su altura. Y en una fuente que llaman de Hidalgo, distante un cuarto de legua, cesaron sus aguas de correr, quedando secas las arenas, hasta la tarde del día siguiente, que volvió a arrojar las aguas de su mineral. En otras fuentes se observó haberse turbado las aguas, y haberlas estado arrojando, por algún tiempo posterior, turbias v cenagosas”	Incremented level in wells Springs flow alteration, turbidity	54
201 202 203	Sevilla	“En la Isla mayor (200) del río de Guadalquivir abrió grietas arrojando aguas hediondas, y arena requemada. Según los autores físicos las islas son más expuestas. Dicen que en Coria [= Coria del Río] (201) se abrió la tierra por distintas partes, echando agua inmundas, y a sus orillas del río, copia de arenas plateadas. En Gelves, haberse hundido un promontorio de tierra. En Bolullos del Condado [= Bolullos Par del Condado] (203), abiórtose varias cuevas arrojando gran porción de agua v arena” Licuefacción.	Liquefaction	201. In unconsolidated marsh sediments 202. In unconsolidated marsh sediments. 203. In Miocene and Pliocene sediments.
204	Sigüenza, Guadalajara	“Y después se vio que, por espacio de algunas horas, salía el agua de las fuentes, muy turbia, y que creció su corriente, lo cual duró pocas horas”	Springs flow alteration, turbidity	In Triassic dolomites of the Muschelkalk.
205	Siles, Jaén	“En las fuentes se experimentó salir el agua muy turbia, y los pozos que antes eran de poca agua, se vieron en aquella hora llenos, volviéndose a quedar dentro de un breve tiempo de su natural.”(28 de noviembre de 1755)	Springs flow alteration, turbidity	In limestones and associated to regional-scale fractures.
24	Siruela, Badajoz	“La fuente que se halla en medio de la Plaza pública, rebosaron las aguas, y lo mismo el pilar que está junto, de modo que se menguó cosa de una tercia. Y lo mismo sucedió en las demás albercas de las huertas”	Incremented level in wells Springs flow alteration	In Precambrian quartzite and conglomerate.
206	Sisante, Cuenca	“Las aguas en los aljibes poco profundos se elevaron hasta querer salir y así en estos como en los pozos de mucha más hondura, se advirtió salía el agua con un calor irregular y extraordinario y, como si se hubiese puesto en el fuego, y hay noticia de haberse experimentado lo mismo en la Motilla [= Motilladel Palancar] y otros pueblos inmediatos”	Incremented level and wáter temperature in wells	In undifferentiated Neogene.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
207	Socovos, Albacete	“Las aguas de una fuente que nace extramuros, la que es el gobierno y sustento del común, como también de esta corta huerta, la puso muy turbia, levantándola de su asiento de cuatro a cinco varas, lo que por espacio de tiempo se volvió a su propio ser, sin haberse advertido disminución ni aumento en ella”	Springs alteration	In undifferentiated Mesozoic, near a regional-scale fracture.
208	La Solana, Ciudad Real	“En el río Azuer, menos de una legua de esta población, se experimentaba haberse acaudalado de aguas, de modo que los molinos harineros muelen sueltos los ladrones, sin que haya llovido para ello en los parajes que tienen conocimiento era necesario, cuya particularidad proviene de haberse rodado un peñón, en su primer origen del tiempo de el temblor, que así se ha entendido comúnmente, por cuya rotura arroja un grande golpe de agua que, según su estabilidad, se contempla de grande beneficio a los pueblos de la inmediación por los muchos molinos y tierra de veda que tiene y puede beneficiarse con el riego” (19 de noviembre de 1755)	Incremented and persistent streamsflow	In Triassic sandstone.
209 210	Soria	“Que en la villa de Uzero [= Ucero] (209), partido del Burgo: que el nacimiento que surte la fuente de la propia villa, y la del Burgo [= El Burgo de Osmá] quedó suspendido, y secos sus respectivos cauces, desde las once de la mañana del citado día primero de noviembre hasta las dos de la tarde de dicho día” “Las villas de Villanueva de Cameros, la de Brieba [= Brievade Cameros], la de Mansilla, la de Canales [= Canales de la Sierra] y la de Suellacabras (210), de los enunciados tres partidos, sólo avisan la novedad de haberse enturbiado sus ríos y fuentes la mañana del día expresado...”	Turbidity in springs	209. Spring that drains a Cretaceous limestone aquifer. 210. In Jurassic marine limestone with pyrite and SH2. The spring is sulfuric.
211	Sueca, Valencia	“Sólo sí que a distancia de un cuarto de legua de esta población, y a distancia de doscientos pasos de un monte pequeño, que llamamos de los Santos, abrió la tierra el terremoto, por cuya abertura salió un golpe de agua, que regó cosa de media anegada de tierra poco más, donde queda un hoyo lleno de agua, de la magnitud de 4palmas, en unas partes más, y en otras menos, y al tacto de una caña se reconoce haber peñas por el centro, al parecer de monte, por estar el otro cerca, y no discurrirse poder ser de edificio que pudiese haber habido en lo antiguo. * Que la agua [de] dicho hoyo es natural de el terreno, una vez que ya sea de antes de el terremoto, o que éste haya causado la cavidad, es preciso llenarse de agua por ser hondo el terreno y a la proximidad de los arrozales; y que lo cierto es que en aquel sitio se hallaba ya cavidad llena de agua, y que rompiendo el terremoto la tierra que le cubría salió al ímpetu aquella porción de agua que regó dicha tierra”	New springs	In undifferentiated Neogene.
212 213 214 215 216 217 218	Talavera de la Reina, Toledo	“Villa de Belada [= Velada] (212). Las fuentes perdieron su corriente por breve rato. * Villa de Inojosa [= Hinojosa de San Vicente] (213). En la tarde del mismo día algunas fuentes y pozos que habían estado agotadas y secas, tras el verano, vertieron agua, y tomaron corriente. La Abellaneda [= Avellaneda].— Se quebrantó la Capilla mayor y algunas casas. * Y se notó tres días después que la fuente, sin haber llovido, subió más de una vara el agua y otros que estaban secas, corrieron con abundancia. * Lugar de Aldeanueva [= Aldeanueva de Barbarroya] (215).— La fuente contigua a el lugar, tomó mayor creciente que la acostumbrada, y continúa. Puebla Nueva [= La Pueblanueva] (216) La fuente de cuatro caños cesó de correr por algún tiempo, y el pilón donde recibe las aguas, que estaba como mediado de éstas, se colmó y echó fuera de sí la mayor parte, haciendo pedazos algunos cántaros que en él habían” “Castañar de Ibor (217). * En cuanto a la estrella, su figura y duración con la hora y día convienen con el antecedente, y de éstos, sólo el Castañar [= Castañar de Ibor] adelanta se quebrantó la torre de la Iglesia, y que la fuente del común pausó en su corriente, y luego volvió a ella con más copia de agua, pero muy turbia. * Alía [= Alía] (218).- A la misma hora se cayeron dos tablas de el techo de la Iglesia, y se quebrantó su Capilla mayor, y el archivo. Que algunos pozos y fuentes, que no tenían agua tomaron la bastante, y se han advertido algunas fuentes en sitios donde no las había”	212 Springs flow alteration 213 New springs 214 New springs and incremented flow 2015 Incremented and persistent spring flow 216 Springs flow alteration 217 Springs flow alteration 218 New springs, incremented level in wells	212. In granite, near the contact with the clayey Miocene. 213. In granite, near the contact with the Miocene claystone 214. --- 215. In the contact between the clayey Neogene and the granite. Next to a regional-scale fault. 216. In undifferentiated Neogene. 217. In gneiss. In a major regional fault. 218. In gneiss. In a major regional fault
219 220	Tarazona de La Mancha, Albacete	Quintana del Rey (219) y Madrigueros (220). Rebosaron los pozos. Perdieron caudal el río Júcar y otros arroyos.	Incremented level in wells	219. In Neogene clayey and undifferentiated Quaternary. 220. In Neogene clayey and undifferentiated Quaternary.
221 222	Toledo Torredonjimeno, Jaén	“Notándose en este tiempo el que el agua de los pozos subiese hasta los brocales, derramándose alguna, y que las fuentes y ríos se dice cesaron en sus corrientes, interin duró dicho terremoto”	River level alteration Incremented level in wells	In gneiss. In undifferentiated Neogene.
11	Torremocha, Cáceres	“Y sí sólo se ha experimentado, que muchos pozos contiguos a esta población crecieron sus aguas en aquel instante bastante cantidad. * Y lo que ha causado más admiración es que en sitios adonde estaba la tierra del todo árida ha prorrumpido tan abundante en aguas que llegan sus corrientes a longitud de más de cuatrocientos pasos”	News streamflows	In granite, very close to the contact with Cambrian slate and greywacke.
223	Tortosa, Tarragona	“En los Montes Reales, que distan de esta ciudad una hora y media, hay unos boquerones, como de nueve palmas de diámetro, que en tiempo de viento de Levante manan agua, y al tiempo del terremoto echaron agua turbia como negra por espacio de tres cuartos de hora, como del grueso de un brazo”	Turbidity in springs	In the contact between the Mesozoic calcareous materials and the undifferentiated Neogene. There is a spa with ferruginous waters.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
224	Ubique, Cádiz	“Duró dicho terremoto como siete a ocho minutos, en cuyo tiempo, según esta villa ha sido informada por los sujetos de mayor capacidad y conocimiento de ella, se observó que el nacimiento de el agua de esta villa se secó, sin seguir su natural curso el río, que próximo de esta villa pasa, hasta que, sosegado el terremoto, volvió a correr el agua, también como suele, cuando acaece una gran tormenta”	Interruption spring flow	Large karstic spring that drains a limestone aquifer.
225	Uclés, Cuenca	“En los nacimientos y humedales del agua se ha notado el aumento y pujanza, principalmente en un estanque llamado la fuente Redonda, distante de esta población medio cuarto de legua, que con el impulso de dicho temblor subieron las aguas en bastante altura y tanto que los molinos que están en su corriente, necesitando represar para moler antes, después no pasaban”	Incremented streamflow	In the Cretaceous limestones of the Sierra de Altomira. Aligned with other points.
226	Utiel, Valencia	“Asimismo se advirtió en algunos pozos la elevación del agua en dos o tres varas, y en una fuente sita en la misma jurisdicción y ermita de su Patrona Nuestra Señora del Remedio, que el agua se enturbió por espacio de medio día”	Incremented level in wells, turbidity in spring	In undifferentiated and alluvial Neogene.
227	Valdefuentes, Cáceres	“Y en una fuente manantial que se halla en este pueblo y de donde beben sus vecinos se experimentó que luego que cesó dicho terremoto, el agua de dicha fuente, siendo ella en lo natural clara y cádena, se volvió blanca a modo de leche. Y ésto duró todo el día, la que se ha vuelto a su natural”	Turbidity in spring	In granite. In a regional-scale fault.
12	Valencia de Alcantara, Cáceres	“Antes de comenzar el temblor, como cosa de un Ave María, un ruido grande como si fuera de coches, y después de pasado el temblor se ha observado luego inmediatamente brotar más agua las más de los manantios, fuentes y arroyos, que antes no la tenían, y, al mismo tiempo, se ha observado que algunas fuentes que tenían agua con abundancia se secaron y lo están hoy día” (26 de noviembre de XXX)	New persistent streamflow, dried of springs	
228	Valladolid	“Y una fuente, parado su curso por muy breve tiempo, volvió a correr algo turbada el agua, que, es efecto muy natural de alguna tierra poco firme del mineral que cayó con su movimiento, y después la arrojó el mismo golpe del agua, respecto de que en las demás fuentes no se experimentó esto, porque tendrían más firmeza sus minerales”	Springs flow alterations	Associated to a regional fracture that crosses the Neogene clastone.
229	Valmojado, Toledo	“Sólo se experimentó que las fuentes brotaron el agua fuera de su centro..”	Springs flow alterations	229. ---
13	Valverde de Mérida, Badajoz	“La fuente y pozos redundaron en agua, de manera que se sacaba con mucha dificultad, y hoy se mantienen con muchísima agua(16 de diciembre de 1755).. El río de Guadiana, sus aguas quedaron muy turbias, y sucedió que las piedras de los molinos que se hallaban a la sazón moliendo, quedaron paradas.”	Incremented persistent springs	13. In granodiorite, associated with a fault of regional importance, similarly to point 4.
230	Vegas del Condado, León	“Y sólo se notó que las más de las fuentes se habían enturbiado y puéstose su agua como de color de sangre”	Turbidity in spring	In the detritic and clayey Neogene.
231	Vejer de la Frontera, Cádiz	“Después proseguí preguntando y me dijeron que en los pozos se había sentido un ruido violento, y que en algunos aljibes habían visto salir el agua por las bocas, dando con estrépito notable, las aguas, en las paredes de ellos, y supe había sucedido lo mismo en las fuentes, y que el río Barbate, que pasa inmediatamente a esta villa, se dividió a la parte de Levante y Poniente, dejando el centro sin agua, y levantándose ésta por los costados, se volvieron a unir, con estrepitosa alteración, de forma que al juntarse, inundaron y rociaron sus orillas”	Incremented streamflow and spring flow	In the Quaternary alluvial and the undifferentiated Neogene.
232 233 234 235	Vic, Barcelona	“Y en el lugar de Viladrau (232), situado en las faldas de Montseny, se reparó que las aguas de la Riera, y fuentes corrían turbias de color blanquinoso, y que en la noche del dicho día primero una casa temblaba. * Y que en los lugares de Taradell, Rupit, Ceva [= Seva] (233), Roda [= Roda de Ter] (234) y Esquirol (235), no se experimentó otra cosa más que las aguas de las fuentes corrieron por espacio de un día turbias, como blancas”.	Turbidity in spring	232. In granite. 233. In granite. In an active fault. 234. In granite. 235. In granite.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
236 237 238 239 240	Villafranca de Penedes, Barcelona	“A biñana [= Albinyana] (236) En este lugar se observó el día 1º de noviembre, a las diez y cuatro minutos de la mañana, que estando el cielo sereno y pacífico, se tumultuaron las aguas muertas de un estanque, o balsa, elevándose improvisadamente más de cinco palmos de alto. Masquefa (237) En esta villa, observaron algunos individuos de ella que, entre diez y once de la mañana del día 1.o de noviembre, siendo la estación serena, y pacífica, se agitaron y movieron las aguas muertas de tres balsas, por espacio de cerca de un cuarto de hora, formando encrespadas olas como el mar, y elevándose cosa de dos palmos en alto, rebosando y vertiéndose, hasta disminuirse palmo y medio. Esparraguera [= Esparreguera] (2378) En esta villa se experimentó por alguno de sus individuos, que en el día 1.o de noviembre, a eso de las diez de la mañana. las aguas muertas de una balsa, se elevaron por espacio de tres minutos, unos cuatro palmos de alto, e igualmente repararon que en una fuente muy copiosa, se enturbiaron sus aguas, manando por algún rato, de un color bermejo. Jelida [= Gelida] En este pueblo se notó, por alguno de sus naturales, que en el día 1.o de noviembre, antes de las diez de la mañana, las aguas muertas de las balsas, estando antes quietas, y pacíficas, se revolvieron con gran ímpetu, formando furiosas olas. Que las lámparas del templo se movieron, y cimbrearón por sí solas; y que las aguas de las fuentes, siendo claras, se enturbiaron improvisadamente, cuyas señales les persuadió nacían de algún terremoto. Collbató (239) En el citado día, y hora, se reparó en es[te] lugar que las aguas muertas de una balsa, se removieron, y crecieron, con rumor notable. Bruch [= el Bruc] (240) En este lugar, también se observó en dicho día 1.o de noviembre, a las diez de la mañana, que las aguas muertas de una balsa, se ondearon, y elevaron con furor.	236 incremented groundwater level 238 incremented groundwater level?, turbidity in spring 239, 240 incremented groundwater level?	236. In metamorphic rocks. Associated to a regional-scale fault. 237. In undifferentiated Neogene of the Valles-Penedés Basin. 238. In undifferentiated Neogene of the Valles-Penedés Basin. 239. In the fault of the contact between the undifferentiated Neogene of the Valles-Penedés Basin with the Paleozoic basement. 240 In the fault of the contact between the undifferentiated Neogene of the Valles-Penedés Basin with the Paleozoic basement.
56	Villablanca, Huelva	“En las aguas hubo una alteración violenta, pues a muchas fuentes, y pozos se la quitó enteramente, y en otros la aumentó en abundancia. En algunas calles de esta villa hizo reventón y brotar el agua tan considerablemente que se vio correr, y se han abierto algunas fuentecillas de donde se saca actualmente aguas”. Licuefacción.	Liquefaction	Springs associated to E-W faults. In slates of the Carboniferous. The liquefaction occurred in the alluvial of the Pedreza River.
241	Villablino, León	“..., si bien se notó en algunas fuentes y arroyos de estas montañosas [sic] cerca más, que sus aguas, sin motivo de lluvia, se acrecentaron y, en algunas de ellas, mudaron de color teñida como es de teja o ladrillo”	Incremented streamflow and spring flow	In metamorphic rocks.
242	Villafranca – Montes de Oca, Burgos	“...y en la particularidad de que una de las fuentes de Oca, que en toda estación, por lluviosa y húmeda que haya sido, ha dado la agua limpia, en el día del terremoto la arrojó turbia, lo que se advirtió después de este accidente”	Turbidity in spring	In the clayey Neogene of the Bureba Corridor. Near a regional-scale fracture.
243	Villagarcía del Llano, Cuenca	“Y que las aguas estancadas en una balsa que hay inmediata a esta villa, que sirve de lavadero de ropas, habían subido y salido a este tiempo más de cuatro varas, volviendo con brevedad a el mismo estanque..”	Incremented groundwater level?	243. -
244	Villamañán, León	“En cuanto a las aguas se experimentó en la villa de Pobladura de Pelayo García, del Señorío del Marqués de Villafranca, distante una legua de esta, según me ha informado don Joseph Amez, Párroco de ella, que una laguna que se halla en medio de dicha Villa se salió de madre más de seis pies por cual parte de sus orillas, subiendo para arriba el agua a borbollones al modo de cuando hierve una caldera, lo que duró todo el tiempo que el temblor de la mañana, a las 10, estando el agua siempre en su natural color, y luego se recogió a su centro”	Incremented groundwater level	In undifferentiated metamorphic rocks. In an area of thrusts sheets.
245	Villanueva de la Fuente, Ciudad Real	“Y en un venero copioso que sale inmediato a esta villa salió el agua muy turbia, y duró como tres horas más”	Turbidity in spring	At the contact of the Neogene with the Mesozoic.
246	Villanueva de la Jara, Cuenca	“Las aguas de los pozos subieron hasta cerca de las bocas llamando la atención de diferentes personas el rumor que ocasionaban pero no llegaron a derramar como ha sucedido en otros Pueblos de esta circunferencia”	Incremented level in Wells, turbidity in spring	246. ---
247	Villanueva del Arzobispo, Jaen	“No se advirtió movimiento alguno en ríos, ni fuentes. Sólo sí, en un pozo, mientras duró el temblor, subió el agua, de forma que llegó a la superficie y corrió, teniendo cuatro varas, desde ella hasta el agua, siendo esta hondura la regular que tiene”	Incremented level in well	At the contact of the Neogene with the Mesozoic.
24	Villanueva de la Serena, Badajoz	“...en algunos pozos y laguna que rebosaron las aguas. Las del río Guadiana, que dista media legua de esta villa, desde el mismo caso, corrieron muy turbias, y así han permanecido con corta diferencia, algunos días”	incremented groundwater level in wells and spring flow	In Neogene claystone and sandstone, near the contact with granite and metamorphic rocks.
25	Villanueva del Fresno, Badajoz	“Y se ha notado que los arroyos, que antes estaban desecados, desde este día no le falta el curso de agua, que uno de ellos es el que se denomina Alcarrache”	New streamflows	Associated to a thrust. Mostly in slate.
248	Villanueva de San Carlos, Ciudad Real	“...y en algunos pozos se advirtió subir el agua..”	Incremented level in wells	In metamorphic rocks.

Ref Num (figs. 4, 5, 6)	Original Locality	Hystorical Observations	Remarkable hydrological alterations	Interpretation
249 250 251 252 253 254 255	Villarcayo, Burgos	<p>“Que en esta capital no se conoció este fenómeno, y sólo se advirtió haberse enturbiado las aguas de los ríos Nela y Ebro. Y las de los pozos que sirven para el abasto de los vecinos. Y en el lugar de Villalahin [= Villalaín] (250), que dista media legua, una fuente caudalosa y especial, que nunca se ha visto mudar color, se observó haberle mudado con bastante espesura, a la hora de las diez de la mañana, del citado día”</p> <p>“En consecuencia de la Orden de V. I., de 8 del pasado, debo hacer presente a V. I. que, por las que expedí, se me informa de la villa de Espinosa de los Monteros se experimentó en el lugar y concejo de Quintanilla [= Quintanilla Sopena] y el de Berrueza, en el mismo día primero, a cosa de las nueve y media de la mañana, con bastante rigor, de suerte que se advirtió algún desnivel [sic] en las casas más fuertes, y las fuentes de Pedrogil (251) y Fuentegancos (252), rompió el agua por distintas partes de su acostumbrada corriente, saliendo ésta muy turbia, de color de canela, y en las campanas de torres y relojes se conoció el movimiento de la tierra, en aquéllas en sus intempestuosos sonidos y en éstos en el desplome de las pesas. En la Merindad de Montija, que linda con el término de aquella villa, no se sintió, ni señal alguna, y sólo en el lugar de Varanda [= Baranda] (253) se notó que en las tres fuentes que tiene, las dos minerales que llaman de Cadevilla y Poza, se advirtió un extraño flujo el mismo día primero, de suerte que su corriente no cabía por los conductos y, de esta suerte, se ha mantenido por espacio de doce días, en los cuales se ha ido minorando, bien que a la fecha del suceso que es el 27 [sic; querrá decir: «la fecha de la información»; FRT] no se había reducido da su natural, en el que jamás se ha experimentado disminución ni aumento. En la fuente de Cañadilla (254), que sale de una peña en lo alto de un monte, en la que tampoco se ha experimentado disminución ni aumento, creció con igual irregularidad con la especialidad de echar el agua de color de canela, muy encendida, y mantenerse las piedras por donde fluía y las arenas teñidas a la citada fuente.”</p> <p>“En consecuencia de la Orden de V. I. debo hacer presente que, según los avisos de las Merindades de Castilla la Vieja [= Merindad de Castilla la Vieja], Valdivielso [= Merindad de Valdivielso], Valdeporres [= Merindad de Valdeporres], Losa [= Aforados de Losa], Sotoscueva [= Merindad de Sotoscueva], valles de Manzanido [= Valle de Manzanedo] y Tovalina [= Valle de Tobalina] (255), no resulta haberse experimentado el temblor de tierra, ni sucedió desgracia alguna. Sí sólo se ha notado generalmente la turbación de las aguas, en todas las fuentes,</p>	<p>250 Turbidity</p> <p>251, 252, 253 Incremented spring flow, turbidity</p> <p>254 Turbidity</p> <p>255 Springs flow alterations</p>	<p>249. In Neogene limestones.</p> <p>250. -</p> <p>251. In Detritic and clayey Neogene.</p> <p>252 .--</p> <p>253 .---</p> <p>254. Detrital and clayey Neogene. Thermal spring.</p> <p>255. ---</p>
256	Villena, Alicante	“Y a corta distancia de ellos, luego de contado, se vio que brotaba agua por la parte superior de la tierra”	Incremented spring flow	In undifferentiated Mesozoic materials and associated to regional-scale N-S fault.
257 258	Xátiva, Valencia	<ul style="list-style-type: none"> • Tarreras (257) subió el nivel de la balsa. • Onteniente (258). Durante el temblor fluyeron las aguas del nacimiento turbias 	<p>257 incremented groundwater level?</p> <p>258 Spring turbidity</p>	<p>257. In an active fault.</p> <p>258. In undifferentiated Mesozoic materials.</p>
26	Zafra, Badajoz	“Sus resultas fueron: perturbarse las fuentes, unas más que otras, según su mayor altura en el terreno; de suerte que la más baja se puso sanguinolenta, que luego convirtió en alba y duró como 24 horas la turbación, que disminuyó hasta su natural. Las un poco elevadas, o de nivel más alto, no se perturbaron, aunque se notó alguna más rapidez en su curso. Los pozos manantíos crecieron a proporción de su profundidad, pues uno, más que otros, v abundante en aguas llegó con ésta al brocal”	<p>Spring flow alterations, turbidity</p> <p>Incremented level in wells</p>	It is unknown.

Apéndice B

Identificación aproximada de la geología de los puntos de agua alterados por el terremoto de Lisboa de 1755 y algunos ejemplos de localización geológica

B.1. Identificación aproximada de la geología de los puntos de agua alterados por el terremoto de Lisboa de 1755

Se presenta aquí una adenda a la Tabla del anexo A, en la que se realiza una identificación aproximada de la geología de los puntos de agua alterados por el terremoto de Lisboa de 1755.

1. Alburquerque, Badajoz. Estas fuentes están asociadas a una fractura importante que atraviesa el granito. Cerca se hallan también terrenos metamórficos.

2. Alcuéscar, Cáceres. El pozo granado que se cita era el abastecimiento al pueblo. Se han consultado las memorias de la Comisión del Mapa Geológico y dicen que este manantial brota de las cuarcitas y conglomerados en el contacto con pizarras del Cámbrico. Cerca hay terrenos graníticos y manantiales termales.

3. Arroyo de la Luz, Cáceres. El arroyo drena de terreno granítico.

4. Arroyomolinos (antiguo Arroyomolinos de Montánchez), Cáceres. Estas dos fuentes se hallan situadas en granito cerca del borde de una cuenca sedimentaria y también asociadas a fracturas. Fuente herrumbrosa o ferruginosa por la presencia de óxidos de hierro en las fracturas.

5. Benquerencia, Cáceres. Las fuentes se sitúan en granito. Parece se alinean con otras dos fuentes.

6. Botija, Cáceres. Las fuentes salen del granito que está cerca de otras rocas como las cornubianitas y las pizarras mosqueadas. Está alineado con los puntos 5 y 42.

7. Cáceres, Cáceres. Las fuentes del Rey son las que han servido de abastecimiento a Cáceres y nacen en calizas cámbricas, pero muy cerca del contacto con los granitos.

8. Jerez de los Caballeros, Badajoz. Hay areniscas y pizarras pero muy cerca están los afloramientos graníticos tal como hemos visto en el mapa geológico. También hay un cabalgamiento de dirección E-O muy cerca. Se encuentra justo en una traza de cabalgamiento pero cerca está un batolito de granitos encajado entre pizarras, gravas y cuarcitas del Paleozoico.

9. Montánchez, Cáceres. El torrente del Valle del Rey se emplaza en pleno granito y en una falla importante a la que también se alinean los puntos 2, 5 y 6.

10. Santiago de Alcántara, Cáceres. Se halla situado sobre pizarras del Silúrico.

11. Torremocha, Cáceres. Se encuentra sobre granito, en contacto con pizarras y gravas del Cámbrico.

12. Mérida, Badajoz. La geología del lugar son adamellitas.

12. Valencia de Alcántara, Cáceres. Situado en pleno granito aunque cerca del contacto con pizarras ampelíticas del Silúrico.

13. Valverde de Mérida, Badajoz. Se halla sobre granodiorita, pero también asociado a una falla importante. Está alineado con el punto de agua 4.

14. Alange, Badajoz. Se trata de los manantiales de los balnearios de Alange. Estos manantiales brotan a través de una fractura importante en terreno de Granollers y están alineados con los puntos 13 y 4. Nace en granodioritas.

15. Alcántara, Cáceres. Las fuentes están cercanas a una fractura importante y que las alinea con los puntos 10 a 12. Se hallan en granito. El color y sabor a herrumbre es porque las fracturas están tapizadas de óxidos de hierro.

16. Almoharín, Cáceres. Estas fuentes brotan del granito y de una fractura de bastante importancia y que lo alinea con los puntos 4, 13 y 14.

17. Badajoz, Badajoz. Licuefacción en el aluvial del río Guadiana. Los pozos se emplazan también en este aluvial y en zonas alteradas de granodioritas y Terciario arcilloso.

19. Cabeza de Vaca, Badajoz. Se sitúa en pizarras y cuarcitas precámbricas pero muy cerca afloramientos graníticos.

20. Ciudad Rodrigo, Salamanca. Situado en una fractura importante. La geología del territorio está constituida por un Terciario de areniscas y conglomerados que se hallan cerca del borde del Paleozoico, el cual está formado por pizarras esquistas y gravas del Cámbrico. Conocemos el lugar.

21. Feria, Badajoz. Estas fuentes se hallan relacionadas con un cabalgamiento de dirección E-O y en rocas de areniscas y pizarras del Cámbrico.

22. Pozoblanco, Córdoba. Situado sobre pleno batolito granítico.

23. Segura de León, Badajoz. Emplazada sobre pórfidos graníticos y granitos encajados en pizarras y grauvas del Cámbrico.

24. Siruela, Badajoz. La fuente se halla en cuarcitas y conglomerados del Precámbrico.

24. Villanueva de la Serena, Badajoz. Situado sobre arcillas y arenas del Neógeno, cerca de terrenos graníticos y del Paleozoico.

25. Villanueva del Fresno, Badajoz. Está situado sobre un cabalgamiento de dirección NE-SO, que afecta a calizas cámbricas.

27. Alcalá de los Gazules, Cádiz. La licuefacción se produjo en el aluvial del río Barbate.

27. La Rambla, Córdoba. Situado sobre el Terciario.

28. Alcaracejos, Córdoba. La mayor parte de los pozos se halla en la zona alterada del granito y en pequeños aluviales.

29. Almadén, Ciudad Real. Estas fuentes fueron visitadas. Salen de las cuarcitas donde se halla el criadero de cinabrio. Se observa que muchas facturas están tapizadas o rellenas de óxidos de hierro. Este óxido es el que da origen al color del agua durante el terremoto.

30. Sorbas, Almería. Se refiere al manantial llamado de Los Molinos que tiene un caudal de unos 40 litros por segundo y que drena de un acuífero yesífero. Fue visitado por nosotros.

31. Arcos de la Frontera, Cádiz. La fuente se halla en calcarenitas. La licuefacción afectó al aluvial del río.

32. Ayamonte, Huelva. La licuefacción está asociada a los depósitos de marismas del cuaternario, que en los mapas geológicos asignan Q3 constituidos por limos, arenas, cantos y arcillas. También aparecen cerca basaltos y en la montaña afloran las pizarras y gravas del Carbonífero.

32. Ayamonte, Huelva. La licuefacción se produjo sobre depósitos de marismas de arenas, arcillas y conglomerados de la unidad geológica Q3.

33. Bailén, Jaén. La fuente de la galería y los pozos se hallan asociados a granito. Es en este granito donde se encajan los yacimientos de galena de las minas de la zona. Los puntos seguramente se emplazan en la zona alterada del granito. Se alinea con los puntos 22 y 28 del batolito de Los Pedroches.

34. El Burgo, Málaga. Este nacimiento de agua está relacionado con el drenaje de un acuífero de calizas del Jurásico por encima del cual se dispone el flysh cretácico.

35. Cañaveral de León, Huelva. Está relacionado con un cabalgamiento tectónico que afecta a rocas paleozoicas. Cerca hay granito. Está en línea con los puntos 19 y 23 ya que están situados en el mismo cabalgamiento.

36. Coín, Málaga. La geología del lugar se caracteriza por la presencia de un cabalgamiento importante. La zona se halla muy trastornada tectónicamente. Predominan las peridotitas y micaesquistos del Precámbrico.

37. Gibraleón, Huelva. Es casi seguro que las fuentes a las que se refiere esta nota son las fuentes de Huelva capital y que servían para su abastecimiento. Según la Comisión del Mapa Geológico de España de esta provincia, estas fuentes nacían en pizarras arcillosas carboníferas y estaban cubiertas por materiales cuaternarios. En el verano de 1865 tenían un poco más de un litro por segundo, pero en épocas de sequía

grande se agotaban totalmente. Nacían de un pequeño pozo. Cerca está el contacto entre estas pizarras y las calcarenitas sedimentarias terciarias. La licuefacción está asociada a los depósitos cuaternarios Q3 del mapa geológico y que están formados por arenas y arcillas, principalmente.

38. Dehesa de Monte, Bollullos del Condado, Huelva. La licuefacción que aquí se produjo está asociada al cuaternario Q3 de los mapas geológicos que están constituidos por arcillas arenas y fangos, así como pasadas de gravas.

39. Bollullos del Condado, Huelva. La licuefacción que aquí se produjo está asociada al cuaternario Q3 de los mapas geológicos que están constituidos por arcillas arenas y fangos, así como pasadas de gravas.

40. La Rábida, Huelva. En La Rábida los pozos están abiertos generalmente en el Terciario dónde hay niveles de arcillas y margas entre las cuales se sitúan arenas permeables que están confinadas y que probablemente son las que se licuefactaron.

41. Jerez de la Frontera, Cádiz. Se emplaza en calcarenitas del Mioceno aunque también están cerca los materiales del Keuper. Fuentes relacionadas con moronitas y margas del Terciario.

42. Jimena de la Frontera, Cádiz. El río al que se refiere se llama Hozgarganta cuya cuenca se emplaza sobre todo en areniscas del Mioceno y algo también en calizas del Jurásico.

43 Jimena de Líbar, Málaga. Estos nacimientos drenan los acuíferos de calizas del Jurásico y también del Cretácico. Algunas fuentes también estarán asociadas a las arenas del Mioceno.

44. Mancha Real, Jaén. Se halla situado sobre el contacto entre dos unidades geológicas.

45. Bollullos, Medina Sidonia, Cádiz. La licuefacción se produjo en arenas y areniscas del Mioceno.

46. Almonte, Cádiz. La licuefacción se produjo en arenas y areniscas del Mioceno aunque también en la unidad Q3 de depósitos de marisma. En Bollullos también se produjo licuefacción en depósitos de marisma de la unidad Q3 de los mapas geológicos.

47. Moguer, Cádiz. La licuefacción se produjo en la unidad Q3 (depósitos de marisma), así como en arenas y areniscas del Neógeno.

48. Vejer de la Frontera, Cádiz. Estas alteraciones hidrogeológicas están relacionadas con los depósitos de marisma: arenas, limos, arcillas, etc por debajo de las cuales hay areniscas calcáreas terciarias.

49. Bonares, Huelva. La licuefacción afectó a las terrazas arenosas fluviales y a las arenas miocenas que tienen un nivel freático muy somero porque están cerca del río

50. Calañas, Huelva. La Comisión del Mapa Geológico dice que en Calañas hay pocas fuentes en las pizarras arcillosas pero cita la llamada El Hornito, que nace con una temperatura de 23 °C y es de escaso caudal como todas las del municipio por lo que hay que hacer pozos para poder obtener agua para abastecimiento. Por eso llama mucho la atención que aumentaran estas fuentes pequeñas. Es posible que

también y según el Mapa Geológico 1:50.000 algunas de las fuentes estén asociadas a las rocas espilitas y doleritas que hay entre pizarras carboníferas, las cuales se hallan atravesadas por fallas importantes de dirección E-O.

51. Paymogo, Huelva. Se emplaza en pizarras del Carbonífero, que tienen intrusiones de dioritas y riolitas. Leyendo las memorias de la Comisión del Mapa Geológico se deduce que las fuentes no se hallan en las pizarras sino en las rocas volcánicas tal como ocurre en Puebla de Guzmán. Se encuentra sobre todo en el cruce entre dos cabalgamientos.

52. Puebla de Guzmán, Huelva. Se encuentra sobre todo en el borde o contacto entre pizarras devónicas y carboníferas. También hay una falla de dirección E-O cerca. Aparte, hay pizarras, areniscas, cuarcitas, tobas volcánicas, rocas ultrabásicas, diabasas, porfidos, etc.

53. San Silvestre de Guzmán, Huelva. Está en pizarras pero asociada a una fractura NE-SO.

56. Villablanca, Huelva. Aquí hay pizarras y gravas. También está asociado a unas fallas E-O.

52. Puebla de Guzmán, Huelva. Como se ha dicho, en este pueblo y su término municipal hay asomos de diabasa alterada terrosa, que es donde se estaban los pozos, ya que las pizarras son muy impermeables y no tienen pozos de agua. En los pozos excavados en diabasas sí hay manantiales y tienen mayor caudal. Así pues, las fuentes que originan los arroyos están asociadas a estas riolitas, dioritas y diabasas encajadas entre pizarras, pero que también están muy fracturadas por fallas dirección E-O.

53 San Silvestre de Guzmán, provincia de Huelva. Los manantiales según el Mapa Geológico 1:50.000 están asociados a una falla muy importante de dirección NE-SO. Las rocas que más abundan son pizarras y grauvas del Carbonífero.

56. Villablanca, Huelva. Según el Mapa Geológico 1:50.000, se halla situado sobre pizarras y gravas del Carbonífero que están bastante plegadas y además muy fracturadas con fallas de dirección E-O. La licuefacción está asociada a los depósitos aluviales del río Pedraza, cerca de Ayamonte

58. Adrada de Pirón, Segovia. El manantial brota de calizas del Cretácico pero asociado a una fractura dirección NE-SO que pone en contacto el Cretácico con un sustrato de gnéis. Se han consultado todos los mapas hasta el 1:50.000 geológico.

59. Fuentes de Ágreda, Soria. Se trata del manantial del cual se abastecía esta pequeña aldea. Manantial con fábrica de origen romano y qué ha sido visitado por nosotros. Surge en unos depósitos coluviales cuaternarios pero casi seguro que drena un nivel calcáreo más permeable intercalado entre calizas margosas. Se trata de un nivel freático colgado respecto a nivel regional.

60. Beratón, Soria. Esta fuente también se ha visitado y tiene una fábrica de origen tardorromano. Brota como un litro por segundo y drena un nivel de dolomías fracturadas de la facies triásica del Muschelkal.

61. Matalabreras, Soria. Es una pequeña fuente que servía de abastecimiento. De menos de un litro por segundo de caudal y que también fue visitada por nosotros. Actualmente está casi perdida y se conserva el lavadero antiguo. Nace en un cono

de deyección más o menos arcilloso donde se emplaza la población.

62. San Felices, Soria. Esta fuente también ha sido visitada y tiene unos dos o cuatro litros por segundo, dependiendo de las lluvias. Nace y drena de unas calizas tobáceas de las facies Purbek-Weald. No es de extrañar el color rojo de las aguas porque abunda el óxido de hierro en los terrenos de la zona.

63. Manantial de Vozmediano, Soria. Ha sido visitado muchas veces por nosotros. Nace a presión en un acuífero semiconfinado de calizas del Jurásico. Probablemente esté asociado a una falla N-S, paralela al barranco donde nace. También está asociado a una falla inversa de carácter regional (falla de Talamantes). La zona está afectada por metamorfismo de fractura presente en esta parte N del Moncayo. Las calizas están apizarradas. Este manantial es sensible a los terremotos. Se sabe que dejó de manar durante el terremoto de 1959 de Cervera del Río Alhama durante 9 horas. Tiene un caudal medio de 1200 litros por segundo y es uno de los mayores de España.

64. Aguilafuente, Segovia. Parece que estas fuentes nacen en depósitos terciarios de la cuenca del Duero más o menos arcillosos y arenosos.

65. Alaejos, Valladolid. Esta laguna es el afloramiento del nivel freático, al igual que los pozos citados. Está situada sobre el Terciario pero debajo hay una falla de carácter nacional importante. Se ve que el manantial se asocia a esta falla.

66. Alcalá la Real, Jaén. Parece que esta fuente se halla asociada a una gran falla. Cerca hay un balneario de aguas sulfhídricas cálcicas frías. Sin embargo, esta no es la fuente a la que se refiere la encuesta.

67. Alcañices, Zamora. Esta fuente parece que está asociada a terrenos de gnéis.

68. Alozaina, Málaga. Nace en terreno paleozoico indiferenciado.

69. Añora, Córdoba. Los pozos se hallan situados en la zona de alteración y pequeños aluviales que se hallan sobre sustrato de granitos.

70. Astorga, León. Esta fuente se llama actualmente de los siete caños y está situada en el Terciario, pero junto a una falla importante, a la que hay que asociar.

71. Ballesteros de Calatrava, Ciudad Real. Estos puntos de agua están muy cerca del cruce de dos fracturas importantes y están alineados con el punto 57.

72. Bujalance, Córdoba. Aunque se halla en el Terciario poco permeable, su alteración estuvo asociada a una falla de tipo normal que hay debajo.

73. El Burgo de Osma, Soria. Es un manantial de más de 2000 litros por segundo, que drena un gran acuífero kárstico de calizas del Cretácico. Ha sido visitado muchas veces por nosotros.

74. Cádiz, Cádiz. La licuefacción está asociada a depósitos y formaciones superficiales de fangos, arenas y otros depósitos de marismas.

75. Jaraba, Zaragoza. Son manantiales termales donde actualmente hay un balneario. El agua surge a 34 °C y es de facies bicarbonatada cálcica aunque también hay sulfhídrica. Este manantial, que es de caudal importante, está asociado a una banda del Cretácico calcáreo y fallado. Su continuación es la falla de Alhama de Aragón. Lo hemos visitado varias veces.

76. Alhama de Aragón, Zaragoza. Son los manantiales termales más caudalosos de España, de 450 litros por segundo de caudal medio. Están asociados a un acuífero Cretácico y a una falla que sigue las directrices de la Cordillera Ibérica NO-SE. Lo hemos visitado muchas veces.

77. Berdejo, Zaragoza. Los manantiales drenan un acuífero de calizas del Cretácico y del Jurásico cuya base son margas y debajo están las arenas blancas de la facies Utrillas. Este manantial engrosa el caudal del río Manubles. Nosotros lo conocemos.

78. Caldes de Malavella, Gerona. Se trata de un manantial termal que brota de una falla de tipo normal.

79. Calzada de Calatrava, Ciudad Real. Se encuentra en rocas basálticas y otras rocas volcánicas. Hay un balneario de aguas picantes con CO₂, ferruginosas.

80. Molló, Gerona. Está asociado a una falla activa.

81. Vallfogona de Ripollés, Gerona. Las fuentes están asociadas a un cabalgamiento tectónico.

82. Lora del Río, Sevilla. Estos arroyos corren por un plutón granítico, aunque también hay rocas de gnéis.

83. Brenes, Sevilla. Esta localidad se encuentra en el aluvial del Guadalquivir.

84. Chiclana de la Frontera, Cádiz. Situado sobre el Plioceno que está constituido por arenas, margas y calizas. Cerca está el Keuper y también el aluvial cuaternario del río Salado. Hay una fuente mineromedicinal de carácter sulfhídrica cloruradasódica pero no parece que se refiera a este balneario.

85. Chinchilla, Albacete. Se halla situado cerca de una falla importante y también en el borde de dos unidades geológicas.

86. Cieza, Murcia. La localidad se halla en el borde de dos unidades geológicas y cerca de fracturas importantes.

87. Cifuentes, Guadalajara. Las fuentes de este pueblo son muy caudalosas y dan nombre al pueblo que he realidad significa cien fuentes. Las conocemos y brotan del contacto entre las calizas del páramo del Mioceno que están arriba, formando un acuífero libre, y la base impermeable horizontal que constituyen las margas subyacentes. Se puede observar que también hay una falla debajo del Ponticense.

88. Fuencaliente, Ciudad Real. Esta fuente se halla en granito en contacto con rocas metamórficas y fracturas relativamente importantes. Hay un balneario con una fuente de bicarbonatada y ferruginosa que nace entre 25 y 50 °C.

89. Huete, Cuenca. Se halla situado en el Cretácico carbonatado, en el borde de la Sierra de Altomira, perteneciente a la Cordillera Ibérica.

91. Iznalloz, Jaén. Se sitúa en un borde geológico y también sobre una falla importante. Está alineado con los puntos 85, 90 y 72.

92. Málaga, Málaga. Situado cerca de un borde unidad geológica y cerca también de una falla importante.

93. Molina de Aragón, Guadalajara. Este pueblo se halla emplazado sobre areniscas y dolomías del Triásico y cerca de una falla activa.

94. Alcañiz, Teruel. Alcañiz se encuentra en aluvial pero todo lo de alrededor es Terciario arcilloso rojizo, de ahí el color de las fuentes.

96. Aldeanueva del Codonal, Segovia. Esta laguna es el afloramiento del nivel freático y, aunque se emplaza en terreno Plioceno sobre Mioceno arcilloso y arenoso, está situada justo encima de una falla nacional de dirección SE-NE.

97. Alhaurín el Grande, Málaga. La fuente está situada muy cerca de la falla activa que señala el mapa de España de fallas activas del Instituto Geológico.

98. Monforte del Cid, Alicante. Esta fuente está asociada a una fractura importante y además está en el contacto de dos unidades geológicas. Cerca hay un balneario pero la crónica no se refiere a esta fuente mineromedicinal.

99. Almansa, Albacete. Se halla muy cerca de una falla activa y también del borde entre dos unidades geológicas.

100. Alhama de Almería, Almería. Se trata del manantial del balneario que es de agua sulfatadacálcica y ferruginosa. Tiene un caudal de 14 litros por segundo según el libro de los balnearios de España. Nace de una fractura importante de dirección N-S. Asimismo, esta fractura hace de contacto con dos unidades geológicas.

101. Almogía, Málaga. Estas dos fuentes brotan en calizas.

102. La Bañeza, León. Localidad que se halla en terciario, pero es “transparente” a una falla regional importante que va por debajo y que es donde se sitúa también el punto 70.

103. Barbastro, Huesca. Esta localidad se encuentra en el borde del Pirineo y la Cuenca terciaria del Ebro.

104. Becerril de Campos, Palencia. Sobre Terciario arcilloso.

105. Begíjar, Jaén. Situado en el borde de unidades geológicas entre el Terciario y el aluvial. Alineado con el punto 44.

106. Belmonte del Tajo, Madrid. Es un manantial que está en el contacto entre las calizas del páramo y las margas subyacentes todo del Terciario.

107. Berceruelo, Valladolid. La fuente surge del contacto de diferente permeabilidad entre las calizas del páramo arriba y las margas de la base impermeable. Mioceno.

108. Besalú, Gerona. Las fuentes se encuentran en el contacto de unidades geológicas que se halla tectonizado por cabalgamientos. Esta fuente se halla muy cerca de la 109 y 111.

109. Albanyá, Gerona. Se halla en terrenos metamórficos y en una falla importante.

110. La fuente de Bebida, Gerona. Se halla en terrenos metamórficos.

111. Fuente de Mayá, Mayá, Gerona. También en contacto mediante cabalgamiento tectónico entre dos unidades geológicas. Muy cerca de los puntos 110, 108 y 111.

112. Boñar, León. Falla del contacto entre el Terciario y unidades paleozoicas de la Cordillera Cantábrica. Hay un balneario de aguas bicarbonatadas cálcicas.

113. Borja, Zaragoza. Estos manantiales salen de un acuífero de calizas del Jurásico que emergen de entre el Terciario arcilloso. Son manantiales surgentes a

presión y asociados a una falla oculta bajo la cobertera del Terciario. Se visitaron.

114. Brunete, Madrid. Estas charcas están situadas en pleno acuífero detrítico del Terciario de Madrid, de naturaleza arenosa y arcillosa.

115. Cabezas del Pozo, Ávila. Esta fuente es el afloramiento del nivel freático y aunque está situadas en el Terciario, hay cerca una falla de importancia regional oculta bajo esta cobertera.

116. Ruesca, Zaragoza. La fuente se halla situada sobre el Mioceno perteneciente a la Cuenca de Calatayud-Teruel, pero próxima una falla de dirección NO-SE.

117. Acered, Zaragoza. Asociada a una falla activa de dirección NO-SE.

118. Clarés de Ribota, Zaragoza. Las fuentes también se hallan situadas en el Terciario de la cubeta Calatayud-Teruel. Terreno margoso y yesífero, pero cerca del borde que está fallado; y es una falla activa.

119. Abanto, Zaragoza. En esquistos y cuarcitas del Paleozoico de la Cordillera Ibérica y cerca de fallas importantes.

120. Torrelapaja, Zaragoza. Estos manantiales son importantes y engrosan el caudal del río Manubles. Drenan de calizas Jurásico y del Cretácico de la Cordillera Ibérica; cerca de fallas. Estos manantiales han sido visitados.

121. Bijuesca, Zaragoza. También drena calizas del Jurásico y del Cretácico pero cerca de fallas activas.

122. Carenas, Zaragoza. Esta localidad se encuentra en el contacto entre el Paleozoico de la Cordillera Ibérica y el Mesozoico. Muy cerca de fallas importantes de dirección NO-SE.

123. Monterde, Zaragoza. Localidad situada en el Mesozoico de la Cordillera Ibérica cuyas directrices estructurales son NO-SE.

124. Pardos, Zaragoza. La fuente se halla en el contacto entre el Paleozoico y el Mesozoico con directrices típicas de la Cordillera Ibérica: NO-SE.

125. El Frasnó, Zaragoza. La localidad se halla en esquistos del Paleozoico de la Cordillera Ibérica. Por aquí cruza una falla activa.

126. Nuévalos, Zaragoza. Calizas del Jurásico y Cretácico. Hay un balneario que sale a 63 °C. El Jurásico también está muy fallado.

127. Ibdes, Zaragoza. En el contacto entre el Terciario de la Cuenca de Almazán con el Mesozoico de la Cordillera Ibérica.

128. Collado del Pal, en San Martín de Sarroca, Gerona. En rocas metamórficas que se hallan afectadas por un cabalgamiento de dirección E-O.

129. La Campana, Carmona, Sevilla. Esta localidad se halla en los depósitos cuaternarios y Plioceno. Por debajo hay una falla oculta a la que probablemente están asociados el manantial. Está alineado con el punto 45.

130. Cantillana, Sevilla. Se sitúa en el borde de una de las terrazas del Guadalquivir y muy cerca los granitos de Ossa Morena.

131. Resalta, Cervera, Lérida. Se sitúa en arcillas y limos del Terciario.

132. Gaver, Cervera, Lérida. Situado igualmente en Terciario arcilloso.

133. Baronía de Rial, Cervera, Lérida. Aquí los puntos de agua están relacionados con las calizas del prepirineo relacionadas con un cabalgamiento de dirección

E-O.

134. Nava de la Asunción, Coca, Segovia. La laguna se sitúa sobre una falla que está bajo el Terciario. Este punto está alineado con los 96, 115 y 134.

136. Cuenca, Cuenca. La ciudad de Cuenca se halla en el borde entre el Terciario y las calizas del Cretácico de la serranía de Cuenca dentro de la Cordillera Ibérica.

137. Brea, Daroca, Zaragoza. La fuente se halla situada sobre una falla activa que está dentro de la cuenca terciaria de Calatayud-Teruel.

138. Dollar, Granada. Situado en el borde del Terciario.

139. Donjimeno, Ávila. Esta laguna se halla situada en el Terciario arcilloso pero debajo hay una fractura regional importante que afecta al sustrato.

140. Vidas, Ávila. Esta laguna se halla situada en el Terciario arcilloso pero debajo hay una fractura regional importante que afecta al sustrato.

141. Fuenlabrada, Madrid. Está ya en pleno Terciario arenoso del Acuífero Detrítico de Madrid. La fuente número 88 de Fuencaiente Ciudad Real la conocemos personalmente.

142. Fuentesoto, Fuentidueña, Segovia. Esta fuente se hallan del contacto entre las calizas del Cretácico del Sistema Central y el Terciario arcilloso de la cuenca del Duero.

143. Caldes de Malavella, Girona. Las fuentes termales de esta localidad son muy importantes y se sitúan en granito pero también en fallas activas.

144. Güevéjar, Granada. La fuente se halla sobre terrenos arcillosos del Terciario pero dentro de un gran deslizamiento de ladera que se movió con este terremoto y también con el terremoto de 1884 de Andalucía.

147. Hinojosa del Duque, Córdoba. Se halla situado sobre el granito del batolito de Los Pedroches.

148. Hontoria, Guadalajara. Esta fuente se halla situada en el contacto entre las calizas acuíferas del Páramo de edad Pontiense con las margas subyacentes.

149. Hoyales de Roa, Burgos. Aunque estén situadas en pleno Terciario de la cuenca del Duero, debajo pasa una falla importante de escala nacional que afecta al sustrato. Hay otros puntos de agua activados alineados y encima de esta falla dentro del Terciario.

150. Igualaja, Málaga. Parece que está relacionado con una falla activa.

151. Illescas, Toledo. Se sitúa en pleno Terciario margoso.

152. Jadraque, Guadalajara. Las fuentes están en el contacto entre las calizas del páramo y las margas subyacentes. Conocemos la fuente, la que está justo en la bajada en la carretera cerca del castillo.

154. Lebrija, Sevilla. Se sitúa en el borde entre el Mioceno y los depósitos cuaternarios de marismas aunque debajo hay una falla importante oculta.

155. Linares, Jaén. Manantiales situados en granito y en el Terciario.

156. Logroño, La Rioja. Emplazado en el aluvial del río Ebro cerca del Terciario.

157. Loja, Granada. Situado en el contacto geológico entre el Paleozoico y el Terciario.
158. Lopera, Jaén. Situado en la margen izquierda del río Guadalquivir en el contacto entre las terrazas del río con el Plioceno. Se halla alineado con los puntos 45, 72, 129, etc.
159. Lugo, Lugo. El manantial termal está situado en granitos. Son aguas que manan a 45 °C, facies bicarbonatado sulfatadas.
160. Llombai, Valencia. Parece que se sitúa sobre una falla activa.
- 160 bis. Manresa, Barcelona. Situado sobre el Terciario.
161. Monistrol de Montserrat, Barcelona. Situado sobre conglomerados Terciarios.
162. Salamanca, Barcelona. Situado sobre Terciario arcilloso.
163. Sallent, Barcelona. Situado sobre Cuaternario y Plioceno.
164. Moia, Barcelona. Sobre el Terciario arcilloso de la cuenca del Ebro.
165. Medellín, Badajoz. Situado sobre aluvial.
166. Medinaceli, Soria. Si se refiere a los pozos situados en la ciudad alta, esta está emplazada sobre carniolas del Jurásico inferior. Si se refiere a la ciudad baja se halla emplazada sobre el aluvial del río Jalón y también sobre arcillas de la facies Keuper y dolomías del Muchelkalk. Conocemos el lugar.
167. Rodilana, Valladolid. Situado sobre el Terciario pero debajo hay una falla nacional importante sobre la cual también se sitúan los puntos 65 y 167.
168. Medina de Pomar, Burgos. Está situado sobre el Terciario pero cerca de una falla regional importante.
169. Chiclana, Cádiz. Situado sobre depósitos de marismas cerca del Terciario.
170. Miguelturna, Ciudad Real. La geología del lugar son calizas del Terciario.
171. Moguer, Huelva. Aquí y según información de la Comisión del Mapa Geológico de España que nos describe la geología del lugar, predomina el terreno llano dónde son muy raras las fuentes pero sin embargo son abundantes las aguas subálveas. En Moguer hay pequeñas depresiones en roca arenosa detrítica aluvial debajo de la cual hay otra más compacta impermeable. Este manto arenoso es acuífero y en el llamado Navazo de Buevas nacen 37 litros por segundo. También en palos está la llamada cueva del Burgo que es de semejantes características.
172. Montoro, Córdoba. Situado sobre el aluvial del río Guadalquivir.
173. Montuenga, Segovia. La charca a la que se refiere se halla situada sobre pleno Terciario de la Cuenca del Duero.
174. Moratalla, Murcia. La fuente se halla situada en el contacto entre dos unidades geológicas.
175. Mula, Murcia. En Puebla de Mula la principal característica es que se halla sobre un contacto entre el Terciario y el Mesozoico y dentro de una falla activa en una zona sísmicamente activa. Asociada a esta falla hay fuentes termales, como la del balneario, que sale a 38 °C.
176. Murcia, Murcia. Situada sobre aluvial cuaternario.

177. Orduña, Vizcaya. Situada sobre las arcillas y yesos de la facies triásica del Keuper.

178 Benijófar, Valencia. Situado en el contacto de dos unidades geológicas y alineado con otros puntos de agua.

179. Ourense, Ourense. Manantiales termales de las Burgas que se emplazan en granito. Si salieron de color blanco es porque las fracturas están rellenas de caolín, producto de descomposición de los feldespatos del granito. Conocemos estas fuentes y hemos leído sobre la presencia de caolín en las fracturas del granito de la zona. Son fuentes que salen a 68 °C, de las más calientes de España. Sulfuradas sódicas.

180. Ribas de Sil, Ourense. Situado sobre el aluvial del río Sil.

181. Peñas de San Pedro, Albacete. Situado sobre el borde de una unidad geológica.

182. Peñíscola, Castellón. La conocemos y drena un acuífero calcáreo situado en el borde de una unidad geológica. Es un acuífero confinado y por tanto es sensible a los terremotos. El caudal de estos manantiales es muy grande y supera los 500 litros por segundo.

183. La Pola de Gordón, León. Situado sobre Paleozoico, el cual se halla atravesado por muchos cabalgamientos de dirección E-O.

184. Vilaboa, Pontevedra. Fuente situada sobre granitoides.

185. Poza de la Sal, Burgos. Situado sobre un diapiro de yesos y arcillas del Triásico superior.

186. Queralbs, Girona. Situado sobre rocas metamórficas.

187. Vall de Ribes, Girona. No localizado geológicamente.

188. Baños de las Cuevas de Ribas, Girona. Situado sobre rocas metamórficas.

190. Quismondo, Toledo. Situado sobre el acuífero detrítico de Madrid.

191. La Redondela, Huelva. La licuefacción afectó a los depósitos flojos de marismas. El lugar está muy cerca de una falla que afecta al sustrato.

192. Fontibre, Reinosa, Cantabria. El manantial que es el nacimiento del río Ebro, brota de las dolomías carniolas del Jurásico inferior. Se trata en parte de una resurgencia pues se alimenta de las pérdidas del río Híjar, que se halla cerca. Lo conocemos personalmente.

194. Las Rozas, Madrid. Fuente del pueblo, actualmente perdida y seca. La fábrica se conserva junto al Ayuntamiento. Se sitúa en el contacto entre la parte superior lavada de finos del Terciario, que es más permeable, y su parte inferior menos permeable.

195. Rubielos Bajos, Cuenca. Situado sobre el Terciario, pero cerca de una falla regional importante.

196. Sabiote, Jaén. Situado en la margen izquierda del río Guadalquivir en el contacto entre el aluvial de este río y el Plioceno. Está alineado con varios puntos como el 90.

197. Barco de Ávila, Salamanca. La fuente está en granito pero pasa justo por ella una fractura regional importante.

198. Salobreña, Granada. Emplazada en una zona muy tectonizada.

199. Segovia, Segovia. Emplazado sobre las calizas del Cretácico, debajo de las cuales, en el contacto con las margas, es donde aparecen las fuentes, aunque también hay una falla regional importante cerca.
200. San Idelfonso, Segovia. La fuente a que hace referencia se halla situada sobre granito o sobre gneis.
201. Isla Mayor, Sevilla. La licuefacción se produjo en los depósitos blandos de las marismas. Edad holocena.
202. Coria del Río, Sevilla. Los volcanes de licuefacción se produjeron también en los depósitos blandos holocenos de las marismas.
203. Bollullos Par del Condado, Huelva. La licuefacción se produjo en arenas del Mioceno.
204. Sigüenza, Guadalajara. Las fuentes se sitúan en las dolomías del Triásico medio. Las conocemos.
205. Siles, Jaén. Se emplaza en calizas pero también asociado a fracturas importantes.
206. Sisante, Cuenca. Emplazado sobre el Terciario.
207. Socovos, Albacete. Emplazado sobre una fractura que afecta al Mesozoico.
208. La Solana, Ciudad real. El río Azuer tiene su cuenca sobre todo en las areniscas del Triásico inferior. Lo conocemos.
209. Uceró, Soria. Nacimiento de La Galiana a la salida del cañón del Río Lobos, que drena un gran acuífero calcáreo. Hemos estado muchas veces ahí.
210. Suellacabras, provincia de Soria. Se trata de un manantial sulfurado junto a la ermita de la Virgen de La Blanca, que conocemos. Apenas tiene unos litros por minuto de caudal. Brota de entre calizas del Jurásico, que tienen piritas.
211. Sueca, Valencia. Se emplaza en el Terciario.
212. Velada, Toledo. Situado en el contacto entre el granito y el Terciario.
213. Hinojosa de San Vicente, Toledo. Situado en granito, pero cerca del contacto con el Terciario.
214. Avellaneda, Toledo. No se ha localizado.
215. Aldeanueva de Barbarroja, Toledo. Situado en una falla regional y también en el borde o contacto entre el granito y el Terciario.
216. Pueblanueva, Toledo. Situado sobre el Terciario.
217. Castañar de Ibor, Toledo. Emplazado en gneises paleozoicos, pero también en una fractura o falla importante.
218. Alía, Toledo. Emplazado sobre rocas de gneis y en una falla importante.
220. Quintanar del Rey y Madrigueras, Albacete. Situado en Terciario y Cuaternario.
221. Toledo, Toledo. Emplazado en gneis.
222. Torredonjimeno, Jaén. Esta localidad se sitúa en el Terciario.
223. Tortosa, Tarragona. En el borde entre el Mesozoico y el Terciario. Hay un balneario de agua ferruginosa.
224. Ubrique, Cádiz. Este manantial se visitó, es muy grande y drena de calizas de un acuífero que ocupa la Sierra de Grazalema.

225. Uclés, Cuenca. Cretácico calcáreo de la Sierra de Altomira. Alineados con otros puntos de agua.
226. Utiel, Valencia. Se halla en el Terciario arcilloso. Lo conocemos.
227. Valdefuentes, Cáceres. Se halla situado en granito, pero además en una falla importante de nivel nacional y alineado con otros muchos otros puntos.
228. Valladolid, Valladolid. Esta ciudad se encuentra sobre el aluvial del río Pisuerga, con los montes de alrededor de Terciario arcilloso. Pero debajo hay una falla importante que afecta sobre todo al zócalo.
230. Vegas del Condado, León. Se halla situado en pleno Terciario de la Cuenca del Duero.
231. Vejer de la Frontera, Cádiz. Los terrenos más predominantes son del Cuaternario y del Terciario.
232. Viladrau, Gerona. Situado sobre granito.
233. Seva, Barcelona. También situado sobre granito.
234. Roda de Ter, Barcelona. Situado en el borde de una unidad geológica y sobre una falla activa. Situado sobre granito.
236. Villafranca del Penedés, Barcelona. En el pueblo de Albinyana, que está situado sobre rocas metamórficas y en una fractura o falla importante.
237. Masquefa, Barcelona. Se halla sobre el Terciario del Vallés Penedés.
238. Esparraguera, Barcelona. Se halla situada sobre el Terciario que rellena la fosa del Vallés Penedés en la Cordillera Costero-Catalana.
239. Collbató, Barcelona. Situado en una fractura del borde de la fosa terciaria del Vallés Penedés con el Paleozoico.
241. Villablino, León. Situado en terrenos paleozoicos.
242. Villafranca Montes de Oca, Burgos. Situado sobre el Terciario que rellena el corredor de la Bureba, aunque debajo hay una falla importante.
- 244 Villamañán, León. Se halla situado en terreno Paleozoico afectado por numerosas escamas y cabalgamientos.
245. Villanueva de la Fuente, Ciudad Real. Situada en el borde entre el Terciario manchego y el Mesozoico.
246. Villanueva de la Jara, Cuenca. Situado sobre el Mesozoico.
247. Villanueva del Arzobispo, Jaén. Situado sobre aluvial.
248. Villanueva de San Carlos, Ciudad Real. Situado sobre terrenos metamórficos del Paleozoico.
249. Villarcayo, Burgos. Situado sobre calizas del Terciario.
252. Fuente Juncos, Burgos. Situado sobre el Terciario.
253. Baranda, Burgos. Situado sobre el Terciario.
254. Fuente Cañadilla, Burgos. Manantial termal.
256. Villena, Alicante. Situado sobre una fractura importante o falla de dirección N-S y en terrenos mesozoicos.
257. Játiva, Valencia. En la localidad de Tavernes que está situada sobre una falla activa.
258. Onteniente, Valencia. Situado sobre Mesozoico.

259. Cabra, Córdoba. Situado sobre un contacto geológico importante entre unidades geológicas.
260. Santa Buey, Córdoba. Situado sobre Mesozoico.
261. Cazorla, Jaén. En el contacto entre el Mesozoico y el Terciario.
263. Écija, Sevilla. Las fuentes se sitúan sobre el contacto entre el Terciario y el Mesozoico.
264. Espejo, Córdoba. También está situado en el contacto entre el Terciario y el Mesozoico.
265. Fuente Obejuna, Córdoba. Situado sobre rocas metamórficas.
266. Iznájar, Córdoba. Situado sobre rocas metamórficas paleozoicas de las Béticas.
267. Ledesma, Salamanca. Son manantiales termales que surgen del granito, pero asociados a una falla regional importante.
268. Calzadilla del Campo, Salamanca. Fuente medicinal asociada al granito. Es también un manantial termal que está relacionado con la misma factura que el punto 267.
269. Manzanares, Ciudad Real. Se encuentra sobre el gran acuífero de calizas terciarias de La Mancha, llamado acuífero 23.
270. Montemayor, Córdoba. Aunque está en el Terciario, hay una falla regional importante en el zócalo.
271. Montilla, Córdoba. Situado sobre materiales terciarios.
272. Priego, Córdoba. Situado sobre materiales metamórficos paleozoicos.
277. Tarazona, Zaragoza. Se trata del manantial de San Juan, de unos 200 l/s, que sale a presión de un acuífero calcáreo confinado que atraviesa el Terciario Mioceno. Lo conocemos muy bien.

B.2. Ejemplos de localización geológica

8. Jerez de los Caballeros, Badajoz

Hay areniscas (gravas), cuarcitas y pizarras (verde y azul en el mapa) pero muy cerca están los afloramientos graníticos (color rosa en el mapa). Y tal como se ve en el mapa geológico (Figura B.1), también hay muy cerca un cabalgamiento de dirección E-O.

51. Paymogo, Huelva

Se emplaza en pizarras del Carbonífero (gris en el mapa de la Figura B.2) que tiene también intrusiones de dioritas y riolitas (naranja en el mapa). Leyendo las memorias de la Comisión del Mapa Geológico, se deduce que las fuentes no se hayan en las pizarras sino en las rocas volcánicas tal como ocurre en Puebla de Guzmán. Se hace notar el cruce de fracturas.

Figura B.1: Geología de Jerez de los Caballeros.

52. Puebla de Guzmán, Huelva

Como se ha dicho, en este pueblo y su término municipal hay asomos de diabasa alterada terrosa, que es donde estaban los pozos, ya que las pizarras (gris y naranja en el mapa de la Figura B.3) son muy impermeables y no tienen pozos de agua. En los pozos excavados en diabasas sí mana el agua y los pozos tienen mayor caudal. Así pues, las fuentes que originan los arroyos de la zona están asociadas a estas riolitas, dioritas y diabasas (azul claro, morado y verde en el mapa) encajadas entre pizarras, pero que también están muy fracturadas por fallas de dirección E-O.

Figura B.2: Geología de Paymogo.

Apéndice C

Proceso de los datos de número de puntos de agua afectados en España por el terremoto de Lisboa de 1755

España se ha dividido en siete unidades hidrogeológicas (seis superficies más las fallas y contactos geológicos), correspondiendo cada una de ellas un determinado intervalo de valores de coeficiente de agotamiento (Figura 6.3). Por otra parte, deben tenerse en cuenta las distintas intensidades sísmicas ($MMI \in [2, 8]$) a las que estuvo expuesta España en el terremoto de Lisboa de 1755 (Figura 6.6).

En primer lugar, se ha contabilizado en la Tabla A (matriz 6.1) el número de puntos de agua activados (AWP_{ij}) por cada unidad hidrogeológica $i \in [1, 7]$ e intervalo de intensidad sísmica $j \in [1, 7]$ ($M_j = j + 1$) (Figura 6.6).

Posteriormente, en la Tabla C se han expresado estos valores por unidad de área (matriz 6.2). Sin embargo, esto no es suficiente para comparar los números obtenidos entre sí ya que estos corresponden a distintos valores de intensidad sísmica. Deben, por tanto, ser normalizados a una intensidad de referencia. La intensidad de referencia que se ha elegido es la intensidad media del terremoto de Lisboa de 1755 en España $M\bar{M}I$, que se calcula con la ecuación 6.3 (Tabla D).

Finalmente, en la Tabla E se normalizan los valores de incidencia para que puedan ser comparados entre sí, obteniendo el índice NI [%] (ecuación 6.4).

Table A. Activated Water Points (AWP)											
1. Area correction	Intensity MMI	MMI=2	MMI=3	MMI=4	MMI=5	MMI=6	MMI=7	MMI=8	Total	Nonnormalized Incidence (NNI) (%)	
	AWP in the Hydrogeological Units (HU) with $\alpha>>>10000^*$	3	5	18	40	12	8	0	86		33,20 %
	AWP in the HU with $\alpha>10000$	13	4	19	25	37	7	1	106		40,93 %
	AWP in the HU with α in (5000, 10000)	2	0	0	1	0	0	0	3		1,16 %
	AWP in the HU with α in (1000, 5000)	1	4	0	0	6	0	0	11		4,25 %
	AWP in the HU with α in (500, 1000)	0	0	2	1	0	3	0	6		2,32 %
	AWP in the HU with α in (100, 500)	1	2	4	5	2	1	4	19		7,34 %
	AWP in the HU with α in (0, 100)	1	2	11	8	1	2	3	28		10,81 %
	Total	21	17	54	80	58	21	8	259		100,00 %
Table B. Area of the Hydrogeological Units (AHU)											
Intensity MMI	MMI=2	MMI=3	MMI=4	MMI=5	MMI=6	MMI=7	MMI=8	Total (km²)			
AHU with $\alpha>>>10000$ (km²)	300	800	1915	2315	2257	664	50	8301			
AHU with $\alpha>10000$ (km²)	2000	2500	44000	65000	47000	9500	523	170523			
AHU with α in (5000, 10000) (km²)	500	495	1000	550	1485	1000	0	5030			
AHU with α in (1000, 5000) (km²)	800	4554	17000	4455	13613	300	0	40722			
AHU with α in (500, 1000) (km²)	99	3316	4950	17325	1237	1004	0	27931			
AHU with α in (100, 500) (km²)	5000	17000	44552	33413	7425	5300	4950	117640			
AHU with α in (0, 100) (km²)	501	6435	24751	48500	1980	3465	1020	86652			
Total (km²)	9200	35100	138168	171558	74997	21233	6543	456799			
Table C. AWP per Area											
Intensity MMI	MMI=2	MMI=3	MMI=4	MMI=5	MMI=6	MMI=7	MMI=8	Total (km ⁻²)			
AWP/AHU, $\alpha>>>10000$ (km ⁻²)	0,01	0,00625	0,009399478	0,017278618	0,005316792	0,012048193	0	0,060293080490494			
AWP/AHU, $\alpha>10000$ (km ⁻²)	0,0065	0,0016	0,000431818	0,000384615	0,000787234	0,000736842	0,001912046	0,012352555603351			
AWP/AHU, α in (5000, 10000) (km ⁻²)	0,004	0	0	0,001818182	0	0	0	0,005818181818182			
AWP/AHU, α in (1000, 5000) (km ⁻²)	0,00125	0,000878349	0	0	0,000440755	0	0	0,002569103864944			
AWP/AHU, α in (500, 1000) (km ⁻²)	0	0	0,00040404	5,77201E-05	0	0,002988048	0	0,003449808270525			
AWP/AHU, α in (100, 500) (km ⁻²)	0,0002	0,000117647	8,97827E-05	0,000149642	0,00026936	0,000188679	0,000808081	0,001823192462123			
AWP/AHU, α in (0, 100) (km ⁻²)	0,001996008	0,0003108	0,000444426	0,000164948	0,000505051	0,000577201	0,002941176	0,006939610789098			
Total (km ⁻²)	0,023946008	0,009156796	0,010769546	0,019853726	0,007319192	0,016538963	0,005661303	0,093245533298718			
Table D. Medium MMI calculation											
Intensity MMI	2	3	4	5	6	7	8				
$M_j*\sum_{i=1}^7\{AWP_{\{i,j\}}/AHU_{\{i,j\}}\}$	0,047892016	0,027470388	0,043078182	0,099268629	0,043915153	0,115772738	0,045290425				
Numerator= $\sum_{j=1}^7\{M_j*\sum_{i=1}^7\{AWP_{\{i,j\}}/AHU_{\{i,j\}}\}\}$	0,422687531										
Denominator= $\sum_{i=1}^7\{AWP_{\{i,j\}}/AHU_{\{i,j\}}\}$	0,093245533										
Medium MMI=Numerator/Denominator	4,533059296										
Table E. Normalized Incidence (NI)											
Intensity MMI	2	3	4	5	6	7	8	NI (km ⁻²)	NI (%)		
Normalized AWP in the HU with $\alpha>>>10000$ (km ⁻²)	0,022665296	0,009443874	0,010652098	0,015665	0,004016889	0,007802167	0	0,070245323810956	59,65%		
Normalized AWP in the HU with $\alpha>10000$ (km ⁻²)	0,014732443	0,002417632	0,000489364	0,000348697	0,000594763	0,000477164	0,001083427	0,020143489968663	17,11%		
Normalized AWP in the HU with α in (5000, 10000) (km ⁻²)	0,009066119	0	0	0,001648385	0	0	0	0,010714503789402	9,10%		
Normalized AWP in the HU with α in (1000, 5000) (km ⁻²)	0,002833162	0,001327202	0	0	0,000332995	0	0	0,004493359192378	3,82%		
Normalized AWP in the HU with α in (500, 1000) (km ⁻²)	0	0	0,000457885	5,23297E-05	0	0,001935	0	0,002445214165443	2,08%		
Normalized AWP in the HU with α in (100, 500) (km ⁻²)	0,000453306	0,000177767	0,000101748	0,000135668	0,000203504	0,000122185	0,000457885	0,001652062108628	1,40%		
Normalized AWP in the HU with α in (0, 100) (km ⁻²)	0,004524011	0,000469625	0,000503653	0,000149544	0,000381571	0,000373783	0,001666566	0,008068753872172	6,85%		
Total (km ⁻²)	0,054274337	0,0138361	0,012204747	0,017999623	0,005529722	0,0107103	0,003207878	0,117762706907642	100,00%		
2. Normalized Incidence calculation											

* $\alpha >>> 10000$ means $\alpha >>> 10000 \times 10^{-6}$ (days⁻¹), etc

Apéndice D

Recopilación de alteraciones hidrogeológicas de algunos sismos presentados en España hasta 1984

COMISIÓN MAPA GEOLÓGICO

Zamora: Nada

Guipúzcoa: Nada

Huelva: 28 de julio de 1847 en....”El agua de los pozos, agitada por el sacudimiento, que luego oscilando con un ruido misterioso y un fluido caliente que salía por los mismos en forma de torbellino ... las hojas de los para de que muchas están..., elevando las más ligeras como si fuera un huracán” (pág 245-246).

Valencia: Nada

Barcelona: Nada

Huesca: Nada

Salamanca: Nada

Asturias: Nada

Cáceres: Nada

Cuenca: Nada

Sánchez Lozano, R. Y Marín A. “Estudio relativo a los terremotos ocurridos en Murcia en 1911”. *Bol. Del Instituto Geológico de España. Tomo XII. Segunda Serie. Madrid, 1911. Pág. 179-215.*

En las pág. 197-198 se dice “ Consignaremos para terminar que los manantiales termales de Archena?, Fortuna, Mula, y Alhama, de la zona del epicentro o inmediatos a ella, no han sufrido alteración en sus caudales durante el período sísmico, mientras las aguas que dan riego a la verga de Ricote?, distante unas cuatro leguas de Larquí, para ser que aumentan considerablemente.

Manuel M.S, Navarro Neumann, S.J. “Ensayo sobre la sismicidad del suelo Español” *Bol. De la Real Soc. Española del Historia Natural. Tomo XVIII. 1917. Pág. 83-108.*

- Terremoto del año 1533, en Almería. Fuerte terremoto que cerró las fuentes termales de Alhama La Seca, Según C. de Prado.
- Terremoto de 1911. Mayo día 31 (15h 13min), En Santafé. Intensidad VIII. “Enturbamiento de aguas freáticas”.

Jorge Bousar “El terremoto de 1504 en Carmona y en los Alcores. *Bol. De la Real Sociedad Española de Historia Natural. Tomo XVIII. 1918. pág. 115 -123.*

“El río Guadalquivir elevando sus aguas por tres o cuatro veces con sus naves, con sus lanchas y toda su escuadra, horrorizó de tal manera a las gentes que todos a un tiempo creían haber llegado el día del Juicio. Nadaban los peces sobre las aguas, porque el mar sobrevenía alterado, desde lo hondo subían olas...”

“...que habiéndose abierto nuevos pozos por todo el campo, arrojaban abundante agua por grandes bocas y que al instante se cerraron y secaron...”

“...Hay también algunos que afirman que vieron fuentes cuyas aguas eran de color de sangre, principalmente en los pueblos de Almadán, Cazallu y otros que fueron casi enteramente destruídos...”

Federico de Botella y de Novenos (1885). *“Los terremotos de Málaga y Granada. Madrid. Imprenta de Fortanet. Boletín de la Sociedad Geográfica de Madrid, tomo XVIII, 1885. pp15-18.*

Alhama, Cesó el manantial termal desde el terremoto hasta 9h., con más caudal y más temperatura (49°), no ha cambiado sus propiedades alcalinas pero ha adquirido las sulfurosas. Idéntico fenómeno acompañó al terremoto de 1755, manteniendo luego el manantial a su estado normal. Ha salido otro manantial a 1km río abajo entre las grietas de un margoso, tan caudaloso como el otro, también sulfuroso.

López Azona, J.M. *“Las aguas minero-medicinales en la provincia de la Coruña: actas del Congreso Luso-Español de Hidrología”.* Lisboa 1967.

“manantiales que se agruparon(...) siguiendo la línea geotectónica delimitada en un extremo por los epicentros de los seísmos del 7 de noviembre de 1991”

CATÁLOGO SÍSMICO (Hasta 1928)

Galbis Rodríguez, J.

FECHA	REFERENCIA
500 A.C.	“Abriéronse grandes hendiduras por la tierra, y por cerca de la marina y de algunas de ellas salieron nuevas fuentes y nuevos arroyos de betunes y nueva agua nunca vista”
949	Habla del cambio de curso de un afluente del Duero (p. 8)
1357 (14 de Mayo)	Hubo grandes terremotos en las ciudades vecinas al Reino de Portugal, abrióse la tierra en algunas partes, saliendo de ella tanta agua, que destruyó muchos edificios. Sevilla y Córdoba fueron destruidas.
1396 (15-18 Dic.)	Dos fuentes manaron agua muy hedionda y de color ceniza [En <i>Valencia</i>]
1504 (5 de Abril)	Terremoto de <i>Carmona</i> . “En Sevilla hubo hundimientos notables de terreno, salida de agua y fango por las grietas y por agujeros redondos, y se enturbiaron las aguas de los pozos, en particular en Almadén y Cazalla.
1522 (22 Sept.)	<i>Almería</i> “secáronse muchas fuentes y aparecieron otras nuevas”
1533	<i>Almería</i> . “Ocurrió en Almería un violento terremoto que hizo desaparecer las fuentes termales de Alhama la Seca, lo que obligó a sus habitantes (moriscos a la sazón) a abandonar el pueblo.
1556	<i>Granada</i> . Resulta muy posible que estos sismos fuesen almerianos y tuviesen relación con la reaparición de las fuentes de Alhama la Seca.
1825 (2-6 de Marzo)	<i>Argel</i>”pocas horas antes del temblor se secaron todas las fuentes y los pozos”...
1828 (13-15 Sept.)	<i>Murcia</i> . Desapareció el agua de varios pozos (Guadarrama) hedor pestilente de agua de manantiales turbios.
1829 (21 Marz.)	<i>Orihuela</i> . “se abrieron innumerables grietas en el terreno de las cuales manaban agua negra y pestífera; algunas de ellas arrojaron arena y cenizas de diversos colores...”
1851 (15 Marz. y sig.)	<i>Mallorca</i> . “como ocurre en todos los sismos de alguna importancia, se enturbiaron multitud de fuentes con ocasión del temblor principal, entre ellos hay que citar la fuente termal de Campos, en que aumentó la temperatura del agua con desprendimiento de gas sulfídrico”
1923 (25 Oct.)	“En Villareal del Canal (<i>Huesca</i>), a las 10h 30min, se repite el temblor del día 8, con aparición de los manantiales sulfídricos en el barranco del Pinar o de los Pastores y desapareció de varias fuentes”

OTRAS RECOPIACIONES

Estudio Geológico de la zona Sub-bética en la transversal de Loja y sectores adyacentes. Tomo 2, 1969

Aguas Termales (Pág. 174)

... “Llama la atención la localización de todas las fuentes termales en el conjunto de las cordilleras Béticas. La mayor parte se dispone en una línea que pasa por Periana, Alhama de Granada, La Mula, Sierra Elvira, Graena, Zújar, ..., la cual, a su vez se localiza en las proximidades del contacto de las zonas Béticas y Sub-Béticas, donde posiblemente existe una gran falla o zona de succión. Dicha alineación contiene los epicentros de bastantes terremotos importantes. Todos estos datos hacen pensar que las fracturas profundas aún en movimiento sirven de camino de salida de las aguas y de hipocentro de los seísmos.”

Mesaguer Pardo, José “Hidrología subterránea de los campos de Dalía y Najar”
Sin datos

Due Rojo, Antonio (S.J.) “El período sísmico de Granada”
(Pág. 164) “fenómeno extraño manantial termal cercano al epicentro”

CUESTIONARIOS MACROSÍSMICOS (IGN)

SISMO	ANOTACIONES
3.IX.1930. Lorqui (MU) #102	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Jefe de la estación de Blanca</i>: Pozos han quedado secos? Sí. No especifica. - <i>Alcalde de Blanca</i>: Pozos han quedado secos? Sí. No especifica. - <i>Cura de Espinardo</i>: Pozos secos? “No, al contrario se ha notado que en algunos ascendieron a la superficie como si sus aguas se hubieran vuelto artesianas; descendieron”.
11.III.1982. Navarra	No hay datos.
26.II.1982. Murcia. Grado III	No hay datos.
22.VI.1982. Pamplona.	Párroco de Carrión ¿Alteró régimen? Sí. No especifica. Legaría: ¿Alteró régimen? Sí. No especifica.
22.V. 1982 NO de Pamplona Int. Máx. V	Párroco de Esparza (NA) ¿Alteró régimen? Sí. No especifica. ¿Deslizamientos? Sí.
16. III.1982 Alicante In.Máx. III-IV	No hay datos
6.I.1982 Navarra	<ul style="list-style-type: none"> -Párroco de Idocín (NA) ¿Alteró régimen? Sí. No especifica. ¿Deslizamientos? Sí. -Huesca (Juan XXIII 1 5to B) ¿Deslizamientos? Sí. -Ayuntamiento de Alguaire ¿Régimen? Sí. ¿Deslizamientos? Sí. -Guardia Civil de Aleanadie ¿Régimen? Sí.
25.II.1984 Navarra Int. Máx III-IV	No hay datos
24.VI. 1984 Granada Int. Máx. V	<ul style="list-style-type: none"> -Estudiante de Granada ¿Régimen? Sí. ¿Deslizamientos? Sí. -Alcalde de Alcalá La Real ¿Régimen? Sí. ¿Deslizamientos? Sí. -Secretario Cámara agraria de Otivar (Gr.) ¿Régimen? Sí ¿Deslizamientos? Sí.
2.VIII. 1984 Alicante Int. Máx. IV-V	No hay datos
26.IX. 1984 Gerona	No hay datos
20.III.1984 Alicante	No hay datos
9.XI. 1983 La Coruña	No hay datos
24.I.1983 Atlántico	No hay datos
6.I.1983 Almería	No hay datos

SISMO	ANOTACIONES
10.I.1983 Villanueva de San Juan (Sevilla). III-IV	Administrativo de Priena (Se) ¿Régimen? Sí. No especifica. ¿Deslizamiento? Sí.
12.I.1983 Almería	No hay datos
8.II.1983 Sevilla y Cádiz	No hay datos
20.III.1983 Murcia Int. Máx. III-IV	No hay datos
5.V.1983 Villar de Barrio (Orense) Int. Máx. III-IV	No hay datos
7.X.1983 Ayamonte (Huelva) Int. Máx. III-IV	No hay datos
5.IV.1972 Jacarilla (Murcia)	No hay datos
6.VI.1983 Alicante. Int. Máx. III-IV	Ayuntamiento de Campello ¿Régimen? Sí. No especifica
26.V.1972 Mediterráneo	No hay datos
12.I.1971 Mar Menor	No hay datos
16.VII.1969 Alicante	No hay datos
23.I.1969 Chiva	No hay datos
6.V.1959 Alfábar	No hay datos
6.VI.1977 Lorca	No hay datos
7.VIII.1975 Almería	No hay datos
16.III.1972 Portaloa (Almería)	No hay datos
28.I.1978	No se sintió
18.III.1975 Almería	No hay datos
9.VI.1964 Galera (Granada)	En Orce 13 personas afirmaron que sí se produjeron cambios de agua en pozos. En Galera 6 personas afirmaron que sí se produjeron cambios de agua en los pozos.
25.X.1979 San Miguel de Salinas	<i>La Font d'en Canos</i> ¿Desapareció o secó algún pozo? Sí. No especifica.
20.VI.1979 Beas de Granada	<i>Labrador de Alicant de Ortega</i> , ¿Régimen? Sí. No especifica. <i>Administrativo de Pedro Martínez</i> ¿Régimen? Sí. <i>Guardia Civil de Tonox (Málaga)</i> “Es posible que haya aumentado la cantidad de agua en manantiales. Es de dominio público que el agua en toda la cuenca está aumentado pero puede deberse a las abundantes lluvias de este año y a filtraciones del pantano “Los Bermejales”

SISMO	ANOTACIONES
20.III.1979 Chimeneas (Granada)	No hay datos
15.II.1979 Sarriá (Lugo)	No hay datos
23.II.1979 Pontevedra	Aumentó manantiales; se ignora pozos
20.II.1979 Orense	No hay datos
16.II.1979 Cabo Touriñan	No hay datos
20.II.1979 Chimeneas (Granada)	No hay datos
14.V.1979 Cullar Baza (Granada)	<i>Profesor de Cullar Baza</i> , Sí alteró régimen “El agua de la fuente pública ha aumentado de caudal” <i>Guardia Civil Vélez-Blanco</i> , Sí surgieron nuevos pozos.
15.IV. 1979 Antequera	No hay datos
18.XII.1979 Becerrea (Lugo)	No hay datos
11.XI.1980 Hornachuelos (Córdoba)	No hay datos
27.IX. 1980 Castell de Ferro (Granada)	No hay datos
3.XII. 1980 El Coronel (Sevilla)	No hay datos
8.XII. 1980 Alborán	No hay datos
25.XI.1980 Caldas de Reyes (Pontevedra)	No hay datos
6.X.1980 Marín (Pontevedra)	<i>Sanxenxo, Procesos de EGB</i> , Sí alteró régimen. No especifica
23.V. 1980 Villareal San Antonio Port.	No hay datos
29.II.1980 Tarbes (Franc.)	<i>Guipúzcoa</i> , Variación de régimen. <i>Tarragona</i> , Variación de régimen.
10.XI.1981 Alicante	No hay datos
27.IX.1981 Almería	No hay datos
5.II.1981 Cabo D. Antonio	Una persona en <i>Albacete</i> y 3 en <i>Alicante</i> afirmaron que se produjo cambios en el régimen de las aguas.
22.I.1981 Ohanes (Almería)	Se menciona la aparición de “nuevos pozos”